

## 고속도로 통행료 무료 정책이 대기 중 미세먼지 농도에 미치는 영향

박동규\* · 임병인\*\*

본 연구에서는 고속도로 통행료 무료 정책이 대기오염에 미치는 영향을 에어코리아의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 자료와 기상청의 기상 관측 자료에 시계열 회귀단절(Regression Discontinuity in Time, 이하 RDiT) 추정기법을 적용하여 분석하였다. 분석 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 무료 정책으로 대기 중 PM<sub>10</sub> 농도가 최저 40.6%에서 최대 58.4%까지 증가하여 민감군(영·유아, 어린이, 임신부, 노인, 호흡기·심혈관 질환자)이 유의할 수준인 것으로 나타났다. 둘째, 분석 결과의 강건성 확인을 위해 정책 시행 이전 2개 연도(2015년, 2016년 추석)에 대한 위약 효과(placebo effect)를 검증한 결과, 대기오염에 미치는 부정적인 효과가 고속도로 통행료 무료 정책 효과에 기인한 것임을 확인하였다. 셋째, 교통량 패널 회귀모형 결과 2017년도 추석 연휴 기간 교통량 증가가 PM<sub>10</sub> 증가의 주요 원인인 것으로 나타났다. 이상에서 고속도로 통행료 무료 정책이 교통량 증가를 통해 대기질을 악화시켜, 동 정책이 정부의 미세먼지 저감 대책과 배치되었다고 말할 수 있다. 이 분석 결과와 중국발 미세먼지가 유입되는 설 명절 연휴에는 대기질 오염 정도가 더 크게 나타날 수 있다는 점을 고려하여 고속도로 통행료 무료 정책의 종합적인 정책 평가가 필요하다는 시사점을 도출할 수 있다.

핵심주제어: 고속도로 통행료 무료 정책, 대기오염, 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 정책 효과, 시계열 회귀단절모형

경제학문헌목록 주제분류: Q, Q5, Q53, Q58

---

\* 주저자, 포항공과대학교 환경연구소, 박사후연구원, 전화: (054) 279-9509, E-mail: dongkyu@postech.ac.kr

\*\* 교신저자, 충북대학교 경제학과 교수, 전화: (043) 261-2216, E-mail: billforest@chungbuk.ac.kr

논문투고일: 2023. 8. 7 수정일: 2023. 9. 3 게재확정일: 2023. 9. 17

## I. 연구배경 및 연구목적

미세먼지는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질로 입자의 지름이  $10\mu\text{m}$  이하인 먼지( $\text{PM}_{10}$ , 미세먼지)와 지름이  $2.5\mu\text{m}$  이하인 먼지( $\text{PM}_{2.5}$ , 초미세먼지)로서 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 구분하고 있다.<sup>1)</sup> 자연적 발생원에는 흙먼지, 바닷물에서 생기는 소금, 식물의 꽃가루 등이며, 인위적 발생원은 화석연료를 사용할 때 생기는 매연, 자동차 배기가스, 건설 현장에서 발생하는 날림먼지, 공장 내 분말 형태의 원자재·부자재, 취급과정에서의 가루 성분, 소각장 연기 등이 있다. 대기오염물질 중 도로 및 비도로 이동오염원이 37.3%를 차지하고, 미세먼지( $\text{PM}_{10}$ )와 초미세먼지( $\text{PM}_{2.5}$ )에서는 각각 10%, 22.3%로 그 비중이 커서 수송부문의 미세먼지 저감을 위한 다양한 노력(도로 수송부문에서는 노후 경유차 퇴출 가속화, 경유차 검사·관리 강화, 저공해차 보급 확대 등, 비도로 수송부문은 선박, 항만 미세먼지 감축, 건설·농업기계 배출기준 강화, 공항 미세먼지 저감 추진 등)을 기울이고 있다. 특히, 인위적인  $\text{PM}_{10}$ 은 대부분 연료 연소로부터 발생하며, 보일러나 자동차, 발전시설 등의 배출물질, 그 외 공사장, 도로 등에서 발생하는 비산먼지도 발생원으로 알려져 있다.

문제는 OECD에서 우리나라를 초미세먼지( $\text{PM}_{2.5}$ )와 오존농도가 높은 대기오염 피해 우려 지역으로 예측하고 있고,<sup>2)</sup> 미세먼지가 2013년 세계보건기구(WHO)가 지정한 제1군 발암물질로 기관지 질환, 심혈관계 질환, 조기사망 등을 유발한다고 공표했다는 점이다.<sup>3)</sup> 이와 같은 상황을 인식하고 정부에서는 다양한 부문에 걸쳐 미세먼지 저감 정책을 수립, 시행하고 있다. 구체적으로 살펴보면, 산업부문에서는 미세먼지 다량 배출지역을 대기관리권역으로 지정하여 엄격 관리, 사업장 오염물질 배출기준 강화, 관리체계 재정비, 사업장 배출관리 실태 감시, 단속 강화 등, 발전 부문에서는 고농도 시기(12~3월) 집중 감축 조치 시행, 석탄 발전소 시설 개선, 친환경 에너지 전환을 위한 기반 확충 등, 농업·생활 부문에서는 농촌지역 폐기물 불법소각 방지, 축산·경종 분야 암모니아 관리 강화, 가정용 노후 보일러의 친환경 보일러 교체 지원 등과 같은 정책이 있다.

1) 환경부 홈페이지(<https://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30>).

2) 박상우·홍다희·박근영(2023), pp. 11~12에서 OECD(2016)를 재인용.

3) International Agency for Research on Cancer(IARC), 2013, IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, Press release, France.

한편, 도로이동 오염원에서 기인하는 대표적인 미세먼지 중의 하나인 PM<sub>10</sub> 배출량 비중은 2020년 기준으로 전국 배출량의 2.7%(4,088톤)에 불과하지만,<sup>4)</sup> 특히 교통량이 집중된 수도권에서는 도로이동 오염원에서 기인하는 PM<sub>10</sub> 배출량이 2020년 기준 약 9,121톤, 이 중 도로이동 오염원(도로 재비산먼지 포함)에 기인하는 배출량은 2,780톤으로 약 30%를 차지한다.<sup>5)</sup> 이에 근거할 때, 수도권의 많은 차량이 고속도로에 집중되는 명절(설, 추석) 기간에는 고속도로 주변 지역의 PM<sub>10</sub> 농도가 평소보다 증가할 가능성이 높다(Fu and Gu, 2017).<sup>6)</sup> 이와 같음에도 차량이 집중될 수밖에 없는 고속도로 통행료 무료 정책이 2017년 9월 20일 도입된 뒤 현재까지 시행되고 있다. 도입 시기에 즈음하여 제시된 반대의견으로는 미세먼지 증가 외에도 교통 체증 불가피, 수익자 부담 원칙과 배치, 대중교통을 이용하는 사람에 대한 역차별 소지 등이 제시되었고, 찬성 논리로는 연휴 기간 중 고속도로 기능 미흡, 수도권 거주자들의 지역 이동으로 작지 않은 내수 진작 효과 촉발, 중국과 대만에서도 시행하고 있다는 것 등이 거론되었다.<sup>7)</sup>

본 연구는 이와 같은 찬반 논쟁 끝에 시행된 동 정책이 결과적으로 고속도로 이용 차량을 증가시켰으므로 정체를 가중시켜(〈표 6〉 참조), 미세먼지 역시 더욱 증가했다는 점에 초점을 맞춘다. 물론 전술한 찬성 논리가 일부 나타났을 수도 있지만, 어느 때보다 국민적인 관심사가 된 미세먼지 관점에서는 여전히 우려할 만한 상황인 것은 부인할 수 없다. 본 연구는 이와 같은 문제의식을 가지고 고속도로 통행료 무료 정책이 실제로 통행량을 증가시켰는지, 그리고 증가한 통행량으로 대기 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도에 어떤 영향을 주었는지를, 에어코리아에서 제공하는 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 자료와 기상청의 기상 관측 자료에 회귀단절모형 추정 기법을 적용하여 정책효과를 추정하는 것에 목적이 있다.

본 연구는 서론에 이어 제Ⅱ절에서 국외 선행연구에 대하여 개괄한다. 제Ⅲ절에서는 사용 자료인 대기오염 자료와 기상 자료를 상술한다. 제Ⅳ절에서는 분석 방법인 시계열 회귀절단모형에 대하여 논의하고, 제Ⅴ절에서 추정 결과를 분석한다. 마지막으로 제Ⅵ절에서는 추정 결과들을 요약한 뒤, 정책적인 시사점을 도출

4) 환경부 홈페이지(<https://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30>).

5) 대기정책지원시스템(CAPSS) 참조.

6) 2020년도 PM<sub>2.5</sub> 도로이동 오염원 배출량은 3,761톤으로 PM<sub>10</sub> 배출량(4,088톤)과 비슷한 수준이지만, 도로 재비산먼지의 경우 PM<sub>10</sub>이 31,574톤으로 PM<sub>2.5</sub>의 7,638톤보다 월등히 많아(CAPSS 2020년도 부문별 배출량 참조), 본 연구에서는 PM<sub>10</sub> 농도 변화에 초점을 맞추었다.

7) 참고로 동 정책으로 인한 통행요금 감면액은 2017년 534.61억 원, 2018년 923.16억 원, 2019년 945.08억 원이었다.

하여 제시한다.

## II. 선행연구

본 연구 주제와 같이 특정 정책의 대기오염 효과를 분석한 연구로는 Davis (2008), Percoco(2015), Li et al.(2020) 등이 있고, 교통량과 대기오염의 관계를 논의한 연구로는 Gillies et al.(2001), Bigazzi and Figliozzi(2012), Lin et al.(2020), Wang et al.(2023) 등이 있는데, 국내 관련 연구는 없다.<sup>8)</sup> 이하에서는 기존연구들에 대하여 간략하게 논의해 본다.

Davis(2008)는 멕시코시티에 적용된 차량 2부제의 효과를 장기간(최대 8년)의 시계열 자료에 최소자승추정법(OLS)과 RDIT을 적용하여 추정하였다. 추정 결과, 차량 2부제가 대기질을 개선한다는 뚜렷한 증거가 없다고 결론을 내렸다. Percoco (2015)는 런던의 혼잡 교통료의 효과를 총 5년의 시계열 자료를 가지고 RDIT 방법으로 분석하였으며, 공간적으로 달라지는 교통량으로 인해 제한적인 정책효과가 있음을 확인하였다. Li et al.(2020)은 중국의 차량 연료 환경기준의 변화로 인한 효과를 분석하였다. 분석방법으로는 이중차분법(Difference-in-Differences, 이하 DiD)과 RDIT를 사용하였는데, 해당 정책으로 대기질 제고 효과(DiD: 12.9%, RDIT: 6.6%(short-term), 14.1%(long-term))가 있음을 확인하였다.

Gillies et al.(2001)는 고속(72.6km/h)으로 운행하는 차량보다 저속(42.6km/h)으로 운행하는 차량에서 PM<sub>10</sub> 배출이 1.7배 더 많았음을 보여 주었으며, Bigazzi and Figliozzi(2012)는 차량 속도가 증가할수록 초미세먼지는 감소한다는 것을 보였다. 또한 Lin et al.(2020)은 고속도로 내 자동 요금 징수 시스템이 요금소에서의 정체를 감소시켜 미세먼지 농도를 줄인다는 것을 보여 주었고, Wang et al.(2023)은 대도시의 교통정체가 대기오염물질을 증가시켰음을 실증하였다.

한편, 본 연구와 같이 명절 기간 고속도로 통행료 무료 정책의 효과를 분석한 연구는 많지 않다. 명절 연휴라는 개념은 중국과 한국에만 존재하므로 2012년이 정책이 처음 시작된 중국의 관련 선행연구인 Fu and Gu(2017)가 유일하다. Fu and Gu(2017)는 2012년 중국에서 시행된 명절 기간 고속도로 통행료 무료

---

8) 교통정책으로 인한 미세먼지 관련 국내 연구는 찾을 수 없는데, 빈미영·김채만(2010)에서는 경기도 승용차요일제 시행으로 인한 효과를 분석하면서 환경오염비용 절감편익을 제시하고 있다.

정책이 대기오염에 미치는 영향을 DiD와 RDIT 방법으로 분석하였다. 분석 결과, 명절 기간 내 고속도로 통행료 면제 정책은 대기오염을 20% 증가시키고 시야를 감소시키는 것으로 나타났다. 하지만 Fu and Gu(2017) 분석에는 몇 가지 한계 점이 있다. 첫째, 대기오염을 측정하는 기준인 Air Pollution Index(API)로부터 PM<sub>10</sub> 농도를 환산하였기 때문에 분석 자료에 오차가 있을 수 있다. 둘째, 각각의 대기질 측정소들로부터의 측정 자료를 도시 단위로 평균한 자료를 사용하였기 때문에 분석 결과에 편향이 있을 수 있다. 셋째, DiD를 사용한 분석에서 정책 시행 전년도를 통제그룹(control group)으로 지정하였는데, 이는 처치그룹(treatment group)과 통제그룹 간의 시계열에 따른 변화를 정확하게 추정하기 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 유일한 기존 연구인 Fu and Gu(2017)와 달리 고속도로 요금소를 기준으로 가장 가까운 대기오염물질 측정소에서 관측한 PM<sub>10</sub> 자료를 사용하였으며, 중국과 달리 3일이라는 짧은 명절 연휴 동안의 정책 효과를 분석하였고, 후술하는 Hausman and Rapson(2018)의 RDIT 방법론을 적용하였다는 점에서 차이가 있다.

### Ⅲ. 미세먼지 현황 및 사용 자료

#### 1. 미세먼지 추이

이제 2015년부터 2020년까지의 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 배출량 추이를 살펴본다(〈표 1〉과 〈그림 1〉 참조).<sup>9)</sup> 먼저 PM<sub>10</sub>은 연도별로 등락이 엇갈리고 있지만, 2020년 배출량이 2015년 대비 감소하였다. 배출량 산정방식 변경으로 2015년부터 처음으로 20만 톤을 넘어 최대치인 233,177톤을 배출하여 정점에 이르렀으나, 이후 등락하면서 2019년에 207,866톤을 배출하였다. 2020년에는 2019년 대비 29.4% 감소한 146,733톤으로 급감했는데, 이는 2020년 초부터 촉발된 Covid-19 팬데믹 때문이다.

9) 환경부의 공식적 발표에 따르면, PM<sub>2.5</sub>과 PM<sub>10</sub> 배출량은 2011년 각각 81,793톤, 131,176톤, 2012년 76,287톤(전년 대비 -6.7%), 119,980톤(전년 대비 -8.5%), 2013년 76,802톤(전년 대비 0.7%), 121,563톤(전년 대비 1.3%), 2014년 63,286톤(전년 대비 -17.6%), 97,918톤(전년 대비 -19.5%)이었다.

〈표 1〉 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) 배출량 추이

(단위: 톤, %)

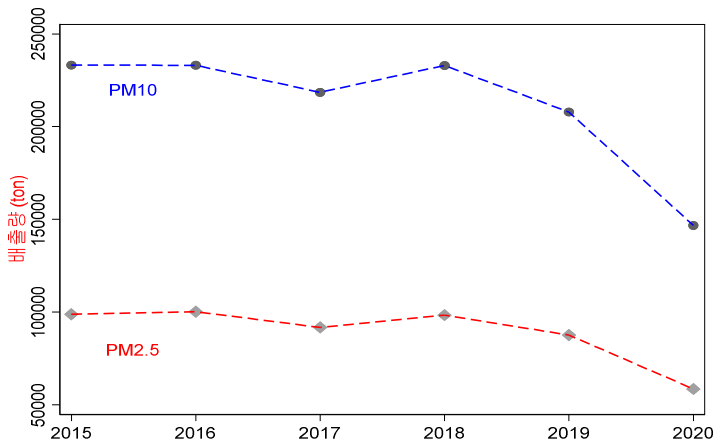
| 구분                | 2015    | 2016               | 2017              | 2018             | 2019               | 2020               |
|-------------------|---------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| PM <sub>10</sub>  | 233,177 | 233,085<br>(-0.04) | 218,476<br>(-6.3) | 232,993<br>(6.6) | 207,866<br>(-10.8) | 146,733<br>(-29.4) |
| PM <sub>2.5</sub> | 98,806  | 100,247<br>(1.5)   | 91,731<br>(-8.5)  | 98,388<br>(7.3)  | 87,618<br>(-10.9)  | 58,558<br>(-33.2)  |

주: 1) ( )는 전년 대비 변화율임.

2) 2015년부터 비산먼지 및 생물성 연소 부문 배출량을 포함하고 있어 그 이전 연도의 배출량과 큰 차이가 있음.

자료: 환경부 국가미세먼지정보센터, 통계청.

〈그림 1〉 연도별 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량 추이



자료: 환경부 국가미세먼지정보센터, 통계청.

PM<sub>2.5</sub> 역시 2015년 이후 연도별로 배출량이 등락하고 있다. 배출량이 2016년에 처음으로 10만 톤이 넘는 100,247톤이었지만, 2020년 배출량은 58,558톤으로 PM<sub>10</sub>과 비슷한 추이를 보여 주고 있다.

## 2. 사용 자료

앞서 두 유형의 미세먼지, PM<sub>2.5</sub>과 PM<sub>10</sub> 배출량 추이를 살펴보았지만, 본 연구에서는 PM<sub>2.5</sub> 자료가 측정기 고장 및 정비로 인한 관측치의 누락이 많아 부득

이 PM<sub>10</sub> 배출량 자료로 대기질 오염 효과를 분석한다. 또한 고속도로 통행료 무료 정책 적용 기간이 설과 추석인데, 설은 시기적으로 중국으로부터 유입되는 대기오염물질의 영향을 많이 받을 가능성이 높음에도 통제하기 어려워 분석 대상으로 고려하지 않았다.<sup>10)</sup> 본 연구에서는 정책 시행(2017년) 이전과 이후를 비교하기 위해 2015년부터 2018년까지 추석 연휴 시작(추석 전날) 전후 10일 동안 시계열 자료를 사용한다.

이하에서 사용 자료에 대하여 논의한다. 종속변수로 사용하는 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 자료는 에어코리아에서 제공하는 최종확정측정 자료를 사용한다. 대기오염원은 다양한 기상 조건을 통해 확산 및 희석되기 때문에 보통 대기오염과 관련된 선행연구들은 기상변수를 중요한 설명변수로 사용하고 있다. 이에 기상청의 방재기상관측 자료로부터 일평균 기온, 최고기온, 최저기온, 강수량, 평균풍속, 최대순간풍속, 풍향 등을 사용한다. 이와 같은 관측 자료를 후술하는 각 요금소에서 가장 가까운 대기오염원 측정소 및 기상 관측소에서 측정된 자료를 결합하여 설명변수로 사용하였다.<sup>11)</sup>

한편, 통행료 무료 정책 시행 이전에도 인구 과밀지역인 수도권에서 고속도로로 차량 진입이 많았지만, 통행료 무료 정책이 시행되면서 수도권의 차량 이동이 더 증가하였을 것이고, 명절 기간 정체는 서울 근교 및 중부 지방으로 이어지는 진입로 근처에서 집중적으로 발생할 것으로 예상되었다.<sup>12)</sup> 따라서 본 연구에서는 수도권의 주요 고속도로인 경부고속도로, 중부고속도로, 서해고속도로, 영동고속도로의 JC(Junction) 근처 27개 요금소와 서울을 둘러싸고 있는 수도권 제1순환선에서 남부 지역으로 이어지는 시흥TG, 청계TG, 성남TG를 포함한 총 30개 요금소에서 측정된 교통량과 각 요금소에서 가장 가까운 대기오염 측정소와 기상 관측소로부터 얻은 PM<sub>10</sub>, 기온, 강수량, 풍속, 풍향 등을 결합하여 구축한 불균형 패널데이터를 사용하였다(〈그림 2〉 참조).<sup>13)</sup>

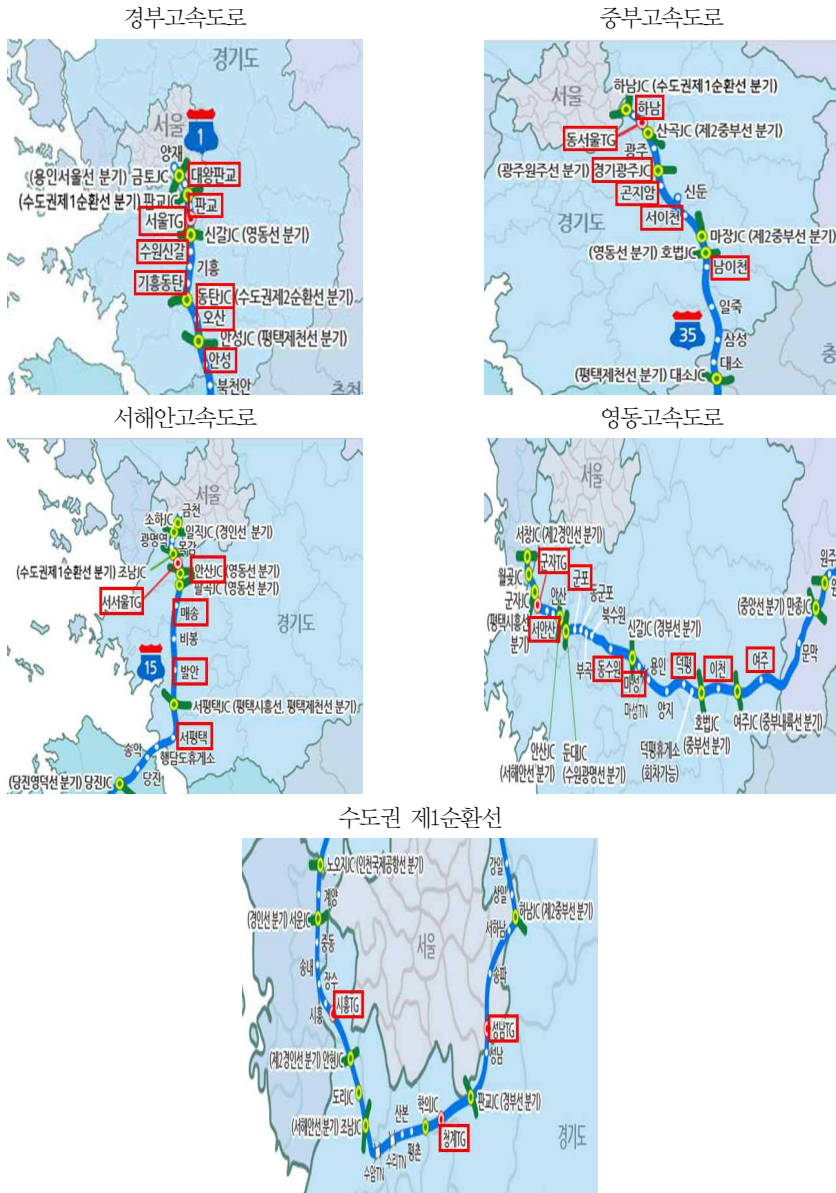
10) 많은 관련 연구에서 풍향을 터미변수로 사용하여 중국으로부터 유입되는 대기오염물질을 설명하고 있으나, 겨울철 우리나라 대기질에 미치는 영향이 크기 때문에 통행료 무료 정책의 효과를 과대평가할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 추석 명절만을 대상으로 한다.

11) 지형별 특성이 구별로 극단적으로 다를 수 있으므로(산, 강, 호수, 숲 등의 존재 유무는 대기질에 영향), 상대적으로 먼 거리에 있는 기상 측정소의 자료에 가중치를 적용하는 것은 분석에 편향(Bias)을 가져올 수 있다.

12) 전국 단위 분석의 경우, 대기질 변화에 유의미한 영향을 줄 수 없을 정도의 적은 통행료를 보여 주는 요금소들도 포함되어 통행료 무료 정책의 효과를 과소평가할 가능성이 있다.

13) 경부(판교, 대왕판교, 서울, 수원신갈, 기흥동탄, 동탄, 오산, 안성), 중부(하남, 동서울, 경기광주, 곤지암, 서이천, 남이천), 서해(서서울, 안산, 매송, 발안, 서평택), 수도권 제1

<그림 2> 각 고속도로 노선별 분기점 및 요금소 위치

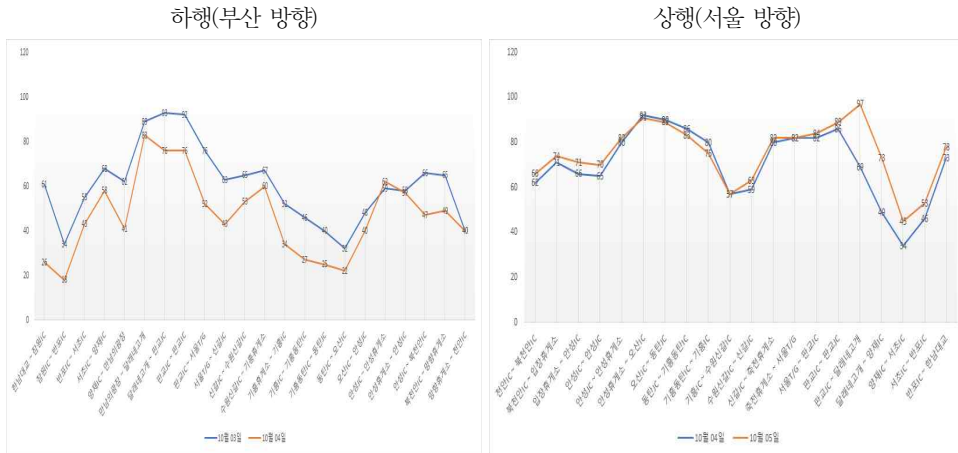


주: 수도권 내 주요 고속도로 27개 요금소와 수도권 제1순환선의 3개 요금소는 붉은색 사각형으로 표시함.  
 자료: 한국도로공사(<https://www.ex.co.kr/site/com/pageProcess.do>).

순환(성남, 청계, 시흥), 영동(군자, 서안산, 군포, 동수원, 마성, 덕평, 이천, 여주).



〈그림 3〉 2017년 추석 연휴 기간 경부고속도로 구간별 평균 속도



자료: 경기도교통정보센터(<https://gits.gg.go.kr/web/trafficInfo/webSectionStatistics.do>).

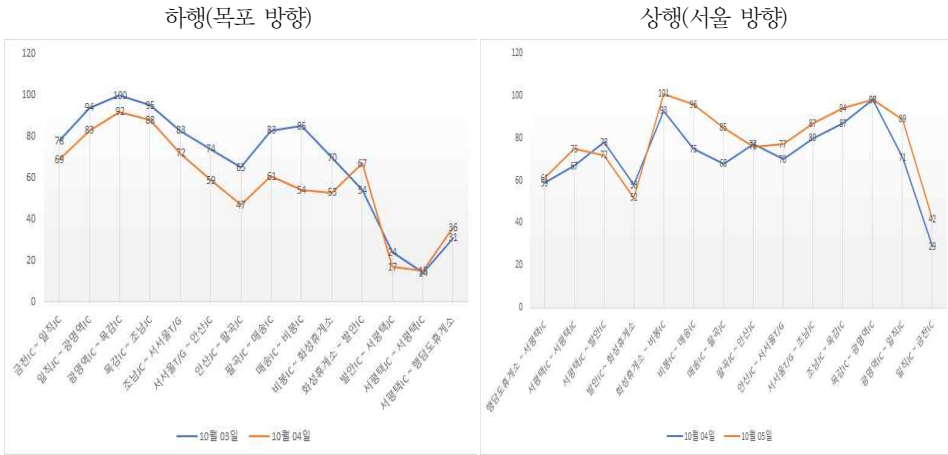
〈그림 4〉 2017년 추석 연휴 기간 중부고속도로 구간별 평균 속도



자료: 경기도교통정보센터(<https://gits.gg.go.kr/web/trafficInfo/webSectionStatistics.do>).

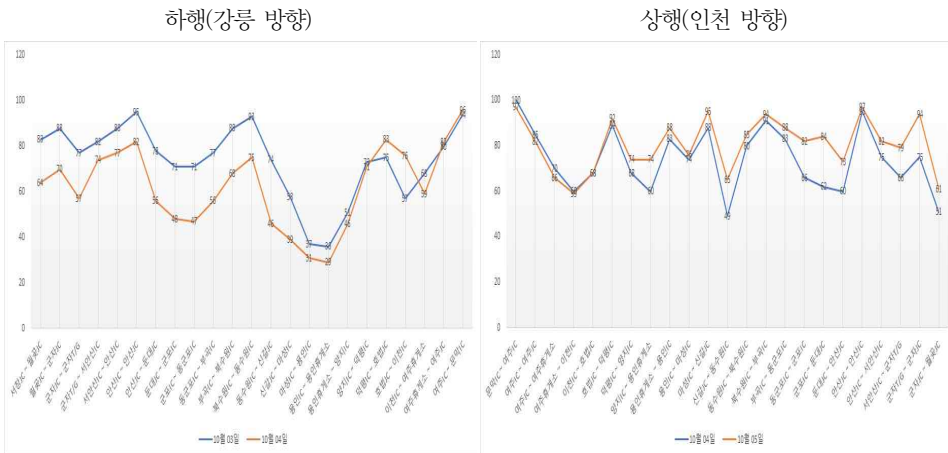
〈그림 3〉부터 〈그림 6〉에 경부, 중부, 서해안, 영동고속도로의 2017년도 구간별 상·하행 평균 속도를 제시하였다. 서울에서 지방으로 이동하는 하행선(왼쪽 그래프)은 추석 전날과 추석의 구간별 평균 속도를, 지방에서 서울로 이동하는 상행선(오른쪽 그래프)은 추석과 추석 다음 날의 구간별 평균 속도를 나타낸다.<sup>14)</sup> 우리나라 고속도로의 제한속도가 보통 100km/h(영동, 수도권 제1순환)와

〈그림 5〉 2017년 추석 연휴 기간 서해안고속도로 구간별 평균 속도



자료: 경기도교통정보센터(<https://gits.gg.go.kr/web/trafficInfo/webSectionStatistics.do>).

〈그림 6〉 2017년 추석 연휴 기간 영동고속도로 구간별 평균 속도



자료: 경기도교통정보센터(<https://gits.gg.go.kr/web/trafficInfo/webSectionStatistics.do>).

110km/h(경부, 중부, 서해안)인 것을 고려해 볼 때, 본 연구에서 선정한 요금소들 사이의 JC 구간의 평균 속도(약 10km/h에서 50km/h)는 상당히 낮다고 볼

14) 교통량이 집중되는 오전 6시부터 오후 6시까지 총 12시간 동안의 구간별 평균 속도를 계산하였다.

수 있으며, 이는 PM<sub>10</sub> 배출량이 많이 배출된다고 볼 수 있는 근거가 된다(Gillies et al., 2001).

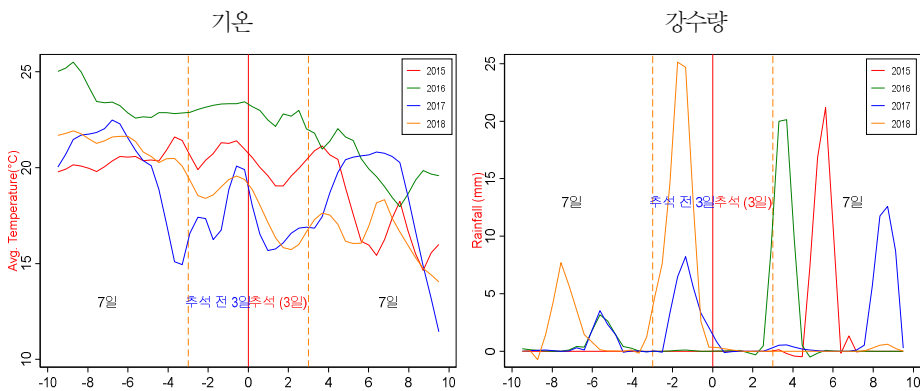
〈표 2〉에는 각 변수의 기초 통계량이 제시되어 있으며, PM<sub>10</sub>의 평균값은 31.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 미세먼지 농도에 큰 영향을 주는 풍속은 평균 1.14m/s 정도로 약한 편이며, 풍향은 175도로 동남풍이다.<sup>15)</sup> 하지만 추석 연휴 3일 동안 기상변수들에 급격한 변화가 있는 경우 추정치에 편향을 가져올 수 있어 〈그림 7〉에 강수량, 풍속, 풍향의 연간 변동성 추이를 제시하였다.

〈표 2〉 주요 변수의 기초 통계량

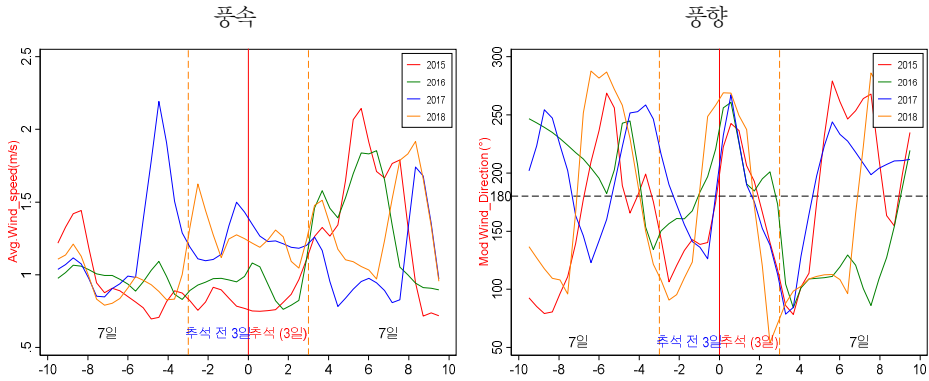
| 변수명              | 단위                       | 평균        | 표준편차      | 최솟값   | 최댓값     | 표본 수  |
|------------------|--------------------------|-----------|-----------|-------|---------|-------|
| PM <sub>10</sub> | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 31.92     | 16.32     | 0.70  | 99.75   | 3,128 |
| 교통량              | 대                        | 69,517.64 | 62,235.47 | 3,084 | 243,596 | 3,128 |
| 기온               | ℃                        | 20.45     | 2.84      | 9.8   | 26.6    | 3,128 |
| 강수량              | mm                       | 3.10      | 10.54     | 0     | 122.5   | 3,128 |
| 풍속               | m/s                      | 1.14      | 0.60      | 0     | 6.7     | 3,128 |
| 풍향               | Degree(°)                | 175.34    | 105.56    | 0     | 357.2   | 3,128 |

자료: 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr/web/>), 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>), 한국도로공사(<https://www.ex.co.kr/>).

〈그림 7〉 주요 기상변수의 연간 변동성 추이



15) 풍향은 0~359도까지 범위를 가지고 있으며 4분위로 구분하여 풍향을 예측할 수 있다. 편의를 위해 서풍(181~359도)과 동풍(0~180도)으로 구분하여 풍향 더미를 사용한다(동풍: 0, 서풍: 1).



자료: 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr/web/>), 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>).

〈표 3〉 주요 변수의 연도별 기초 통계량(평균)

| 연도  | 2015      | 2016      | 2017      | 2018      |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 38.05     | 41.97     | 34.49     | 24.80     |
| 교통량(대)  | 79,013.21 | 67,349.92 | 64,514.87 | 68,474.55 |
| 기온(°C)  | 19.41     | 22.12     | 18.47     | 18.53     |
| 강수량(mm)                                       | 1.04      | 1.22      | 1.40      | 2.30      |
| 풍속(m/s)                                       | 1.07      | 1.09      | 1.17      | 1.17      |
| 풍향(°)   | 172.78    | 176.62    | 191.31    | 175.99    |
| 표본  | 370       | 555       | 523       | 574       |

자료: 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr/web/>), 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>).

추석 연휴 동안 강수량이 지나치게 많거나 강풍이 부는 경우 추정치가 왜곡될 수 있는데, 2015년부터 2018년까지 추석 연휴 기간 3일 동안 강수량은 0mm이며, 풍속의 경우에는 2m/s 미만으로 약해 비교적 안정적인 추세를 보인다. 또한 북서풍(270~359도)이 불지 않아 중국으로부터 유입되는 대기오염물질은 없다고 볼 수 있다.

## IV. 분석방법

본 연구는 연구목적 달성을 위해 회귀단절(Regression Discontinuity)모형 중 시계열 회귀단절 모형을 사용하였다. 보통의 회귀단절 분석방법은 특정 시점에 두 그룹을 비교하여 특정 한계 점수(threshold score)의 아주 좁은 범위(narrow bandwidth)에서 두 그룹 간의 특성이 아주 비슷하다는 가정을 이용하여 처치 효과를 분석한다. 이에 반해 시계열 회귀단절 분석은 실행변수가 점수(score)가 아닌 시간(time)이며, 시간과 관련된 측정 불가능한 변수들이 잠재적 결과에 가져올 수 있는 편향(bias)을 최소화하기 위해 가능한 많은 설명변수가 필요하다(Hausman and Rapson, 2018). 또한 계절성을 고려하기 위해서는 정책 시행 시점을 기준으로 가능한 많은 시계열이 필요하다.

본 연구에서는 정책이 매년 같은 계절에 오직 3일이라는 아주 짧은 기간에만 시행된다는 특징을 반영하기 위해 Li et al.(2020)에서 제시하고 있는 시계열에 대한 최적 대역폭 설정 방법을 적용하지 않고 정책 시행 전후 10일을 시계열로 설정하여 국소 선형 회귀단절 추정(local linear RD estimation)을 실행한다. 시계열 회귀단절 분석방법은 이중차분법과 다르게 정책이 시행된 지역의 데이터만을 가지고 분석할 수 있다는 이점이 있다.

시계열 회귀단절 분석은 2단계 과정을 거친다(Hausman and Rapson, 2018). 첫째, 식 (1)과 같이 계절성 및 측정소와 관련된 더미들을 포함하여 회귀분석을 실시해 잔차(residual:  $\widetilde{Y_{i,t}^{resd}}$ )를 얻는다.

$$\ln(Y_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 X_{i,t} + W.Direction_{i,t} + w_t + s_i + \epsilon_{i,t} \quad (1)$$

식 (1)에서  $Y_{i,t}$ 는 요금소  $i$ 에서 시점  $t$ 에 측정된 대기 중  $PM_{10}$  농도에 대수를 취한 것이고,  $X_{i,t}$ 는 설명변수로서 각각의 기상변수인 최고기온, 최저기온, 강수량, 풍속들의 제공항, 세제공항, 교차항 등을 포함하여 단순 선형함수로 추정하기 어려운 기상 변화를 설명하고자 하였다.<sup>16)</sup>  $W.Direction_{i,t}$ 는 풍향 더미

16) 이 단계에서 사용한 설명변수들은 Auffhammer and Kellogg(2011)의 방법을 따랐으며, 요금소 고정효과모형을 사용하였다. 설명변수로는 최고기온, 최고기온의 제공, 최고기온의 세제공, 최저기온, 최저기온의 제공, 최저기온의 세제공, 최고기온과 최저기온의 교차항, 강수량, 강수량의 제공, 평균풍속, 평균풍속의 제공, 강수량과 최고기온의 교차항, 평균풍

로서, 서풍일 경우에는 1의 값, 동풍일 경우 0의 값을 갖는다.  $w_t$ 와  $s_t$ 는 각각 시간(월, 주)과 요금소 고정 효과(fixed effect)를 나타내며,<sup>17)</sup>  $\epsilon_{jt}$ 는 오차항이다.

두 번째, RD estimator( $\widehat{\beta}_{RD}$ )을 얻기 위해 식 (1)에서 얻은 잔차인  $\widehat{Y}_{i,t}^{resd}$ 에 대해 아래의 추정모형(식 (2))을 적용한다.<sup>18)</sup>

$$\ln(\widehat{Y}_{i,t}^{resd}) = \beta_0 + \beta_1 Y_{i,t-1} + \beta_{RD} Holiday_s_t + T_t + \epsilon_{i,t} \quad (2)$$

식 (2)에서  $Y_{i,t-1}$ 은 식 (1)의 종속변수인  $Y_{i,t}$ 의 시차 변수로서 PM<sub>10</sub>이 가지고 있는 자기회귀(autoregressive) 특성을 설명하기 위해 포함하였다.<sup>19)</sup>  $Holiday_s_t$ 는 명절 연휴 더미(추석 연휴 3일 동안은 1, 그 외에는 0의 값을 가짐),  $T_t$ 와  $\epsilon_{i,t}$ 는 각각 시간 추세 변수와 오차항을 나타낸다.

여기서 유의해야 할 것은 식 (1)과 식 (2)는 서로 다른 시계열을 가지고 있다는 것이다. 이는 첫 번째 단계에서는 연휴 시작 전(추석 전날)을 기점으로 발생할 수 있는 장기적인 기상 변화가 PM<sub>10</sub> 농도에 미치는 효과를 설명하기 위해 연휴 시작 전·후 10일(총 20일)을 사용하였고, 두 번째 단계에서는 3일이라는 짧은 연휴 동안의 정책 효과를 분석하기 위해 연휴 시작 전·후 3일(총 6일)을 시계열로 사용했기 때문이다. 위에서 언급했듯이 RDIT는 가능한 많은 시계열을 사용하여 정책 시행 이후 변화를 분석하는 것이지만, 본 연구는 3일간 지속되는 고속도로 통행료 무료 정책의 초단기 효과에 초점을 두었기 때문에 Calonico et al.(2020)나 Li et al.(2020)에서 사용한 최적 대역폭 설정을 사용하지 않아 Fu and Gu(2017) 방법과 유사하다. 또한 Gelman and Imbens(2019)에 따르면, 고

속과 최고기온의 교차항을 사용하였다.

17) 각각의 요금소의 시간 추세에 따라 변하지 않는 특성을 설명하고 월별, 주별 교통 패턴을 설명하기 위해, 요금소와 시간(월, 주) 고정 효과를 적용하였다.

18) Li et al.(2020)에서 제시하고 있는 일반적인 RDIT의 두 번째 단계는  $\widehat{\beta}_{RD}$ 을 얻기 위해 첫 번째 단계에서 얻은 잔차(Residual:  $\widetilde{y}_d$ )에 대해 아래의 추정모형을 적용한다.

$$\min_{\alpha, \beta, \delta, \gamma} \sum_{s=1}^N K\left(\frac{d_c - d_{c0}}{h}\right) [\widetilde{y}_d - \delta - \gamma(d_c - d_{c0}) - \beta E_c - \alpha E_c(d_c - d_{c0})]^2$$

단,  $d_c$ : 시간을 나타내는 지수( $d_{c0}$ : 정책 시행 시점),  $E_c$ : 정책 시행 전, 후를 나타내는 지수(만약,  $d_c \geq d_{c0}$ 라면 1, 그 외에는 0),  $K(\cdot)$ : 균형커널함수,  $h$ : 대역폭(Bandwidth)

19) 보통 대기오염물질의 농도는 과거의 농도에 의존하는 경향이 있다.

차 시간 추세를 포함할 경우, 잡음(noise)을 유발하고 낮은 수준의 신뢰구간을 보여 주기 때문에 식 (2)의  $T_t$ 는 2차항까지만 포함한다.

본 연구에서는 PM<sub>10</sub> 증가의 주요 요인을 교통량 증가로 가정하였다. 이 가정을 뒷받침하기 위해 식 (3)의 단순 패널 모형을 사용하여 고속도로 통행료 무료 정책이 시행된 3일 동안 교통량에 어떠한 영향을 주었는지도 분석하였다.

$$\ln(\text{Traffic}_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{Holiday}_t + T_t + w_t + s_i + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

$\text{Traffic}_{i,t}$ 는 요금소  $i$ 에서 시점  $t$ 에 측정된 교통량에 대수를 취한 것이며,  $\text{Holidays}_t$ 는 연휴 더미,  $T_t$ 는 시간 추세,  $w_t$ 와  $s_i$ 는 식 (1)에서와 같이 각각 시간(월, 주)과 요금소 고정 효과를 의미한다.

## V. 분석 결과

### 1. 미세먼지(PM<sub>10</sub>)에 대한 효과

2017년부터 시작한 통행료 무료 정책의 효과를 분석하기 위해 2016년과 2017년 추석 명절 연휴 동안의 PM<sub>10</sub> 변화를 비교 분석하였다. 시간 추세와 고정 효과 적용 유무에 따른 민감도를 보기 위해 <표 4>의 추정모형 (1)과 (2)는 1<sup>st</sup> order 시간 추세를, (3)과 (4)에서는 2<sup>nd</sup> order 시간 추세를 사용하였다. 또한 (1)과 (2), 그리고 (3)과 (4)는 각각 요금소 고정 효과 적용 유무에 따른 결과 차이를 보여 준다.

2016년 명절 연휴 더미를 의미하는 Holiday 변수의 계수 값은 모두 양의 값으로 나타났지만, 통계적으로 유의하지 않았다. 한편, 2017년 Holiday 변수의 계수는 모두 양의 값을 가지며, 모두 1% 신뢰구간에서 유의하였다. 또한 시간 추세의 변화와 고정 효과 유무에 따른 두 개 연도의 계수 값의 변화는 크게 차이가 나지 않아, 본 연구의 기본 추정 모델은 비교적 안정적이라고 볼 수 있다. 본 연구의 기본 추정모형은 <표 4>의 모형 (3)을 따른다.<sup>20)</sup>

2017년의 추정모형 (1)부터 (4)까지 주요 변수(Holiday)의 계수 값에 따르면,

20) 추석 연휴 시작 전후 3일의 PM<sub>10</sub> 농도 변화는 선형보다는 비선형으로 더욱 잘 설명될 수 있어 1<sup>st</sup> order 시간 추세보다 2<sup>nd</sup> order 시간 추세를 사용하였다.

〈표 4〉 추정 결과(종속변수:  $\ln(\text{PM}_{10})$ )

| 연도             | 2016                          |                               |                               |                               |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                | (1)                           | (2)                           | (3)                           | (4)                           |
| Holidays       | .059<br>(.050)                | .044<br>(.059)                | .037<br>(.062)                | .030<br>(.060)                |
| Time Trend     | 1 <sup>st</sup> order         | 1 <sup>st</sup> order         | 2 <sup>nd</sup> order         | 2 <sup>nd</sup> order         |
| 고정 효과          | ×                             | ○                             | ×                             | ○                             |
| 관측치            | 162                           | 162                           | 162                           | 162                           |
| R <sup>2</sup> | .458                          | .664                          | .469                          | .671                          |
| 연도             | 2017                          |                               |                               |                               |
|                | (1)                           | (2)                           | (3)                           | (4)                           |
| Holidays       | .348 <sup>***</sup><br>(.051) | .460 <sup>***</sup><br>(.059) | .341 <sup>***</sup><br>(.049) | .446 <sup>***</sup><br>(.059) |
| Time Trend     | 1 <sup>st</sup> order         | 1 <sup>st</sup> order         | 2 <sup>nd</sup> order         | 2 <sup>nd</sup> order         |
| 고정 효과          | ×                             | ○                             | ×                             | ○                             |
| 관측치            | 162                           | 162                           | 162                           | 162                           |
| R <sup>2</sup> | .137                          | .372                          | .162                          | .381                          |

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준을 나타낸다. ( ) 안의 값은 표준 오차이며, 요금 소 클러스터링 효과를 고려하여 클러스터 표준 오차(clustered standard error)를 사용하였다.

명절 기간 고속도로 통행료 무료 정책은 대기 중  $\text{PM}_{10}$  농도를 최소 40.6%에서 최대 58.4% 증가시키는 것으로 나타났다.<sup>21)</sup> 이는 연도별  $\text{PM}_{10}$  평균 농도(〈표 3〉 참조)를 기준으로 약  $14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $20.14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로  $\text{PM}_{10}$  농도가 증가했음을 의미한다. 따라서 2017년 명절 기간 수도권 남부 고속도로 JC 근처  $\text{PM}_{10}$  농도는 최소  $48.49\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최대  $54.63\mu\text{g}/\text{m}^3$  변화했다는 것이다. 이 수준은 우리나라  $\text{PM}_{10}$  기준을 고려했을 때, ‘보통’ 수준에 해당하는 농도로서 일반인에게 해롭지는 않지만, 민감군(영·유아, 어린이, 임산부, 노인, 호흡기·심혈관 질환자)은 건강 상태에 따라 유의해야 하는 수준이다.<sup>22)</sup>

21) 양적 종속변수에 대한 더미 독립변수의 계수는 해석에 유의해야 한다. 더미변수의 이산적인 변화에 대한 연속적인 양적 변수의 변화량은 회귀모형의 계수가  $\beta$ 일 때  $e^\beta - 1$ 로 해석해야 한다.

22) 서울시 대기환경정보(<https://cleanair.seoul.go.kr/information/info12#emergency-response>)에서 발췌하였다.



RDiT 방법을 연구에 적용하는 경우, 분석 결과의 강건성 확보를 위해 정책의 위약 효과(placebo effect)를 검증하는 것이 필요하다(Hausman and Rapson, 2018). 이를 위해 정책의 시작일로부터 1년 또는 2년 전에 비슷한 효과가 나타났는지 보여 줌으로써 추정모형이 정확하게 정책 효과만을 분석한 것인지 검증한다.<sup>23)</sup> 본 연구에서는 2015년, 2016년 추석 명절을 위약 효과 검증에 사용하였다. 2016년 추석 명절 변수에 대한 계수는 이미 <표 4>에서 모형 (1)부터 (4)까지 각각 0.059, 0.044, 0.037, 0.030으로 보여 주었으며, 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 2015년에 대한 위약 효과는 <표 5>에 제시하였는데, 기본 모형에 대한 추정 계수는 0.096으로 통계적으로 유의하지 않았다. 고정 효과를 적용했을 경우, 계수는 0.016이었으며, 10% 신뢰수준으로 유의하였지만 0.016은 2015년 평균 PM<sub>10</sub> 농도를 기준으로 0.608로 매우 작은 수치여서 무시할만한 수준이다. 따라서 본 연구의 추정 결과는 추석 명절 더미 효과가 아니라 2017년에 시행한 고속도로 통행료 무료 정책의 효과를 보여 준다고 볼 수 있다.

하지만 앞서 기술했듯이 고속도로 통행료 무료 정책은 명절 기간(3일)만 지속되기 때문에 2018년에도 똑같은 정책 효과가 발생했는지 확인하고자 <표 5>에 추정 결과를 제시하였다. 추정 계수는 각각 -0.016, 0.141이었지만, 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 이상에서 통행료 무료 정책이 2017년의 교통량을 PM<sub>10</sub> 농도에 유의한 영향을 줄 만큼 증가시켰지만, 2018년에는 그러지 못하였음을 의

<표 5> 위약 효과 검증(placebo test)(종속변수: ln(PM<sub>10</sub>))

| 연도             | 2015                  |                       | 2018                  |                       |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                | Holidays              | .096<br>(.118)        | .016*<br>(.153)       | -.016<br>(.110)       |
| Time Trend     | 2 <sup>nd</sup> order | 2 <sup>nd</sup> order | 2 <sup>nd</sup> order | 2 <sup>nd</sup> order |
| 고정 효과          | x                     | o                     | x                     | o                     |
| 관측치            | 112                   | 112                   | 173                   | 173                   |
| R <sup>2</sup> | .339                  | .485                  | .020                  | .108                  |

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준을 나타낸다. ( ) 안의 값은 표준 오차이며, 요근소 클러스터링 효과를 고려하여 클러스터 표준 오차를 사용하였다.

23) 보통 강건성 확보를 위해 과거 2개 연도의 결과를 제시한다. 만약 정책이 시행된 2017년의 추정값이 통계적으로 유의하면, 1년 전인 2016년, 2년 전인 2015년의 추정값이 모두 통계적으로 유의하지 않아야 한다. 또한 모든 추정값이 통계적으로 유의하면, 정책의 효과가 아닌 더미 효과로 해석할 수 있다.

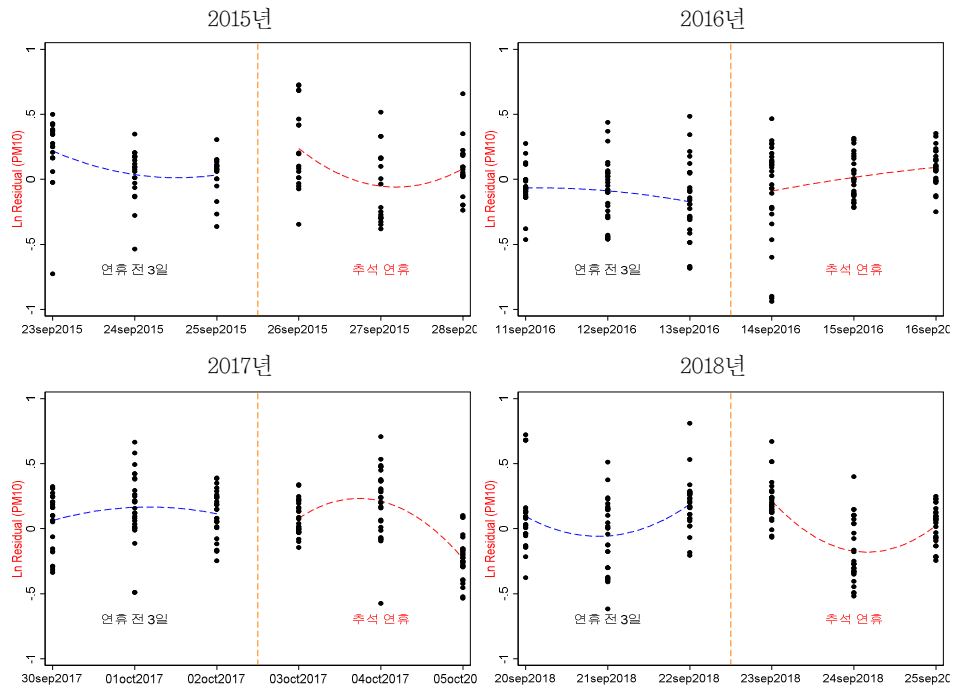
〈표 6〉 연도별 설·추석 연휴 고속도로 일평균 교통량 추이

| 연도   | 설         | 증감률(%) | 추석        | 증감률(%) |
|------|-----------|--------|-----------|--------|
| 2015 | 4,266,574 | 8.8    | 4,602,755 | 6.4    |
| 2016 | 4,184,683 | -1.9   | 4,632,319 | 0.6    |
| 2017 | 4,324,393 | 3.3    | 5,277,106 | 13.9   |
| 2018 | 4,762,158 | 10.1   | 5,216,857 | -1.1   |

주: 이코리아 기사(2020. 9. 22)에서 사용한 한국도로공사 제공 설·추석 연휴 고속도로 일평균 교통량 추이 자료에서 일부 발췌하였으며, 2014년 설과 추석의 교통량은 각각 3,923,225대와 4,326,718대다(<https://www.ekoreanews.co.kr/news/articleView.html?idxno=46234>).

자료: 한국도로공사.

〈그림 8〉 PM<sub>10</sub>의 잔차변동 추이



자료: 저자 작성.

미한다. 〈표 6〉에서 확인할 수 있듯이 2017년 추석 기간 고속도로 일평균 교통량은 전년 대비 13.9% 증가하였으나, 2018년에는 전년 대비 1.1% 감소한 것으로

나타나, 본 연구의 추정 결과의 일정 부분을 설명할 수 있다.

〈그림 7〉은 본 연구에서 추정한 명절 기간 PM<sub>10</sub> 농도의 2<sup>nd</sup> order 시간 추세 변화를 보여 준다. 2017년의 경우에만 추석 당일(연휴 둘째 날) 높은 PM<sub>10</sub> 농도를 보여 통행료 무료 정책이 미세먼지에 부정적인 효과를 유발하고 있음을 알 수 있다.

## 2. 교통량에 미치는 효과

교통량 패널 회귀모형 결과는 〈표 7〉, 〈표 8〉과 같다. 각각의 추정모형은 고정 효과를 적용했으며, 시간 추세 변수의 변화에 따른 추정값의 민감도를 보여 준다.<sup>24)</sup> 2015년 추석 명절 기간 교통량 변화는 시간 추세 변화에 따라 최소 9.4%

〈표 7〉 교통량 추정 결과(정책 시행 전: 2015년, 2016년)

| 연도             | 2015               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                | (1)                | (2)                | (3)                | (4)                | (5)                | (6)                | (7)                |
| Holidays       | -.199***<br>(.056) | -.154***<br>(.043) | -.177***<br>(.044) | -.168***<br>(.044) | -.143***<br>(.046) | -.152***<br>(.040) | -.099***<br>(.033) |
| Time Trend     | ×                  | 1 <sup>st</sup>    | 2 <sup>nd</sup>    | 3 <sup>rd</sup>    | 4 <sup>th</sup>    | 5 <sup>th</sup>    | 6 <sup>th</sup>    |
| 고정 효과          | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  |
| 관측치            | 370                | 370                | 370                | 370                | 370                | 370                | 370                |
| R <sup>2</sup> | .974               | .974               | .975               | .975               | .975               | .976               | .976               |
| 연도             | 2016               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                | (1)                | (2)                | (3)                | (4)                | (5)                | (6)                | (7)                |
| Holidays       | -.097**<br>(.041)  | -.096***<br>(.040) | -.087**<br>(.039)  | .024<br>(.036)     | -.017<br>(.037)    | .011<br>(.033)     | -.067<br>(.040)    |
| Time Trend     | ×                  | 1 <sup>st</sup>    | 2 <sup>nd</sup>    | 3 <sup>rd</sup>    | 4 <sup>th</sup>    | 5 <sup>th</sup>    | 6 <sup>th</sup>    |
| 고정 효과          | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  | ○                  |
| 관측치            | 555                | 555                | 555                | 555                | 555                | 555                | 555                |
| R <sup>2</sup> | .960               | .960               | .960               | .962               | .963               | .963               | .965               |

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준을 나타낸다. ( ) 안의 값은 표준 오차이며, 요  
 금소 클러스터링 효과를 고려하여 클러스터 표준 오차를 사용하였다.  
 자료: 저자 작성.

24) 교통량 모형에서 사용한 시계열은 명절 시작 전·후 10일(총 20일)이며, 시간에 따른 교통량 변화를 설명하기 위해 6<sup>th</sup> order 시간 추세까지의 결과를 보여 주었다.

〈표 8〉 교통량 추정 결과(정책 시행 후: 2017년, 2018년)

| 연도             | 2017                          |                               |                               |                               |                               |                               |                               |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                | (1)                           | (2)                           | (3)                           | (4)                           | (5)                           | (6)                           | (7)                           |
| Holidays       | .114 <sup>***</sup><br>(.023) | .113 <sup>***</sup><br>(.023) | .116 <sup>***</sup><br>(.024) | .135 <sup>***</sup><br>(.025) | .115 <sup>***</sup><br>(.025) | .080 <sup>***</sup><br>(.024) | .142 <sup>***</sup><br>(.030) |
| Time Trend     | ×                             | 1 <sup>st</sup>               | 2 <sup>nd</sup>               | 3 <sup>rd</sup>               | 4 <sup>th</sup>               | 5 <sup>th</sup>               | 6 <sup>th</sup>               |
| 고정 효과          | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             |
| 관측치            | 369                           | 369                           | 369                           | 369                           | 369                           | 369                           | 369                           |
| R <sup>2</sup> | .972                          | .972                          | .972                          | .973                          | .973                          | .973                          | .974                          |
| 연도             | 2018                          |                               |                               |                               |                               |                               |                               |
|                | (1)                           | (2)                           | (3)                           | (4)                           | (5)                           | (6)                           | (7)                           |
| Holidays       | -.017<br>(.030)               | .034<br>(.024)                | .088 <sup>***</sup><br>(.028) | .089 <sup>***</sup><br>(.028) | .098 <sup>***</sup><br>(.029) | .059 <sup>**</sup><br>(.028)  | .051 <sup>*</sup><br>(.029)   |
| Time Trend     | ×                             | 1 <sup>st</sup>               | 2 <sup>nd</sup>               | 3 <sup>rd</sup>               | 4 <sup>th</sup>               | 5 <sup>th</sup>               | 6 <sup>th</sup>               |
| 고정 효과          | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             | ○                             |
| 관측치            | 574                           | 574                           | 574                           | 574                           | 574                           | 574                           | 574                           |
| R <sup>2</sup> | .972                          | .974                          | .975                          | .975                          | .976                          | .976                          | .976                          |

주: \*, \*\*, \*\*\*는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준을 나타낸다. ( ) 안의 값은 표준 오차이며, 요  
금소 클러스터링 효과를 고려하여 클러스터 표준 오차를 사용하였다.

자료: 저자 작성.

에서 최대 18%까지 감소하였으며, 2016년에는 최소 8.3%에서 최대 9.2%까지 감소한 것으로 나타났다.<sup>25)</sup> 한편, 2017년 추석 명절 기간 교통량은 최저 8.3%에서 최고 15.2%까지 증가하였으며, 2018년에는 최소 5.2%에서 최대 10.2% 증가한 것으로 나타났다.

이 결과는 앞서 제시한 2017년도 추석 기간 중 교통량의 증가가 PM<sub>10</sub> 증가의 주요 원인이라는 주장을 뒷받침해 줄 수 있다. 또한 2015년과 2016년 교통량에 대한 명절 연휴 더미의 계수가 음(-)이었지만, 2017년과 2018년의 계수는 양(+)  
인 것으로 보아 명절 기간 고속도로 통행료 무료 정책은 수도권 남부 지역의 고속도로 내 교통량을 증가시켰다고 해석할 수 있다.

25) 모형 (4)부터 (7)까지 명절 더미 계수는 통계적으로 유의하지 않아 해석하지 않았다.

## Ⅵ. 요약 및 정책적 시사점

2017년 9월 20일부터 현재까지 시행되고 있는 고속도로 통행료 무료 정책으로 유발된 수도권 고속도로 진입로의 교통량 증가가 대기질에 미치는 효과를 추석 연휴 기간 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도로 에어코리아의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 자료와 기상청의 기상 관측 자료에 시계열 회귀단절 추정방법을 적용하여 분석하였다.

분석 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 2016년 명절 연휴 더미의 부호는 모두 양(+)으로 통계적으로 유의하지 않았지만, 정책 시행 연도인 2017년 명절 연휴 더미 계수는 모두 양이면서 1% 신뢰구간에서 유의하였다. 또한 2017년 추정모형의 명절 연휴 더미변수의 계수 값에 따르면, 동 정책으로 대기 중 PM<sub>10</sub> 농도를 최저 40.6%에서 최대 58.4%까지 증가시킨 것으로 나타났다. 이는 PM<sub>10</sub> 농도가 약 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 20.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가했음을 의미하고, PM<sub>10</sub> 기준으로 ‘보통’수준에 해당하는 것으로 일반인에게 해롭지는 않지만, 민감군(영·유아, 어린이, 임신부, 노인, 호흡기·심혈관 질환자)은 유의해야 하는 수준이다.

둘째, 추정 결과의 강건성 확보를 위해 정책의 시점으로부터 과거 2개 연도(2015년, 2016년 추석)에 대한 위약 효과를 검증한 결과, 미세먼지 증가는 추석 명절에 대한 더미 효과가 아닌 2017년에 시행한 고속도로 통행료 정책 효과에 기인한 것이라고 볼 수 있다. 하지만 2018년도 추석 명절에 대한 추정 결과는 유의하지 않아 통행료 무료 정책은 2017년 교통량을 PM<sub>10</sub> 농도에 유의한 영향을 줄 만큼 증가시켰지만, 2018년에는 그러지 못했음을 시사한다.

셋째, 교통량 패널 회귀모형 결과 2017년도 추석 기간 중 교통량 증가가 PM<sub>10</sub> 증가의 주요 원인이라는 주장을 뒷받침하고 있다. 또한 2015년과 2016년 교통량에 대한 명절 연휴 더미의 계수가 음(-)이었지만, 2017년과 2018년의 계수는 양(+)인 것으로 나타나 명절 기간 고속도로 통행료 무료 정책은 수도권 남부 지역의 고속도로 내 교통량을 증가시켰다고 해석할 수 있다.

이상의 분석 결과에서 도입 당시의 우려대로 고속도로 통행료 무료 정책이 수도권에 산재한 고속도로 진입지점에서의 교통량 증가를 유발하여 대기질을 악화시켰으며, 동 정책이 국가적인 미세먼지 저감 대책과 괴리되어 있음이 확인되었다고 말할 수 있다. 이는 통행료 면제가 고속도로 이용자의 비용을 절감시켰지만, 환경과 보건 관점에서의 사회적 비용 등이 유발되었음을 의미하며, 공기업인 한국도로공사가 받지 못한 통행료 수입으로 인한 손해와 그로 인한 세금 투입

가능성까지 고려하면 그 비용이 적지 않다고 볼 수 있다. 이미 도입된 통행료 무료 정책을 유료로 환원시킬 수 없는 현실적인 제약을 감안하면, 사회적 관점에서 대책을 수립, 시행하는 것이 바람직할 것이다. 그 방향은 대기질, 특히 미세먼지를 유의미하게 악화시킬 정도의 교통량 집중을 최소화하는 방안으로서, 명절 기간 내 교통량이 특정 시간에 집중되지 않게 효율적으로 분산시키는 것으로 설정하는 것이 적절할 것이다. 구체적으로, 현재 GPS 기반 내비게이션 또는 교통량 조사 시스템 등 IT(information technology)에 기반한 진입시간 차량 2부제(홀짝), 5부제, 10부제 등 적용과 그 준수 차량에 대해 명절 이외 기간에 사용할 수 있는 포인트 또는 장려금(credit) 제공, 교통량이 집중되지 않는 새벽 또는 심야에 이동하는 차량에 할인쿠폰 또는 휴게소에서 사용이 가능한 포인트 또는 장려금 제공, 명절 연휴 1~2일 전에 출발하는 차량에 대한 통행료 감면제도 등과 같은 교통량 분산 방안을 예로 들 수 있을 것이다.<sup>26)</sup>

이상의 논의에서 통행료 면제로 인한 고속도로 통행료 결손액과 미세먼지 발생, 그로 인한 건강 피해 등과 같은 사회적 비용을 종합적으로 비교, 분석할 수 있는 비용-편익 분석에 기반한 사후 평가 작업이 추가적인 연구과제로 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 박상우·홍다희·박근영, “교통부문의 온실가스, 미세먼지 저감대책,” 『이슈페이퍼』 2023-04, 한국교통연구원, 2023, 1~22.
- 빈미영·김채만, 『경기도 승용차요일제 시행 효과분석 및 발전방안 연구』, 정책연구 2009-81, 경기연구원, 2010.
- Auffhammer, M. and R. Kellogg, “Clearing the Air? The Effects of Gasoline Content Regulation on Air Quality,” *American Economic Review*, 101(6), 2011, 2687~2722.
- Bigazzi, A. Y. and M. A. Figliozzi, “Impacts of Freeway Traffic Conditions on In-vehicle Exposure to Ultrafine Particulate Matter,” *Atmospheric Environment*, 60, 2012, 495~503.

26) 다만, 전술한 방안은 실행에 필요한 각종 설비 등에 비용이 소요되고, 이동의 자유를 제한한다는 논란이 제기될 수 있다.

- Calonico, S., M. D. Cattaneo, and M. H. Farrell, “Optimal Bandwidth Choice for Robust Bias-corrected Inference in Regression Discontinuity Designs,” *The Econometrics Journal*, 23(2), 2020, 192~210.
- Davis, L. W., “The Effect of Driving Restrictions on Air Quality in Mexico City,” *Journal of Political Economy*, 116(1), 2008, 38~81.
- Fu, S. and Y. Gu, “Highway Toll and Air Pollution: Evidence from Chinese Cities,” *Journal of environmental Economics and Management*, 83, 2017, 32~49.
- Gelman, A. and G. Imbens, “Why High-order Polynomials should not be Used in Regression Discontinuity Designs,” *Journal of Business & Economic Statistics*, 37(3), 2019, 447~456.
- Gillies, J. A., A. W. Gertler, J. C. Sagebiel, and W. A. Dippel, “On-road Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) Emissions in the Sepulveda Tunnel, Los Angeles, California,” *Environmental Science & Technology*, 35(6), 2001, 1054~1063.
- Hausman, C. and D. S. Rapson, “Regression Discontinuity in Time: Considerations for Empirical Applications,” *Annual Review of Resource Economics*, 10, 2018, 533~552.
- Li, P., Y. Lu, and J. Wang, “The Effects of Fuel Standards on Air Pollution: Evidence from China,” *Journal of Development Economics*, 146, 2020, 102488.
- Lin, M., Y. Chen, D. Lin, B. Hwang, H. Hsu, Y. Cheng, Y. Liu, and P. Tsai, “Effect of Implementing Electronic Toll Collection in Reducing Highway Particulate Matter Pollution,” *Environmental Science & Technology*, 54(15), 2020, 9210~9216.
- OECD, “The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution,” 2016.
- Percoco, M., “Environmental Effects of the London Congestion Charge: A Regression Discontinuity Approach,” Working Paper, 2015.
- Wang, P., R. Zhang, S. Sun, M. Gao, B. Zheng, D. Zhang, Y. Zhang, G. R. Carmichael, and H. Zhang, “Aggravated Air Pollution and Health Burden due to Traffic Congestion in Urban China,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(5), 2023, 2983~2996.

[Abstract]

## The Effects of the Highway Toll-Free Policy on PM<sub>10</sub> Concentration in the Air

Dongkyu Park\* · Byung In Lim\*\*

This study estimates the impact of a highway toll-free policy on the air pollution using the Regression Discontinuity in Time (RDiT) method. PM<sub>10</sub> and the weather data are from both Air Korea and the Open MET Data Portal of the Korea Meteorological Administration (KMA). Several empirical findings are as follows: first, the toll-free policy increased PM<sub>10</sub> concentration from 40.6% to 58.4%, which is found to be a significant level for sensitive groups, i.e., infants, young children, pregnant women, elderly people, etc. Second, a placebo effect to confirm the robustness was tested using one and two years prior to the policy (2015 and 2016 Korean Thanksgiving holidays), respectively, and thus it was confirmed that the negative effect on the air pollution was induced from it. Third, the panel regression model showed that the main reason of PM<sub>10</sub> increase during Korean Thanksgiving holidays in 2017 was the increase in traffic. Based on findings, the highway toll-free policy has proven to cause the increase in traffic and deterioration of the air quality. Therefore, the highway toll-free policy is contrary to the government's fine dust reduction policy. Considering that the air quality pollution may be greater during the Lunar New Year holiday when fine dust flows in from China, an integrated ex-post policy evaluation should be necessary.

**Keywords:** free-toll policy, air pollution, particulate matter(PM<sub>10</sub>), policy effect, regression discontinuity in time(RDiT)

**JEL Classification:** Q, Q5, Q53, Q58

---

\* First Author, POSTECH, Division of Environmental Science and Engineering, Post-doctoral Researcher, Tel: +82-54-279-9509, E-mail: dongkyu@postech.ac.kr

\*\* Corresponding Author, Chungbuk National University, Department of Economics, Professor, Tel: +82-43-261-2216, E-mail: billforest@chungbuk.ac.kr