

대기오염 수준이 교통수단별 통행시간에 미치는 영향 분석[†]

조은정*·김현철**

요약 : 본 논문은 오존과 미세먼지 수준이 도보, 자가용, 버스, 전철의 통행시간에 미치는 영향을 분석한다. 가구통행실태조사 자료와 SUR 모형을 이용하여 분석한 결과, 대기오염 농도가 높아질수록 자가용 통행시간이 증가하고, 버스의 통행시간이 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 대기오염 경보가 발령되면 버스의 통행시간이 증가하는 공익적 행위가 일부 나타나지만, 자가용의 통행시간이 증가하거나 변화가 없고, 전철의 통행시간이 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 경보의 발령으로 제공되는 정보가 배출 저감을 위한 통행행태 변화보다는 오염상황에 의 노출을 줄이는 회피행동에 더 큰 영향을 미쳤음을 시사한다.

주제어 : 자발적 프로그램, 공공 정보, 오존, 미세먼지

JEL 분류 : R4, Q5

접수일(2021년 5월 7일), 수정일(2021년 6월 2일), 게재확정일(2021년 6월 3일)

[†]This work was supported by BK21 FOUR Project.

* 성균관대학교 일반대학원 경제학과 박사과정, 제1저자(e-mail: eunjung.jo@skku.edu)

** 성균관대학교 경제학과 부교수, 교신저자(e-mail: hchkim@skku.edu)

The Impact of Air Quality on Traveling Time by Transportation Mode

Eunjung Jo* and Hyunchul Kim**

ABSTRACT : This paper examines the effects of ambient air pollution by ozone and particulate matter on traveling by mode of transport. We estimate the SUR model of travel time by different modes of transportation using individual level data of travel diaries. We find that, as air pollution levels rises, traveling by privately-owned vehicles increases but traveling by bus decreases. Our results also show that, when an air quality alert is issued, bus traveling increases in an effort to reduce pollution levels, but traveling by own car does not change and traveling by train declines. This suggests that alert programs may not be highly effective in reducing air pollution emissions from vehicles because voluntary switching to public transportation induced by air quality alerts is outweighed by individual effort of avoiding exposure to pollution.

Keywords : Voluntary programs, Public information, Ozone, Particulate matter

Received: May 7, 2021. Revised: June 2, 2021. Accepted: June 3, 2021.

* Ph.D Candidate, Department of Economics, Sungkyunkwan University, First author(e-mail: eunjung.jo@skku.edu)

** Associate Professor, Department of Economics, Sungkyunkwan University, Corresponding author(e-mail: hchkim@skku.edu)

I. 서론

고농도의 대기오염으로 인한 문제가 지속됨에 따라 대기오염 배출 저감에 대한 정책적 관심이 높다. 특히 수송부문에서는 교통혼잡 및 대기오염 등으로 인한 사회적 비용 감소를 위해 교통수요관리(transportation demand management) 방안을 추진하고 있다. 2016년 기준 대기오염물질의 총배출량은 467만 톤이며, 이 중 자동차 운행과 직접 관련이 있는 도로이동오염원의 배출량은 78만 톤(16.7%)으로 가장 큰 비중을 차지하였다.¹⁾ 자동차에서 직접 배출되는 1차 오염물질로는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 있으며, 이러한 물질들이 특정 대기조건하에서 반응하여 2차 오염물질인 오존(O₃), 초미세먼지(PM_{2.5}) 등을 생성시킨다. 따라서 교통수요관리 정책은 개별교통수단의 이용 감소와 대중교통수단의 이용 촉진을 통한 교통량 감축에 주안점을 두고 추진되고 있다.

교통수요관리 정책 중 교통서비스를 공급하여 통행시간을 단축하는 정책의 대중교통 전환 효과가 가장 크지만 교통시설 투자에 많은 비용이 소요된다는 어려움이 있으며, 규제조절 중심의 정책은 교통시설 투자비용은 낮지만 사회적 수용성이 낮아 대중교통 전환 효과가 크지 않다(정도영 외, 2011). 아울러 경제적 유인제도 중 대중교통 무료 정책의 경우 투입 비용 대비 교통량 감축 효과는 크지 않고(Lee, 2020; 기동환·이수기, 2019; 김혜원·이정옥, 2019), 오히려 추가 통행수요를 창출하여 교통량을 증가시킬 수 있다(Sexton, 2012). 한편 규제나 경제적 유인제도와는 달리 시민들의 자발적인 참여를 기반으로 하는 자발적 프로그램(voluntary programs)을 통한 배출가스 저감 정책이 시행되고 있다. 그 대표적인 예가 대기오염 경보제도이며, 대기오염 농도가 높은 시기에 경보를 발령하여 교통수요관리뿐 아니라 사업장의 연료사용량 감축 권고 등을 통해 단기적으로 대기오염 수준을 낮추기 위한 정책이다. 배출가스 저감 측면에서 규제 대비 비용 효율적인 정책수단으로 평가되고 있으나,²⁾ 이에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

1) 국내에서 발생하는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 총부유먼지(TSP), 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 휘발성유기화합물(VOCs), 암모니아(NH₃), 블랙 카본(BC) 배출량을 산정한 수치이다(환경부 국가미세먼지정보센터).

2) 대기오염물질을 생성하는 활동에 영향을 미쳐 배출가스 저감에 기여할 수 있으며, 농도가 높은 시기에만 한시적으로 운영되어 기존의 상시적인 배출가스 규제보다 비용 효율적일 수 있다(Cutter and Neidell, 2009; Noonan, 2014).

우리나라에서는 「대기환경보전법」에 따라 대기 중의 대기오염물질의 농도가 일정 기준 이상일 때 주의보나 경보를 발령하는 대기오염 경보제도가 시행되고 있다. 1995년 서울지역에 오존 경보제가 처음으로 도입되었고, 2015년부터 경보 대상 오염물질에 미세먼지와 초미세먼지가 추가되었다. 경보제의 주요 목적은 고농도의 대기오염 상황에 대처하도록 정보를 제공하고, 대기오염물질을 생성하는 활동을 자제하도록 시민들의 관심과 참여를 유도하는 것이다. 경보가 발령되면 개별교통수단의 이용을 자제하고 대중교통수단의 이용을 독려하는 행동요령 및 조치사항을 전파하지만, 고농도의 대기오염에 대한 노출을 회피하라는 정보도 동시에 전달하므로, 교통량 감축 효과가 나타나지 않을 수도 있다. 즉, 통행자들은 교통수단을 이용할 때 수단 간 대기오염 노출 수준의 차이와 통행 동안의 노출 총량을 고려할 수 있다(Cepeda et al., 2017). 통행자는 대기오염 배출 저감을 위해 대중교통수단을 이용하는 공익적 행위를 할 수 있지만, 개인적인 측면에서는 대기오염에의 노출 수준이 낮은 개별교통수단을 이용함으로써 위험회피적인 행동을 취하거나, 오히려 더 많은 통행을 하는 무임승차자(free rider)로 행동할 수 있다(Cutter and Neidell, 2009; Noonan, 2014; Sexon, 2012).

본 연구와 같이 대기오염 수준에 따른 교통수단의 이용행태 변화를 분석한 연구에서는 농도나 경보가 통행행태에 미치는 영향을 분석하기 위해 교통수단 이용량이나 주행거리 변화 정도를 측정하였다. 기존 연구에서는 집계자료(aggregate data)를 사용하거나 특정 교통수단만을 대상으로 분석하여 단순히 총량적인 통행 변화 여부만을 보고하였다는 한계점이 있다. 즉, 모형설정 과정에서 교통수단의 이용에서 나타나는 통행수단 간의 연관성과 개별 통행자의 인구통계학적 특성을 반영하지 못함으로써 대기오염 수준이 통행 및 이용행태에 미치는 영향을 적절하게 측정하지 못하고 있다. 이에 반해 본 연구는 전국적인 표본을 대상으로 하는 2016년 가구통행실태조사 자료를 사용하여 통행자의 개인 및 가구 특성을 통제하고 도보, 자가용, 버스, 전철의 이용에서 나타나는 교통수단 간 밀접한 상호 연관성을 모형에 반영하기 위해 SUR(seemingly unrelated regression) 모형을 사용한다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있다.

분석 결과, 대기오염 농도와 경보가 통행자의 교통수단별 통행시간에 대체적으로 유의미한 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 전체 표본 분석 결과, 대기오염 농도가 높아질수록 평균적으로 자가용 통행시간이 증가하고, 버스의 통행시간은 감소하는 것으로

나타났다. 그러나 대기오염 경보가 발령되면 버스 통행시간이 증가하고 전철 통행시간이 감소하는 것으로 분석되어 농도와 경보가 통행시간에 미치는 영향에 차이가 있음을 확인하였다. 필수적 통행과 선택적 통행에 대한 계수의 부호와 통계적 유의성이 대체로 유사하고, 필수적 통행보다 선택적 통행에 대한 변화 폭이 더 큰 것으로 추정되었다. 통근통학 통행에서 버스와 전철은 대체관계에 있다고 볼 수 있으나, 통근 통행에서는 두 교통수단 간에 특별한 대체관계를 발견하지 못했고, 전반적으로 대기오염 수준이 미치는 영향력이 적은 것으로 나타났다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. II장에서는 대기오염 경보제도 및 관련 연구를 살펴보고 III장에서는 분석모형 및 데이터를 설명한다. IV장에서는 추정 결과를 제시하고 V장에서는 연구의 결론을 제시한다.

II. 대기오염 경보제도 및 관련 연구

1. 대기오염 경보제도

우리나라는 「대기환경보전법」 제8조의 규정에 따라 대기 중의 대기오염물질의 농도가 일정 기준 이상일 때 해당지역 지자체장이 주의보나 경보를 발령하는 대기오염 경보 제도가 시행되고 있다. 1995년 서울지역에서 오존 경보제가 시행된 이후로 5월에서 9월 까지 대부분의 지자체에서 시행하며, 오존 농도에 따라 주의보, 경보, 중대경보 3단계로 발령한다. 2015년부터는 전국 단위의 미세먼지 및 초미세먼지 경보제가 시행되고 있으며, 주의보와 경보 2단계로 발령한다. 오염물질별 경보 발령의 기준 권역에 차이가 있으며, 농도에 따라 경보단계별 발령 및 해제 기준이 존재한다.³⁾ 예컨대 서울시의 오존 경보 권역은 5개(도심권, 동북권, 동남권, 서북권, 서남권)로 나뉘고, 미세먼지 경보는 서울시를 단일권역으로 발령한다. 경보 발령의 기준 권역과 발령 및 해제 기준의 차이로 인해 외생적 요인인 경보와 객관적인 오염 수준을 나타내는 농도의 관련성이 낮을 수 있어, 경보와 농도가 시민들의 통행행태에 미치는 영향에 차이가 나타날 수 있다.

3) 오존 경보는 1시간 평균농도를 기준으로 하며, 해당지역의 대기자동측정소의 1시간 평균농도가 1개소라도 발령기준을 초과하면 발령할 수 있고, 미세먼지 경보는 해당지역의 대기자동측정소의 PM₁₀ 또는 PM_{2.5}의 권역별 평균 농도가 경보 단계별 발령기준을 초과하면 발령할 수 있다(국가법령정보센터).

경보제의 주요 목적은 첫째, 인체 및 생활환경상의 피해를 최소화하기 위해 오염상황에 대처하도록 정보를 제공하는 것이다. 둘째, 대기오염물질을 생성하는 활동을 자제하도록 시민의 관심과 참여를 유도한다.⁴⁾ 경보가 발령되면 도로 전광판, TV·라디오·신문 등 언론매체, 지자체 홈페이지 등을 통해 시민 행동요령이 전파되며, 이는 요청 또는 권고하는 비구속적 효력만을 갖는다(현준원, 2015).⁵⁾ 경보제는 시민들의 자발적인 참여를 기반으로 하는 자발적 프로그램(voluntary programs)이다. 규제에 비해 강제성이 낮고 직접적인 경제적 유인을 제공하지 않아 정책의 효과성이 명확하게 규명되지 않았으나, 농도가 높은 시기에만 한시적으로 운영되어 기존의 상시적인 배출가스 규제보다 비용 효율적일 수 있다(Cutter and Neidell, 2009; Noonan, 2014).

통행자들은 교통수단을 이용할 때 수단 간 대기오염 노출 수준의 차이와 통행 동안의 노출 총량을 고려할 수 있다(Cepeda et al., 2017). 통행자는 이타주의(altruism) 등의 이유로 대기오염 수준이 높은 시기에 대기오염 배출 저감을 위해 대중교통수단을 이용하는 공익적 행위를 할 수 있으나, 개인적인 측면에서는 대기오염에의 노출 수준이 낮은 개별교통수단을 이용함으로써 위험회피적인 행동을 취하거나, 오히려 교통량 감소로 인한 혜택을 누리고자 더 많은 통행을 하는 무임승차자(free rider)로 행동할 수 있다(Cutter and Neidell, 2009; Noonan, 2014; Sexon, 2012).

2. 선행연구

대기오염과 관련한 기존 연구는 대기오염과 질환 발병과의 연관성, 위험회피행동으로 인한 야외활동의 수요 변화와 교통수단의 이용행태 변화로 구분된다.

대기오염에의 노출은 호흡기 질환, 심혈관 질환 등을 유발하고, 증상을 악화시킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있다(Neidell, 2009; Jun and Min, 2019; 이승복, 2019; 최종일·이영수, 2015). 또한 임신 기간, 신생아의 체중 및 성장지연, 유아사망률에 영향을 끼친

4) 차량 관련 행동요령 및 조치사항은 다음과 같다. 오존주의보(경보): 경보 지역 내 차량 운행 자제(요청) 및 대중교통 이용 권고, 불필요한 자동차를 사용하지 않도록 자제 권고, 미세먼지 주의보(경보): 행정기관 관용차량 운행 감축(제한), 자동차 운행 자제(제한) 및 대중교통 이용 권장, 주정차 시 공회전 금지(에어코리아).

5) 오존 중대경보의 경우에는 경보지역 내 주민의 실외활동 금지요청, 자동차의 통행금지 및 사업장의 조업시간 단축명령 등의 조치를 취할 수 있고, 명령받은 자는 정당한 사유가 없으면 따라야 하지만(국가법령정보센터), 지금까지 중대경보는 발령된 적이 없다.

다(Altindag et al., 2017; Currie et al., 2009).

대기오염으로 인한 인체 건강 위해성은 익히 알려진 사실로 개인의 오염 민감도와 성별과 같은 개인 특성은 대기오염에의 노출 수준을 변화시키는 요인이 될 수 있다. Bresnahan et al.(1997)은 오존 농도가 대기환경기준인 12 pphm을 초과할 경우 야외활동 시간이 감소하며, 오염 민감도의 대리변수(proxy)로 스모그 관련 질환의 경험 유무를 사용하여 스모그 관련 질환을 경험한 적이 있는 사람의 대기오염 회피확률이 더 높음을 보였다. 서미숙(2015)은 미세먼지의 농도에 대한 반응이 성별에 따라 차이가 있으며, 남성의 경우에는 통계적으로 유의하지 않으나 여성의 경우에는 농도 증가 시 취업자의 노동시간과 비취업자의 여가시간이 감소한다고 분석하였다. 엄영숙·오형나(2019)는 미세먼지 농도가 회피행동에 직접적인 영향을 미치지 않지만, 개인의 주관적 위험인지 수준에 영향을 미침으로써 야외활동을 줄이는 개인의 회피행동을 유발할 수 있음을 시사했다.

대기오염 경보도 개인의 야외활동 수요에 영향을 미치는 요인으로 작용할 수 있다. Altindag et al.(2017)은 미세먼지의 농도가 높을수록 임신기간과 신생아의 체중이 평균적으로 감소하며, 주의보·경보의 발령은 산모의 야외활동 시간을 감소시킴으로써 임신기간과 신생아의 체중에 끼치는 부정적인 영향을 완화한다고 보았다. Neidell(2009), Zivin and Neidell(2009) 그리고 Noonan(2014)은 회귀불연속설계(regression discontinuity design)를 이용하여 스모그 경보 발령일과 비발령일의 방문객 수를 비교하였다. Neidell(2009)과 Zivin and Neidell(2009)은 경보 발령일에 외부에서 보내는 시간을 줄임으로써 회피행동을 한다고 하였다. Noonan(2014)은 경보 발령일에 전체 표본의 공원 방문객 수에 유의한 차이가 없으나, 민감군인 노인과 조깅하는 방문객 수가 감소함을 보였다. Saberian et al.(2017)은 호주 시드니에서 대기질 경보 발령일에 자전거 이용횟수가 14~35% 감소함을 보여 경보가 격렬한 야외활동에 영향을 끼침을 밝혔다.

본 연구와 같이 대기오염 수준에 따른 교통수단의 이용행태 변화를 분석한 연구에서는 농도나 경보가 통행행태에 미치는 영향을 분석하기 위해 교통수단 이용량이나 주행거리 변화 정도를 측정하였다. Rosenberg(2017)는 AQI(Air Quality Index)가 시카고 지역의 대중교통 이용객 수에 어떠한 영향을 미치는지를 회귀모형으로 분석하였다. 그 결과, AQI가 상승하면 버스 이용객이 증가하고, 전철 이용객이 감소하는 것으로 나타났다.

기동환·이수기(2019)는 국내의 스마트카드 데이터를 바탕으로 초미세먼지 농도가 지하철 이용객 수에 미치는 영향을 회귀분석을 통해 추정하였으며, 초미세먼지 농도가 증가할수록 지하철 이용객이 감소함을 보였다. Chung et al.(2019)은 국내의 미세먼지 농도와 도보 통행량의 관계를 공간회귀모형(spatial regression model)을 사용하여 분석하였다. 통행량에 대한 미세먼지 탄력성은 음(-)인 것으로 나타났으며, 공간분석 단위별 탄력성이 서울시 단위, 셀(30 m × 30 m) 단위보다 구 단위에서 더 크고, 미세먼지 농도의 탄력성은 ‘ 좋음’, ‘보통’일 때보다 ‘나쁨’일 때 더 큰 것으로 분석되었다.

경보제에 초점을 둔 연구에서는 정책적 실효성 측면에서 교통량이 감소하거나 대중교통수단의 이용량이 증가하여 대기환경 개선효과가 있는지에 관심을 가졌다. Welch et al.(2005)은 미국 시카고 지역의 OAD(Ozone Action Day)의 효과를 고정효과모형(fixed effects model)을 사용하여 분석하였다. 경보의 발령이 전철의 이용객 수에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않으나, 시간대별 탑승 패턴을 변화시킨다고 보고하였다. 샌프란시스코 베이 지역에서도 대기오염 경보제인 STA(Spare the Air) 프로그램이 시행되었다. 초기에는 경보를 발령하여 자동차 이용을 자제하도록 유도하였으나 2004년부터는 경보 발령과 함께 경보 발령일에 대중교통 무료라는 경제적 유인을 제공하여 자가용에서 대중교통으로의 수단 대체를 촉진하고자 하였다. Cutter and Neidell(2009)은 초기 STA 프로그램의 효과를 분석하였고, 경보 발령일에 교통량이 2.5~3.5% 감소하지만 전철의 이용객 수에는 영향을 미치지 않는 것으로 추정되었다. Sexton(2012)은 STA 프로그램의 효과를 분석하기 위해 경보 발령과 대중교통 무료 정책의 효과를 구분하여 추정하였고, 경제적 유인의 제공으로 개별교통수단과 전철의 추가 수요가 창출되었다고 보고하였다. 반면에 Noonan(2014)은 애틀랜타 지역의 경보 발령일에 가구 주행거리 변화가 나타나는지를 분석하였으나 Cutter and Neidell(2009)의 분석 결과와 다르게 유의미한 변화가 나타나지 않았다. 이러한 차이는 샌프란시스코 베이 지역과 애틀랜타 지역의 교통체계의 차이에 기인한 것일 수 있다고 언급하였다. Cummings and Walker(2000)는 교통량 전망치 대비 경보 발령일에 실제 교통량을 비교하였으나 경보제의 유의한 영향을 발견하지 못했다. Henry and Gordon(2003)은 경보 발령 시 통행자들이 통행거리를 줄이는 것으로 나타났으며, 공공부문 종사자의 경우 경보 발령일에 통행횟수와 거리를 감소시키지만, 비공공부문 종사자는 거의 차이가 없는 것으로 분석되었다.

이상의 연구들에서는 집계자료(aggregate data)를 사용하거나 특정 교통수단만을 대상으로 분석하여 단순히 총량적인 통행 변화 여부만을 보고하였다는 한계점이 있다. 즉, 모형설정 과정에서 교통수단의 이용에서 나타나는 통행수단 간의 연관성과 개별 통행자의 인구통계학적 특성을 반영하지 못함으로써 대기오염 수준이 통행 및 이용행태에 미치는 영향을 적절하게 측정하지 못하고 있다. 한편 대기오염 수준에 대한 반응은 분석 대상 국가의 대기오염 수준, 대중교통체계와 분석기간에 따라 다른 영향력이 나타날 수 있으므로, 국내의 통행을 대상으로 하는 실증적인 분석이 필요하다. Chung et al. (2019) 과 기동환·이수기(2019)는 국내를 대상으로 각각 미세먼지와 초미세먼지 농도가 도보 통행량, 지하철 이용객 수에 미치는 영향을 분석하였다. 이들 연구 역시 앞서 언급한 바와 같이 집계자료의 사용으로 인한 한계점이 있으며, 통행행태에 영향을 미치는 경보의 영향력을 통제하지 못하고, 분석 대상 지역을 서울시로 한정하였다는 데에 한계가 있다. 이에 반해 본 연구는 전국적인 표본을 대상으로 하는 2016년 가구통행실태조사 자료를 사용하여 통행자의 개인 및 가구 특성을 통제하고 도보, 자가용, 버스, 전철의 이용에서 나타나는 교통수단 간 밀접한 상호 연관성을 모형에 반영하기 위해 SUR(seemingly unrelated regression) 모형을 사용한다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있다. 특히 통행시간에 영향을 미치는 농도와 경보의 효과를 분리하여 추정하는 연구는 국내에서는 거의 전무하다는 것이 본 연구가 기여하는 바이다.

III. 분석 모형 및 자료

1. 분석 모형

본 연구는 대기오염 수준이 도보, 자가용, 버스, 전철의 통행시간에 미치는 영향을 추정하기 위해 SUR(seemingly unrelated regression) 모형을 사용한다(Zellner, 1962). 교통수단의 이용에서는 상호 연관성이 존재하기 때문에, 특정 교통수단의 이용은 다른 교통수단의 이용 수준에 영향을 미칠 수 있다. 이를 확인하기 위해 추정식의 오차항 간의 상관관계가 독립이라는 귀무가설을 검정하는 Breusch-Pagan 검정을 수행하였고, 1% 수준에서 유의하게 기각됨을 확인하였다. 설명변수 이외의 생략된 요인들이 포함된 추

정식의 오차항 간에 동시적 상관(contemporaneous correlation)이 존재한다는 의미이며, SUR 모형을 사용하여 OLS(ordinary least squares) 모형보다 효율적인 추정량을 도출한다. SUR 모형에서는 한 개체에 대해 복수의 선형 회귀식이 연립방정식(system of equation)으로 주어지며, 각 선형 회귀식들의 오차항들간의 상관관계로 인하여 서로 다른 선형 회귀식의 종속변수들이 서로 관련되어 있다. SUR 모형을 적용하는 대표적인 예로 여러 상품에 대한 개별 소비자의 수요를 회귀식으로 추정하는 모형을 들 수 있다. 각 상품의 수요식에서 설명변수들은 외생적인 데 반해 오차항들이 서로 상관관계를 가지고 있는 경우이다. 이처럼 연립방정식으로 주어진 선형 회귀식의 오차항들이 상관관계를 가지고 있을 때, 개별 회귀식을 분리하여 OLS로 추정(equation-by-equation OLS)하는 것에 비하여 SUR 모형을 사용하는 경우에 더욱 효율적인 추정량(more efficient estimator)을 얻어 통계적 추론 및 가설 검정의 정확성을 높일 수 있다.

본 연구의 분석 모형을 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} \text{transport}_{it}^m &= \alpha^m + A_{it}^m \beta^m + X_{it}^m \gamma^m + Z_i^m \delta^m + \theta_t^m + \lambda_{c(i)}^m + \epsilon_{it}^m \\ m &= \{walk, car, bus, train\} \end{aligned} \quad (1)$$

transport_{it}^m 는 통행자 i 가 t 기에 교통수단 m 을 이용하여 이동한 통행시간을 나타낸다. $walk$ 는 도보, car 는 자가용(승용차, 승합차, 트럭), bus 는 버스(시내버스, 마을버스, 시외버스, 광역버스), $train$ 은 전철(전철·지하철, 경전철)을 의미한다. A_{it} 는 오존 및 미세먼지 농도 변수, 경보 더미변수의 벡터이고, X_{it} 는 기상요소인 강수량, 월평균 기온 초과, 월평균 기온 미만, 습도, 풍속 변수와 통행거리 변수의 벡터이다. 또한 Z_i 는 연령, 성별, 직업, 주5일 이상 근무 여부, 전일제 근무 여부, 운전면허 보유 여부, 가구소득, 5세 미만 가구원수, 차량 보유 여부와 같은 개인 및 가구의 특성 변수들의 벡터이다. θ_t 는 월, 요일, 공휴일 더미변수이고, $\lambda_{c(i)}$ 는 통행자의 거주지에 해당하는 시군구 더미변수, ϵ_i 는 오차항을 의미한다.

2. 자료

본 연구에서 사용한 주요 자료는 국가교통DB에서 제공하는 2016년 가구통행실태조사이다.⁶⁾ 가구통행실태조사는 통행자의 이동에 대한 특성을 파악하기 위한 교통조사로 도서지역을 제외한 전국 17개 광역시도의 만 5세 이상 가구를 대상으로 하며, 표본에 포함된 가구는 523,989명이다. 개인 및 가구의 인구통계학적 특성 이외에도 개인의 통행특성인 최초 출발지, 환승지 및 최종 목적지, 통행목적, 이용 교통수단, 출발시간, 도착시간 등의 정보가 포함된 통행일지(trip diary) 자료이다.

대기오염물질의 농도와 주의보·경보 발령 내역은 한국환경공단에서 운영하는 에어코리아(Air Korea) 자료를 사용하였다. 에어코리아는 국내의 환경기준이 설정된 대기오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , CO)의 대기오염도 정보를 제공하고 있다. 2016년에는 전국에 323개의 측정소에서 대기오염 농도가 측정되었고, 이 중에 232개의 도시대기 측정소에서 측정된 일평균 값을 사용하였다.

기상요소는 오존과 미세먼지의 농도에 영향을 미칠 뿐만 아니라 개인의 교통수단 이용과 같은 개인의 행태에 직접적인 영향을 미친다(Kang et al., 2019; Khattak and De Palma, 1997; Liu et al., 2015). 분석에서 이러한 영향들을 통제하기 위해 기상청의 기상자료개발포털의 종관관측자료인 강수량, 기온, 습도, 풍속의 일평균 값을 사용하였다. 기온이 통행행태에 미치는 영향은 평균기온 대비 높거나 낮은 정도에 따라 달라질 수 있어 기온 변수를 평균기온 초과(HOT) 변수와 평균기온 미만(COLD) 변수로 구분하여 사용하였다.⁷⁾

가구통행실태조사 자료에서는 통행자가 통행 시에 이용한 교통수단별 출발지, 환승지, 도착지의 위치를 행정동(법정동) 단위까지 제공하고 있다. 농도와 기상요소는 측정 위치에 따라 편차가 크게 나타남을 고려하여 각 법정동의 지리중심점과의 직선거리가 가장 짧은 곳에 위치한 측정소의 일평균 관측치를 연결하여 사용하였다. 통행 동안에 통행자는 여러 행정동을 거치고, 다양한 농도와 기상요소에 노출된다. 이를 고려하기 위해

6) 가구통행실태조사는 「국가통합교통체계효율화법」에 의거하여 1998년부터 5년마다 정기적으로 실시하는 전국 여객기종점통행량조사의 일환으로 수행되고 있으며, 4차 조사는 통계청의 인구 센서스 자료를 활용하기 위해 2016년에 수행되었다.

7) $HOT = \max(0, \text{기온} - \text{월평균기온})$, $COLD = \max(0, \text{월평균기온} - \text{기온})$

각 통행자가 거쳐간 행정동의 농도와 기상요소의 일평균을 산술평균하여 사용하였으며, 통행자가 거쳐간 시군구 중 한곳에서라도 주의보나 경보가 발령된 경우에 경보 더미 변수에 1의 값을 부여하였다. 통행거리는 출발지와 도착지의 중심점 간의 직선거리를 계산하고, 통행자의 수단통행별 직선거리를 합산하여 사용하였다.

분석 대상의 연령은 주체적으로 교통수단의 이용을 결정할 가능성이 높은 14~80세로 하였다. 많은 통행을 하는 직종에 해당하는 운수업무와 방문업무 종사자 표본과 통행일자, 직업, 소득 변수에 결측치가 있는 표본, 출발지, 환승지, 도착지의 행정동 코드가 결측치이거나 행정동 단위로 기입되어 있지 않은 표본, 도보, 자가용, 버스, 전철 이외의 교통수단(기타 버스, 고속버스, 고속철도, 일반철도, 택시, 자전거, 오토바이, 항공, 선박, 기타)을 이용한 표본을 제외하였다. 최종 분석에 사용된 변수들의 기초통계량을 <표 1>에 제시하였다.

<표 1> 기초통계량

변수명		관측치수	평균	중앙값	표준편차	최솟값	최댓값	
대기오염	O ₃ 농도(ppb)	372,921	31.55	32.16	15.83	1.88	75.44	
	PM ₁₀ 농도(µg/m ³)	372,910	51.63	47.28	18.69	9.00	145.04	
	O ₃ 경보	381,495	0.03	0	0.17	0	1	
	PM ₁₀ 경보	381,495	0.00	0	0.02	0	1	
특성	소득	100만 원 미만	381,495	0.10	0	0.30	0	1
		100-200만 원 미만	381,495	0.14	0	0.35	0	1
		200-300만 원 미만	381,495	0.21	0	0.41	0	1
		300-500만 원 미만	381,495	0.36	0	0.48	0	1
		500-1,000만 원 미만	381,495	0.18	0	0.38	0	1
		1,000만 원 이상	381,495	0.02	0	0.13	0	1
	5세 미만 가구원수	381,495	0.13	0	0.41	0	5	
	차량 보유 여부	381,495	0.79	1	0.40	0	1	
	운전면허증 보유 여부	381,495	0.64	1	0.48	0	1	
	연령(세)	381,495	46.79	47	17.45	14	80	
	성별(남성=1)	381,495	0.49	0	0.50	0	1	

〈표 1〉 기초통계량 (계속)

변수명		관측 치수	평균	중앙값	표준 편차	최솟값	최댓값	
특성	통행거리(km)	381,495	12.37	5.08	25.20	0.00	3,558.06	
	주5일 이상 근무 여부	381,495	0.57	1	0.49	0	1	
	전일제 근무 여부	381,495	0.54	1	0.50	0	1	
	재택근무 여부	381,495	0.00	0	0.07	0	1	
	직업	학생·전업주부·무직	381,495	0.39	0	0.49	0	1
		전문직	381,495	0.04	0	0.19	0	1
		서비스·판매직	381,495	0.21	0	0.41	0	1
		관리·사무직	381,495	0.19	0	0.39	0	1
		농림어업 숙련직	381,495	0.07	0	0.25	0	1
		기능·장치기계조작· 단순노무직	381,495	0.10	0	0.30	0	1
기상 요소	강수량(mm)	381,172	0.15	0.00	0.53	0.00	9.67	
	월평균 기온 초과(°C)	381,172	2.17	1.69	2.06	0	7.68	
	월평균 기온 미만(°C)	381,172	1.13	0	2.51	0	13.05	
	풍속(m/s)	381,172	1.84	1.65	0.73	0.26	8.74	
	습도(%)	381,172	55.76	52.64	14.05	26.40	97.60	

본 연구의 종속변수는 <표 2>와 같이 도보, 자가용(승용차, 승합차, 트럭), 버스(시내 버스, 마을버스, 시외버스, 광역버스), 전철(전철·지하철, 경전철)로 분류하여 각 그룹에 해당하는 교통수단 이용시간을 합산하여 사용하였다. 교통수단을 네 개의 그룹으로 나눈 이유는 대기오염 경보제가 자가용을 대중교통으로 전환하기 위한 목적이 있기 때문에, 대기오염 수준이 교통수단별 이용시간에 미치는 영향을 구분해 추정하기 위함이다. 버스와 전철은 대중교통이라는 점에서 동일하지만, 교통의 상호 배타적인 특성인 이동성과 접근성 측면에서 차이가 있다.⁸⁾

8) 버스는 대다수 지역에 정거장과 버스노선이 위치하여 전철보다 접근성이 높으나 이동속도가 느려 이동성이 낮고, 전철은 접근성이 낮으나 이동성이 높은 특성을 가진다(윤종진·우명제, 2015).

〈표 2〉 통행시간 기초통계량

(단위: 분)

변수명	비중 (%)	관측 치수	평균	중앙값	표준 편차	최솟값	최댓값	
전체 통행	도보	26.6	381,495	22.53	20	23.65	0	465
	자가용	26.9	381,495	22.77	0	37.90	0	671
	버스	38.7	381,495	32.81	0	71.81	0	1,000
	전철	7.8	381,495	6.60	0	24.42	0	763
필수적 통행	도보	29.2	265,263	10.09	8	12.09	0	250
	자가용	37.9	265,263	13.09	0	20.84	0	510
	버스	21.5	265,263	7.44	0	16.35	0	323
	전철	11.3	265,263	3.92	0	13.72	0	400
선택적 통행	도보	25.7	367,681	15.44	10	18.45	0	465
	자가용	22.5	367,681	13.49	0	24.73	0	661
	버스	45.7	367,681	27.44	0	60.06	0	1,000
	전철	6.1	367,681	3.68	0	14.69	0	325
통근통학 통행	자가용	60.5	115,137	17.13	15	17.80	0	120
	버스	26.5	115,137	7.50	0	14.18	0	120
	전철	13.0	115,137	3.67	0	11.62	0	120
통근 통행	자가용	66.2	99,360	18.98	20	17.93	0	120
	버스	21.0	99,360	6.02	0	13.09	0	120
	전철	12.8	99,360	3.68	0	11.59	0	120
수도권 지역 통행	도보	26.4	212,714	26.57	25	24.94	0	465
	자가용	22.0	212,714	22.13	0	39.14	0	487
	버스	41.5	212,714	41.70	0	79.43	0	880
	전철	10.0	212,714	10.09	0	29.87	0	385
비수도권 지역 통행	도보	27.8	157,698	17.12	12	20.40	0	400
	자가용	37.0	157,698	22.81	0	33.61	0	671
	버스	32.7	157,698	20.12	0	56.25	0	1,000
	전철	2.5	157,698	1.52	0	10.24	0	400

주: 전체 통행(14~80세)을 필수적 통행과 선택적 통행으로 구분함. 필수적 통행에는 출근, 등교, 귀사, 업무, 학원수업이 포함됨. 선택적 통행에는 누군가를 태우거나 내려주려고, 귀가, 쇼핑, 여가/운동/관광/레저, 외식, 친지 방문, 기타가 포함됨. 통근통학(14~80세)에는 출근과 등교가 포함되며, 통근(20~70세)에는 출근만 포함됨.

IV. 분석 결과

본 연구는 대기오염 농도와 경보가 도보, 자가용, 버스, 전철 통행시간에 미치는 영향을 분석하였다. 통행자들이 대기오염 수준에 반응하여 통행 자체를 줄이거나, 노출 수준이 낮은 교통수단으로 대체하는 효과가 있다면, 기존의 연구들에서 언급된 바와 같이 대기오염 위험에 대한 대응행동으로 회피행동이 나타난다고 볼 수 있다. 전체 표본 이외에도 분석 대상에 따라 차이가 발생하는지를 확인하기 위해 필수적/선택적 통행 표본, 통근통학/통근 통행 표본 그리고 수도권/비수도권의 통행 표본을 구분하여 분석하였다.

<표 3>은 전체 표본의 분석 결과이다.⁹⁾ 핵심변수인 농도와 경보발령 더미변수의 포함 여부에 따라 세 가지 모형으로 구분하였다. 각 모형에서 농도와 경보발령 회귀계수의 부호와 통계적 유의성이 일관되고 통제변수들에 대한 추정 결과가 유사한 수준으로 나타나, 모든 변수가 포함된 모형 (3)의 결과를 중심으로 논의를 진행한다.¹⁰⁾ 분석 결과, 대기오염 수준이 교통수단별 통행시간에 미치는 유의미한 영향을 확인하였으며, 그 효과는 농도 및 경보, 대기오염물질에 따라 차이가 있음을 나타낸다.

통행자들은 농도가 높아질수록 상대적으로 대기오염에의 노출 가능성이 낮은 자가용 통행시간을 증가시키고, 대중교통(버스, 전철) 통행시간을 감소시키는 것으로 나타났다. 특히 도보 통행은 연계교통수단을 이용하기 위해 필수적으로 수반되는 통행이고 외부환경에 완전히 노출되기 때문에,¹¹⁾ 통행자들이 대기오염 위험에 대한 회피행동을 하는지를 가늠하는 기준이 될 수 있다. 즉, 대기오염 농도가 높아질수록 노출 수준이 가장 높은 도보 통행시간이 큰 폭으로 감소한다면, 통행자들은 오염물질에의 노출을 피해 도보 통행을 줄이는 회피행동이 있다고 보는 것이며, 이는 연계교통수단의 통행에도 영향

9) 나머지 변수들의 추정 결과는 <부록 표 1>, <부록 표 2>, <부록 표 3> 참고.

10) 앞서 ‘대기오염 경보제도’에서 언급한 바와 같이 경보 발령의 기준 권역과 발령 및 해제 기준의 차이로 인해 외생적 요인인 경보와 객관적인 오염 수준을 나타내는 농도의 영향력에 차이가 있을 수 있음을 고려하여 모형 (3)을 통해 농도와 경보가 시민들의 통행행태에 미치는 영향을 구분하여 추정하였다. 실제로 Pearson 상관분석 결과, 오존 농도와 오존 경보의 상관관계는 1% 유의 수준에서 0.1874이며, 미세먼지 농도와 미세먼지 경보의 상관관계는 유의하지 않고 0.0015인 것으로 나타났다.

11) 도보 통행은 단거리를 이동하기 위한 목적의 단독통행이거나 대중교통수단과 보완관계에 있는 것으로 추측된다. 각 교통수단의 단독통행 비율은 도보 34%, 자가용 32.6%, 버스 2.3%, 전철 0.3% 순으로 도보 통행의 비중이 가장 높으며, 교통수단별 통행시간의 상관관계 분석에서 도보와 자가용은 음(-)의 상관관계, 도보와 대중교통(버스, 전철)과는 양(+)의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

을 미칠 것이다. 도보 추정식에서 오존 농도와 경보의 계수가 음(-)인 것으로 분석되어 오존에 대한 회피행동이 나타난다고 볼 수 있다. 미세먼지 농도의 계수가 양(+)이고, 미세먼지 경보가 통계적으로 유의하지 않아 회피행동이 나타나지 않는다고 해석할 수 있지만, 이러한 해석을 하기에는 다소 무리가 있다. 도보 통행은 다른 교통수단과 달리 단독통행이 가능한 수단으로 단거리를 이동하기 위한 목적의 단독통행의 경우에 대기오염 수준에 대해 신경을 쓰지 않거나, 통행을 줄이기 어려울 가능성이 있다. 아울러 도보 통행은 시간당 이동성이 낮는데, 미세먼지 계수의 크기가 작아 도보 통행이 증가하는 효과는 아주 미미한 수준이고 미세먼지 경보 계수는 유의하지 않지만 음(-)의 값을 보인다.¹²⁾ 미세먼지 농도가 높을수록 전철 통행이 늘어나는 것으로 나타났으나 도보 통행과 유사하게 그 효과는 미미한 수준이다.

경보 발령의 효과는 회피행동으로 인한 효과뿐만 아니라 대기질 개선을 위해 노력하라는 정보에 대한 효과가 혼재되어 나타날 것이다. 통행자는 위험회피를 위해 자가용을 이용하는 고배출 행위를 하거나, 이타심 등의 이유로 자가용 운행 자제 및 대중교통을 이용하는 저배출 행위를 한다. 경보 발령 시 도보 통행시간 감소, 자가용 통행시간 증가, 전철 통행시간 감소는 회피행동에 의한 것으로 보인다. 반면에 오존과 미세먼지 경보 발령 시 버스의 통행시간이 증가하고, 미세먼지 경보가 자가용 통행시간을 늘리지 않는 이유는 대기질 개선 노력을 유도하기 위한 목적으로 제공되는 정보에 기인한 것으로 해석할 수 있다.

통행자 중 일부는 경보에 대응하여 대중교통의 이용을 늘리는 저배출 행위를 하고자 하며, 그중에서도 상대적으로 대기오염 노출 정도가 낮은 버스의 통행시간을 늘렸을 가능성이 있다.¹³⁾ 버스는 전철보다 이동성이 낮아 총통행시간이 길어 대기오염에의 노출 총량이 많을 수 있으나, 접근성이 높아 버스의 이용에 수반되는 도보 통행거리가 짧고 노선이 다양하여 환승을 최소화한다는 측면에서는 노출량이 적다. 아울러 미세먼지 농도

12) 대기오염물질 중 미세먼지보다 지표오존에 대한 인식 수준이 낮을 수 있음을 고려하여 강건성 검증 차원으로 <표 3>에서 오존 농도 및 경보를 제외하고 분석한 결과를 <부록 표 4>에 제시하였다. 분석 결과는 유사하며, 도보 추정식에서 미세먼지 농도 변수의 통계적 유의성이 사라진다는 차이가 있다. 결과적으로 미세먼지 농도가 도보 통행시간에 미치는 영향력은 아주 미미한 수준이거나 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

13) 교통수단의 주변환경에 대한 불확실성으로 일반화하기에는 어려움이 있으나, 강남 및 강북지역에서 교통수단으로 이동하는 동안 측정된 미세먼지의 평균 농도는 지하철, 자동차, 버스, 자전거 순으로 높은 것으로 나타났다(이용일 외, 2018).

가 높아질수록 전철 통행시간이 증가하지만, 미세먼지 경보가 발령되면 전철 통행시간이 감소하는 이유도 농도에 대한 한계효과와는 다르게 고농도의 미세먼지 발생에 대응하여 노출을 줄이는 방향으로 통행행태를 변화시켜 전철 통행시간을 줄이고 버스의 통행시간을 늘렸을 수 있다.

〈표 3〉 전체 표본 분석결과

구분	도보	자가용	버스	전철
	모형 (1)			
O ₃ 농도	-0.039*** (0.006)	0.045*** (0.009)	-0.081*** (0.019)	-0.039*** (0.006)
PM ₁₀ 농도	0.007** (0.003)	0.011*** (0.004)	-0.016* (0.009)	0.020*** (0.003)
조정된 R ²	0.172	0.297	0.105	0.134
표본수	371,053			
모형 (2)				
O ₃ 경보	-3.262*** (0.258)	2.858*** (0.378)	3.499*** (0.811)	-1.141*** (0.271)
PM ₁₀ 경보	0.066 (1.637)	-1.793 (2.402)	22.141*** (5.153)	-5.665*** (1.721)
조정된 R ²	0.171	0.295	0.106	0.137
표본수	381,172			
모형 (3)				
O ₃ 농도	-0.028*** (0.006)	0.036*** (0.009)	-0.098*** (0.019)	-0.035*** (0.006)
PM ₁₀ 농도	0.011*** (0.003)	0.009** (0.004)	-0.022** (0.009)	0.021*** (0.003)
O ₃ 경보	-3.017*** (0.263)	2.390*** (0.386)	4.621*** (0.827)	-1.025*** (0.274)
PM ₁₀ 경보	-0.057 (1.633)	-2.440 (2.396)	23.951*** (5.128)	-5.610*** (1.699)
조정된 R ²	0.172	0.297	0.105	0.134
표본수	371,053			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임. 공통적으로 포함된 변수는 개인 및 가구 특성(소득 더미, 통행거리, 연령, 성별 더미, 주 5일 이상 근무 더미, 전일제 근무 더미, 재택근무 더미, 직업 더미), 기상요소(강수량, 월평균 기온 초과, 월평균 기온 미만, 풍속, 습도), 월 더미, 요일 더미, 공휴일 더미, 시군구 더미임. 자가용 추정식에는 차량 보유 더미, 5세 미만 가구원수, 버스와 전철 추정식에는 운전면허 보유 더미가 포함됨.

경보 발령 시 차량 관련 조치사항 중 행정기관 관용차량 운행감축 제한(비상용차량 제외), 자동차 운행 제한(부제 운행 등), 주정차 시 공회전 금지는 미세먼지 경보에만 해당되는 내용이다. 이러한 조치가 자가용 통행시간을 감소시켜 회피행동으로 인한 자가용의 통행시간 증가 효과를 상쇄시켰을 수 있다. 특히 행정기관의 관용차량의 경우 업무 목적으로 사용되기 때문에, 필수적 통행에서 자가용 통행이 감소하였을 것이다. 비록 전체 표본과 선택적 통행 표본에서는 통계적으로 유의하지 않지만, 미세먼지 경보 계수의 부호가 음(-)이고, 필수적 통행 표본에서는 유의미하게 감소하는 것으로 나타났다 <표 4>.

그 외에 통제변수로 사용한 인구통계학적 특성과 기상변수 대부분이 예상된 부호를 가지고 통계적으로 유의한 것으로 추정되었다(<부록 표 1>~<부록 표 3> 참고). 소득이 높을수록 자가용 통행시간이 증가하고, 도보와 버스 통행시간이 감소하는 것으로 나타났다. 학생·전업주부·무직 대비 전문직, 관리·사무직, 기능·장치기계조작·단순노무직, 서비스·판매직, 농림어업 종사자 순으로 자가용 통행시간이 긴 것으로 나타났다. 그리고 남성, 주 5일 근무자, 전일제 근무자와 연령이 높을수록, 5세 미만 가구원 수가 많을수록 자가용 통행시간이 긴 것으로 나타났다. 운전면허 보유자가 비보유자 대비 버스 통행시간이 6.2분 짧고, 전철 통행시간이 1.9분 긴 것으로 나타나, 운전이 가능한 통행자는 대중교통 중 전철을 더 많이 이용함을 알 수 있다. 월평균 기온보다 기온이 높아지거나 낮아질수록 도보 통행시간이 감소함을 보여준다. 월평균 기온보다 기온이 높을수록 버스 통행시간이 증가하고 전철의 통행시간이 감소하지만, 월평균 기온보다 기온이 낮을수록 버스 통행시간이 감소하고 전철의 통행시간이 증가하는 것으로 나타났다. 이렇듯 교통수단별 통행시간에 영향을 미치는 요인들을 통제함으로써 대기오염 수준이 통행시간에 미치는 영향을 적절하게 추정하였다.

다음의 <표 4>는 대기오염 수준이 통행시간에 미치는 영향이 통행목적별로 다르게 나타날 수 있음을 고려하여 추정한 결과이다.¹⁴⁾ 여가 등을 목적으로 하는 선택적 통행(discretionary trips)은 필수적 통행(mandatory trips)보다 일정의 취소나 변경이 용이할

14) 가구통행실태조사의 통행목적은 토대로 필수적 통행과 선택적 통행으로 구분하였다. 필수적 통행에는 출근, 등교, 업무 후 직장으로 돌아감(귀사), 직업 관련(업무), 학원수업이 포함되고, 선택적 통행에는 누군가를 태우거나 내려주려고, 집으로 돌아가려고(귀가), 물건을 사려고(쇼핑), 여가/운동/관광/레저, 외식, 친지 방문, 기타(종교 및 개인용무 등)가 포함된다.

<표 4> 필수적/선택적 통행 표본 분석결과

	필수적 통행				선택적 통행			
	도보	자가용	버스	전철	도보	자가용	버스	전철
O ₃ 농도	-0.016*** (0.004)	0.027*** (0.006)	-0.022*** (0.005)	-0.022*** (0.004)	-0.022*** (0.004)	0.018*** (0.006)	-0.085*** (0.016)	-0.019*** (0.004)
PM ₁₀ 농도	0.004** (0.002)	0.002 (0.003)	-0.007*** (0.003)	0.010*** (0.002)	0.010*** (0.002)	0.004 (0.003)	-0.017** (0.008)	0.015*** (0.002)
O ₃ 경보	-1.326*** (0.157)	0.679*** (0.260)	0.942*** (0.222)	-0.485*** (0.185)	-2.152*** (0.197)	1.796*** (0.267)	3.754*** (0.701)	-0.718*** (0.170)
PM ₁₀ 경보	0.520 (1.006)	-3.366** (1.660)	5.280*** (1.422)	-2.793** (1.183)	-1.226 (1.220)	-0.005 (1.651)	19.960*** (4.333)	-3.465*** (1.052)
조정된 R ²	0.200	0.258	0.123	0.140	0.245	0.225	0.099	0.113
표본수	265,263				367,681			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임. 공통적으로 포함된 변수는 개인 및 가구특성(소득 더미, 통행거리, 연령, 성별 더미, 주 5일 이상 근무 더미, 전일제 근무 더미, 재택근무 더미, 직업 더미), 기상요소(강수량, 월평균 기온 초과, 월평균 기온 미만, 풍속, 습도), 월 더미, 요일 더미, 공휴일 더미, 시군구 더미임. 자가용 추정식에는 차량 보유 더미, 5세 미만 가구원수, bus와 전철 추정식에는 운전면허 보유 더미가 포함됨. 필수적 통행에는 출근, 등교, 귀사, 업무, 학원수업이 포함됨. 선택적 통행에는 누군가를 태우거나 내려주려고, 귀가, 쇼핑, 여가/운동/관광/레저, 외식, 친지방문, 기타가 포함됨.

수 있다(Cutter and Neidell, 2009). 분석 결과, 필수적 통행과 선택적 통행에 대한 계수의 부호와 통계적 유의성이 대체로 유사한 것으로 나타났다. 예상한 바와 같이 대체적으로 필수적 통행보다 선택적 통행에 대한 변화 폭이 더욱 크게 나타나 통행자들은 대기오염 수준에 반응하여 선택적 통행에서 통행시간을 더 크게 변화시킴을 알 수 있다.

필수적 통행 중 통근이나 통학은 규칙적이고 반복적으로 이루어지는 필수 불가결한 통행으로 대기오염 수준에 따른 교통수단 간 통행시간의 변화가 나타난다면 수단 간에 대체관계가 있다고 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해서 <표 5>와 같이 오전 첨두시간대(7~9시)의 통근통학과 통근 통행 표본을 분석하였다.¹⁵⁾ 분석 결과, 통근통학 통행에서 bus와 전철에 대한 부호가 반대인 것으로 추정되어 bus와 전철이 서로 대체관계에 있

15) 도보 통행은 이동성 측면에서 자가용, bus, 전철과 대체관계에 있다고 보기 어려워 분석에서 제외하였다. 오존은 대기 중의 질소산화물(NO_x)과 휘발성유기화합물(VOCs)이 자외선과 광화학 반응을 일으켜서 생성되기 때문에, 오존 농도는 오후 시간대에 높고 오전 시간대에 낮은 특징을 보인다. 따라서 7~9시에 오존 경보가 발령되지 않아 미세먼지 농도와 경보만을 대상으로 분석하였다.

〈표 5〉 통근통학/통근 통행 표본 분석결과

	통근통학 통행			통근 통행		
	자가용	버스	전철	자가용	버스	전철
PM ₁₀ 농도	0.0002 (0.003)	-0.006** (0.002)	0.005** (0.002)	0.001 (0.003)	-0.006** (0.002)	0.003 (0.002)
PM ₁₀ 경보	-0.740 (1.979)	4.554*** (1.665)	-3.898*** (1.374)	1.149 (2.392)	2.181 (1.858)	-4.077** (1.602)
조정된 R ²	0.251	0.179	0.168	0.219	0.133	0.179
표본수	115,137			99,360		

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임. 공통적으로 포함된 변수는 개인 및 가구 특성(소득 더미, 통행거리, 연령, 성별 더미, 주 5일 이상 근무 더미, 전일제 근무 더미, 직업 더미), 기상 요소(강수량, 월평균 기온 초과, 월평균 기온 미만, 풍속, 습도), 월 더미, 요일 더미, 시군구 더미임. 자가용 추정식에는 차량 보유 더미, 5세 미만 가구원수, 버스와 전철 추정식에는 운전면허 보유 더미가 포함됨. 통근통학(14~80세)에는 출근과 등교가 포함되며, 통근(20~70세)에는 출근만 포함됨.

는 것으로 해석할 수 있으나, 통근 통행에서는 두 교통수단 사이에 특별한 대체관계를 발견하지 못했고, 전반적으로 대기오염 수준이 미치는 영향력이 적은 것으로 나타났다. 경보제는 교통량 감축을 위해 자가용에서 대중교통으로 수단 전환을 유도하기 위한 목적이 있으므로 정책의 효과성 측면에서 자가용의 통행시간이 감소하여야 하나, 두 표본 모두에서 경보의 발령이 자가용의 통행시간에 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않고 농도에 대한 반응도 없는 것으로 나타났다.¹⁶⁾ 이는 통근과 통학 통행의 규칙적이고 반복적인 특징으로 인해 외부환경적 변화에 민감하게 반응하지 않기 때문일 수 있다. 출발지에서 회사 또는 학교까지의 대중교통체계의 발달 정도, 이동수단으로써 자가용과 대중교통의 고유한 특성 차이 등의 이유로 대기오염 수준에 대응하여 자가용에서 대중교통으로 수단을 대체하기보다는 대중교통이라는 점에서 비교적 유사한 특성을 가지는 버스와 전철 사이에서 대체가 나타난다고 볼 수 있다.

<표 6>은 수도권/비수도권 지역의 통행 표본을 분석한 결과이다.¹⁷⁾ 수도권과 비수도

16) 지난 2018년 서울시에서 초미세먼지 감축을 위해 비상저감조치와 함께 시행한 출퇴근 시간 대중교통 무료 정책의 교통량 감소 효과가 크지 않았다는 평가결과와 유사하다. 대중교통 이용객 수는 증가하였으나(지하철 3.5~5.8%, 시내버스 4~9.4%), 교통량은 0.3~1.7% 감소하는 데 그쳤다(김혜원·이정욱, 2019).

17) 비수도권 지역에는 서울시, 인천시 및 경기도를 제외한 나머지 지역이 포함된다. 전체 비수도권 지역 중 도시철도가 구축된 지역을 구분하여 분석해보았으나, 전체 비수도권 지역의 추정 결과와 크게 다르지 않았고 일부 통계적 유의성에서만 약간의 차이가 있었다. 도시철도가 구축되지 않은 지역의 경우에는 미세먼지 경보발령 관측치 부재로 인하여 분석하지 못하였다.

권은 교통 인프라의 차이가 존재하기 때문에,¹⁸⁾ 대기오염 수준에 대한 반응이 다를 수 있다. 오존 농도가 증가함에 따라 자가용 통행시간이 증가하는 회피행동이 수도권 지역에서만 나타났다. 미세먼지 농도가 증가하는 경우, 수도권에서는 자가용 및 전철 통행시간을 늘리지만, 비수도권에서는 자가용 통행시간이 증가하고 전철 통행시간이 감소하였다. 경보에 대해서는 비수도권 지역에서는 배출가스 저감을 위해 자가용 이용을 줄이고 버스 이용을 늘리는 공익적 행위가 나타나는 데 반해, 수도권 지역에서는 자가용 이용을 늘리고 전철 이용을 줄이는 회피행동이 두드러지게 나타났다.

〈표 6〉 수도권/비수도권 지역의 통행 표본 분석결과

	수도권 지역의 통행				비수도권 지역의 통행			
	도보	자가용	버스	전철	도보	자가용	버스	전철
O ₃ 농도	-0.059*** (0.010)	0.135*** (0.014)	-0.126*** (0.032)	-0.098*** (0.011)	-0.009 (0.008)	-0.028** (0.011)	-0.019 (0.022)	0.009** (0.004)
PM ₁₀ 농도	0.012*** (0.004)	0.028*** (0.006)	-0.062*** (0.014)	0.010* (0.005)	-0.010** (0.005)	0.023*** (0.007)	-0.017 (0.013)	-0.009*** (0.002)
O ₃ 경보	-4.487*** (0.413)	5.107*** (0.590)	-1.023 (1.333)	-2.630*** (0.471)	-1.326*** (0.339)	-0.509 (0.497)	8.827*** (0.962)	-0.585*** (0.177)
PM ₁₀ 경보	-15.633 (23.331)	74.085** (33.356)	-81.307 (75.331)	-49.286* (26.647)	0.308 (1.527)	-4.502** (2.241)	15.126*** (4.334)	-2.528*** (0.795)
조정된 R ²	0.129	0.265	0.101	0.205	0.167	0.335	0.115	0.103
표본수	212,714				157,698			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임. 공통적으로 포함된 변수는 개인 및 가구특성(소득 더미, 통행거리, 연령, 성별 더미, 주 5일 이상 근무 더미, 전일제 근무 더미, 재택근무 더미, 직업 더미), 기상요소(강수량, 월평균 기온 초과, 월평균 기온 미만, 풍속, 습도), 월 더미, 요일 더미, 공휴일 더미, 시군구 더미임. 자가용 추정식에는 차량 보유 더미, 5세 미만 가구원수, bus와 전철 추정식에는 운전면허 보유 더미가 포함됨. 수도권 지역에는 서울시, 인천시 및 경기도가 포함되고 비수도권 지역에는 수도권을 제외한 나머지 지역이 포함됨.

18) 수도권 지역의 대중교통체계가 잘 구축되어 있고, 대중교통수단의 수송분담률이 높은 수준이다. 그러나 지방의 중소도시에서는 도시철도가 구축되지 못하였고, 지방 광역시의 경우에도 부산은 대중교통수단의 수송분담률이 높아 승용차와 비슷한 수준이나, 인천, 대구, 대전, 광주 등은 도시철도가 있음에도 불구하고 버스와 연계가 원활하지 않아 대중교통수단의 수송분담률이 승용차보다 낮다(김영호 외, 2013).

V. 결론

본 연구는 대기오염 수준이 도보, 자가용, 버스, 전철 통행시간에 미치는 영향을 SUR 모형을 통해 분석하였다. 분석 결과, 대기오염 농도와 경보가 통행자의 교통수단별 통행시간에 대체적으로 유의미한 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 전체 표본에서는 대기오염 농도가 높아질수록 평균적으로 자가용 통행시간이 증가하고, 버스의 통행시간은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 대기오염 경보가 발령되면 버스 통행시간이 증가하고 전철 통행시간이 감소하는 것으로 분석되어 농도와 경보가 통행시간에 미치는 영향에 차이가 있음을 확인하였다. 필수적 통행과 선택적 통행에 대한 계수의 부호와 통계적 유의성이 대체로 유사하고, 필수적 통행보다 선택적 통행에 대한 변화폭이 큰 것으로 추정되었다. 통근통학 통행에서 버스와 전철은 대체관계에 있다고 볼 수 있으나, 통근 통행에서는 두 교통수단 사이에 특별한 대체관계를 발견하지 못했다. 또한 자가용의 경우에는 농도나 경보가 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 통근과 통학 통행의 규칙적이고 반복적인 특징으로 인해 외부환경적 변화에 민감하게 반응하지 않기 때문일 수 있다. 비수도권 지역에서는 자가용의 이용을 줄이거나 버스의 이용을 늘리는 공익적 행위가 나타나는 데 반해, 수도권 지역에서는 자가용의 이용을 늘리는 회피행동이 두드러지게 나타나는 것으로 분석되었다.

결론적으로 대기오염 경보의 발령은 교통수요관리 측면에서의 교통량 감축 효과는 크지 않다고 볼 수 있다. 대중교통 중 버스의 통행시간이 증가하여 공익적 행위가 일부 나타났으나, 자가용의 통행시간이 증가하거나 변화가 없으며 전철의 통행시간이 증가하지 않는 것으로 분석되었다. 이는 경보의 발령으로 제공되는 정보가 배출 저감을 위한 통행행태 변화보다는 오염상황에의 노출을 줄이는 회피행동에 더 큰 영향을 미쳤음을 시사한다.

[References]

- 기동환·이수기, “초미세먼지 농도와 지하철 이용량의 관계분석과 미세먼지 대응정책의 실효성 평가”, 「국토계획」, 제54권 제4호, 2019, pp. 79~93.
- 김영호·정경옥·김상곤, 『국내외 주요 도시의 도로교통 인프라 이용특성 비교 분석』, 한국교통연구원, 2013.
- 김혜원·이정옥, “미세먼지 저감을 위한 서울시의 대중교통 무료 운행 정책은 왜 실패했는가?: 정치적 관리의 관점을 중심으로”, 「지방정부연구」, 제22권 제4호, 2019, pp. 99~125.
- 서미숙, “미세먼지 농도가 경제활동시간에 미치는 영향”, 「여성경제연구」, 제12권 제1호, 2015, pp. 75~100.
- 염영숙·오형나, “미세먼지 건강위험과 회피행동: 야외여가활동수요 감소를 사례로”, 「경제학연구」, 제67권 제2호, 2019, pp. 39~70.
- 윤종진·우명제, “서울시 대중교통 접근성의 공간적 정의에 대한 실증연구”, 「국토계획」, 제50권 제4호, 2015, pp. 69~85.
- 이승복, “미세먼지가 인체에 미치는 영향에 관한 연구 동향”, BRIC View 동향리포트, 2019-T26, 2019.
- 이용일·정원석·황도연·김태성·박덕신, “서울지역 교통수단별 이동시간과 호흡량을 고려한 미세먼지 흡입량 추정에 관한 연구”, 「한국입자 에어로졸학회지」, 제14권 제4호, 2018, pp. 97~105.
- 정도영·윤장호·박상우·김주영, “교통부문 온실가스 배출량 저감을 위한 교통수요관리 방안 전략 연구”, 「대한교통학회지」, 제29권 제1호, 2011, pp. 29~38.
- 최종일·이영수, “초미세먼지(PM2.5) 배출량이 호흡기계 질환에 미치는 영향 연구”, 「환경정책」, 제23권 제4호, 2015, pp. 155~172.
- 현준원, 『미세먼지오염 저감을 위한 대기관리법제 개선방안 연구』, 한국법제연구원, 2015.
- Altindag, D. T., D. Baek, and N. Mocan, “Chinese yellow dust and Korean infant health,” *Social Science & Medicine*, Vol. 186, 2017, pp. 78~86.
- Bresnahan, B. W., M. Dickie, and S. Gerking, “Averting behavior and urban air pollution,” *Land Economics*, 1997, pp. 340~357.
- Cepeda, M., J. Schoufour, R. Freak-Poli, C. M. Koolhaas, K. Dhana, W. M. Brammer, and O. H. Franco, “Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic

- review,” *The Lancet Public Health*, Vol. 2, No. 1, 2017, pp. e23~e34.
- Chung, J., S. N. Kim, and H. Kim, “The Impact of PM₁₀ Levels on Pedestrian Volume: Findings from Streets in Seoul, South Korea,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, No. 23, 2019, 4833p.
- Cummings, R. G., and M. B. Walker, “Measuring the effectiveness of voluntary emission reduction programmes,” *Applied Economics*, Vol. 32, No. 13, 2000, pp. 1719~1726.
- Currie, J., M. Neidell, and J. F. Schmieder, “Air pollution and infant health: Lessons from New Jersey,” *Journal of Health Economics*, Vol. 28, No. 3, 2009, pp. 688~703.
- Cutter, W. B., and M. Neidell, “Voluntary information programs and environmental regulation: Evidence from Spare the Air,” *Journal of Environmental Economics and management*, Vol. 58, No. 3, 2009, pp. 253~265.
- Henry, G. T., and C. S. Gordon, “Driving less for better air: Impacts of a public information campaign,” *Journal of Policy Analysis and Management*, Vol. 22, No. 1, 2003, pp. 45~63.
- Jun, T., and I. S. Min, “Air pollution, respiratory illness and behavioral adaptation: Evidence from South Korea,” *PloS one*, Vol. 14, No. 8, 2019, e0221098.
- Kang, H., H. Suh, and J. Yu, “Does air pollution affect consumption behavior? Evidence from Korean retail sales,” *Asian Economic Journal*, Vol. 33, No. 3, 2019, pp. 235~251.
- Khattak, A. J., and A. De Palma, “The impact of adverse weather conditions on the propensity to change travel decisions: a survey of Brussels commuters,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 31, No. 3, 1997, pp. 181~203.
- Lee, J., *Estimating price elasticities of travel mode choices*, Master’s thesis, Sungkyunkwan University, Seoul, 2020.
- Liu, C., Y. O. Susilo, and A. Karlström, “The influence of weather characteristics variability on individual’s travel mode choice in different seasons and regions in Sweden,” *Transport Policy*, Vol. 41, 2015, pp. 147~158.
- Neidell, M., “Information, avoidance behavior, and health the effect of ozone on asthma hospitalizations,” *Journal of Human resources*, Vol. 44, No. 2, 2009, pp. 450~478.
- Noonan, D. S., “Smoggy with a Chance of Altruism: The Effects of Ozone Alerts on Outdoor Recreation and Driving in Atlanta,” *Policy Studies Journal*, Vol. 42, No. 1, 2014, pp. 122~145.

- Rosenberg, N. R., “The EPA's Air Quality Index, and Public Transportation Usage in the Chicago Metro Region,” *Journal of Environmental and Resource Economics at Colby*, Vol. 4, No. 1, 2017, 5p.
- Saberian, S., A. Heyes, and N. Rivers, “Alerts work! Air quality warnings and cycling,” *Resource and Energy Economics*, Vol. 49, 2017, pp. 165~185.
- Sexton, S. E., “Paying for pollution? How general equilibrium effects undermine the “Spare the Air” program,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 53, No. 4, 2012, pp. 553~575.
- Welch, E., X. Gu, and L. Kramer, “The effects of ozone action day public advisories on train ridership in Chicago,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 10, No. 6, 2005, pp. 445~458.
- Zellner, A., “An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias,” *Journal of the American statistical Association*, Vol. 57, No. 298, 1962, pp. 348~368.
- Zivin, J. G., and M. Neidell, “Days of haze: Environmental information disclosure and intertemporal avoidance behavior,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 58, No. 2, 2009, pp. 119~128.

[부록]

〈부록 표 1〉 전체 표본 분석결과: 모형 (1)

구분	도보	자가용	버스	전철
O ₃ 농도	-0.039*** (0.006)	0.045*** (0.009)	-0.081*** (0.019)	-0.039*** (0.006)
PM ₁₀ 농도	0.007** (0.003)	0.011*** (0.004)	-0.016* (0.009)	0.020*** (0.003)
통행거리	-0.049*** (0.001)	0.508*** (0.002)	0.471*** (0.005)	0.240*** (0.002)
소득 2구간	-3.642*** (0.153)	1.213*** (0.229)	-3.987*** (0.482)	-1.461*** (0.160)
소득 3구간	-7.055*** (0.150)	4.453*** (0.233)	-10.533*** (0.477)	-2.784*** (0.158)
소득 4구간	-8.415*** (0.146)	5.893*** (0.233)	-12.711*** (0.465)	-3.194*** (0.154)
소득 5구간	-8.743*** (0.161)	6.459*** (0.256)	-12.933*** (0.512)	-2.073*** (0.170)
소득 6구간	-9.755*** (0.312)	8.640*** (0.469)	-15.179*** (0.983)	-1.956*** (0.326)
가구원수 (5세 미만)		0.851*** (0.107)		
차량 보유		9.622*** (0.132)		
운전면허 보유			-6.251*** (0.261)	1.869*** (0.088)
연령	-0.111*** (0.002)	0.229*** (0.003)	-0.743*** (0.007)	-0.116*** (0.002)
성별	-3.997*** (0.076)	10.069*** (0.111)	-6.582*** (0.242)	-1.108*** (0.080)
주 5일 이상 근무	-0.727*** (0.205)	1.771*** (0.301)	-1.900*** (0.645)	-0.387* (0.214)
전일제 근무	-1.980*** (0.153)	1.991*** (0.225)	0.904* (0.481)	-0.043 (0.160)
재택근무	-2.293*** (0.545)	7.294*** (0.799)	-9.657*** (1.710)	-2.182*** (0.566)
전문직	-10.435*** (0.280)	18.290*** (0.411)	-1.437 (0.884)	-0.246 (0.293)
서비스·판매직	-6.229*** (0.227)	8.771*** (0.333)	-0.814 (0.714)	-0.936*** (0.237)
관리·사무직	-7.967*** (0.236)	15.784*** (0.347)	4.347*** (0.747)	2.437*** (0.247)
농림어업	-1.429*** (0.256)	3.441*** (0.376)	-0.960 (0.804)	2.055*** (0.266)
기능·장치 기계조작· 단순노무직	-7.367*** (0.233)	12.777*** (0.343)	5.801*** (0.735)	-1.033*** (0.244)
강수량	0.015 (0.094)	0.203 (0.138)	-1.734*** (0.296)	1.087*** (0.098)
월평균 기온 초과	-0.154*** (0.033)	-0.050 (0.048)	0.903*** (0.103)	-0.136*** (0.034)
월평균 기온 미만	-0.220*** (0.023)	0.101*** (0.034)	-0.511*** (0.073)	0.131*** (0.024)
풍속	0.067 (0.084)	-0.919*** (0.123)	0.789*** (0.263)	-0.383*** (0.087)
습도	-0.010* (0.005)	-0.047*** (0.008)	0.083*** (0.016)	-0.071*** (0.005)
상수항	34.902*** (7.094)	-21.653** (10.409)	65.083*** (22.273)	15.315** (7.380)
조정된 R ²	0.172	0.297	0.105	0.134
표본수	371,053			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임.

〈부록 표 2〉 전체 표본 분석결과: 모형 (2)

구분	도보	자가용	버스	전철
O ₃ 경보	-3.262*** (0.258)	2.858*** (0.378)	3.499*** (0.811)	-1.141*** (0.271)
PM ₁₀ 경보	0.066 (1.637)	-1.793 (2.402)	22.141*** (5.153)	-5.665*** (1.721)
통행거리	-0.048*** (0.001)	0.505*** (0.002)	0.476*** (0.004)	0.248*** (0.001)
소득 2구간	-3.716*** (0.151)	1.286*** (0.226)	-4.040*** (0.477)	-1.448*** (0.159)
소득 3구간	-7.098*** (0.148)	4.508*** (0.230)	-10.454*** (0.472)	-2.765*** (0.158)
소득 4구간	-8.439*** (0.144)	5.912*** (0.230)	-12.654*** (0.461)	-3.193*** (0.154)
소득 5구간	-8.726*** (0.159)	6.446*** (0.253)	-12.939*** (0.507)	-2.052*** (0.169)
소득 6구간	-9.679*** (0.308)	8.711*** (0.463)	-15.084*** (0.974)	-2.157*** (0.325)
가구원수 (5세 미만)		0.880*** (0.105)		
차량 보유		9.630*** (0.130)		
운전면허 보유			-6.244*** (0.259)	1.888*** (0.088)
연령	-0.110*** (0.002)	0.231*** (0.003)	-0.742*** (0.007)	-0.119*** (0.002)
성별	-3.981*** (0.075)	10.052*** (0.110)	-6.584*** (0.240)	-1.138*** (0.080)
주 5일 이상 근무	-0.766*** (0.203)	1.740*** (0.297)	-1.925*** (0.638)	-0.360* (0.213)
전일제 근무	-1.926*** (0.152)	1.952*** (0.223)	0.981** (0.479)	-0.027 (0.160)
재택근무	-2.250*** (0.537)	7.540*** (0.787)	-10.077*** (1.690)	-2.285*** (0.564)
전문직	-10.465*** (0.277)	18.435*** (0.406)	-1.669* (0.875)	-0.392 (0.292)
서비스·판매직	-6.265*** (0.224)	8.844*** (0.328)	-1.191* (0.707)	-1.074*** (0.236)
관리·사무직	-7.980*** (0.233)	15.784*** (0.342)	4.098*** (0.739)	2.293*** (0.247)
농림어업	-1.426*** (0.253)	3.381*** (0.371)	-1.250 (0.796)	2.011*** (0.266)
기능·장치 기계조작· 단순노무직	-7.323*** (0.230)	12.801*** (0.338)	5.479*** (0.728)	-1.132*** (0.243)
강수량	-0.048 (0.089)	0.098 (0.130)	-1.483*** (0.280)	0.870*** (0.093)
월평균 기온 초과	-0.156*** (0.032)	-0.059 (0.048)	0.845*** (0.102)	-0.131*** (0.034)
월평균 기온 미만	-0.231*** (0.022)	0.115*** (0.033)	-0.608*** (0.070)	0.107*** (0.023)
풍속	-0.058 (0.079)	-0.812*** (0.116)	0.634** (0.250)	-0.532*** (0.083)
습도	-0.003 (0.004)	-0.031*** (0.006)	0.045*** (0.014)	-0.057*** (0.005)
상수향	35.485*** (7.110)	-21.713** (10.428)	67.207*** (22.376)	16.032** (7.471)
조정된 R ²	0.171	0.295	0.106	0.137
표본수	381,172			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임.

〈부록 표 3〉 전체 표본 분석결과: 모형 (3)

구분	도보	자가용	버스	전철
O ₃ 농도	-0.028*** (0.006)	0.036*** (0.009)	-0.098*** (0.019)	-0.035*** (0.006)
PM ₁₀ 농도	0.011*** (0.003)	0.009** (0.004)	-0.022** (0.009)	0.021*** (0.003)
O ₃ 경보	-3.017*** (0.263)	2.390*** (0.386)	4.621*** (0.827)	-1.025*** (0.274)
PM ₁₀ 경보	-0.057 (1.633)	-2.440 (2.396)	23.951*** (5.128)	-5.610*** (1.699)
통행거리	-0.048*** (0.001)	0.507*** (0.002)	0.470*** (0.005)	0.240*** (0.002)
소득 2구간	-3.644*** (0.153)	1.213*** (0.229)	-3.986*** (0.482)	-1.461*** (0.160)
소득 3구간	-7.055*** (0.150)	4.453*** (0.233)	-10.549*** (0.477)	-2.781*** (0.158)
소득 4구간	-8.412*** (0.146)	5.891*** (0.233)	-12.740*** (0.465)	-3.189*** (0.154)
소득 5구간	-8.745*** (0.161)	6.461*** (0.256)	-12.950*** (0.512)	-2.071*** (0.170)
소득 6구간	-9.790*** (0.312)	8.667*** (0.469)	-15.136*** (0.983)	-1.967*** (0.326)
가구원수 (5세 미만)		0.854*** (0.107)		
차량 보유		9.623*** (0.132)		
운전면허 보유			-6.215*** (0.261)	1.866*** (0.088)
연령	-0.111*** (0.002)	0.229*** (0.003)	-0.743*** (0.007)	-0.116*** (0.002)
성별	-3.995*** (0.076)	10.068*** (0.111)	-6.590*** (0.242)	-1.107*** (0.080)
주 5일 이상 근무	-0.731*** (0.205)	1.774*** (0.301)	-1.899*** (0.645)	-0.387* (0.214)
전일제 근무	-1.967*** (0.153)	1.980*** (0.225)	0.886* (0.481)	-0.039 (0.160)
재택근무	-2.271*** (0.544)	7.276*** (0.799)	-9.678*** (1.709)	-2.177*** (0.566)
전문직	-10.444*** (0.280)	18.296*** (0.411)	-1.426 (0.884)	-0.250 (0.293)
서비스·판매직	-6.237*** (0.227)	8.777*** (0.332)	-0.807 (0.714)	-0.938*** (0.237)
관리·사무직	-7.973*** (0.236)	15.788*** (0.347)	4.348*** (0.747)	2.435*** (0.247)
농림어업	-1.442*** (0.256)	3.452*** (0.376)	-0.945 (0.804)	2.051*** (0.266)
기능·장치 기계조작· 단순노무직	-7.367*** (0.233)	12.777*** (0.342)	5.791*** (0.735)	-1.032*** (0.244)
강수량	0.017 (0.094)	0.199 (0.139)	-1.709*** (0.296)	1.082*** (0.098)
월평균 기온 초과	-0.128*** (0.033)	-0.068 (0.048)	0.843*** (0.104)	-0.123*** (0.034)
월평균 기온 미만	-0.214*** (0.023)	0.096*** (0.034)	-0.518*** (0.073)	0.133*** (0.024)
풍속	0.057 (0.084)	-0.912*** (0.123)	0.821*** (0.263)	-0.390*** (0.087)
습도	-0.009* (0.005)	-0.048*** (0.008)	0.084*** (0.016)	-0.072*** (0.005)
상수향	34.575*** (7.093)	-21.385** (10.408)	65.500*** (22.272)	15.224** (7.380)
조정된 R ²	0.172	0.297	0.105	0.134
표본수	371,053			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임.

〈부록 표 4〉 전체 표본 분석결과: 미세먼지

구분	도보	자가용	버스	전철
	모형 (1)			
PM ₁₀ 농도	0.003 (0.003)	0.015*** (0.004)	-0.025*** (0.009)	0.017*** (0.003)
조정된 R ²	0.171	0.296	0.105	0.134
표본수	372,740			
모형 (2)				
PM ₁₀ 경보	0.239 (1.638)	-1.945 (2.402)	21.953*** (5.153)	-5.604*** (1.721)
조정된 R ²	0.170	0.295	0.106	0.137
표본수	381,172			
모형 (3)				
PM ₁₀ 농도	0.003 (0.003)	0.015*** (0.004)	-0.026*** (0.009)	0.017*** (0.003)
PM ₁₀ 경보	0.068 (1.633)	-2.481 (2.396)	23.273*** (5.128)	-5.560*** (1.700)
조정된 R ²	0.171	0.296	0.105	0.134
표본수	372,740			

주: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 이고 ()은 표준오차임. 공통적으로 포함된 변수는 개인 및 가구특성(소득 더미, 통행거리, 연령, 성별 더미, 주 5일 이상 근무 더미, 전일제 근무 더미, 재택근무 더미, 직업 더미), 기상요소(강수량, 월평균 기온 초과, 월평균 기온 미만, 풍속, 습도), 월 더미, 요일 더미, 공휴일 더미, 시군구 더미임. 자가용 추정식에는 차량 보유 더미, 5세 미만 가구원수, 버스와 전철 추정식에는 운전면허 보유 더미가 포함됨.