



논문

서울시 중앙버스전용차로 도입의 부가적인 대기오염 영향성 평가

Impact of the Exclusive Median Bus Lane System on Air Pollution Concentrations in Seoul, Korea

백연주, 김다울, 권혜영¹⁾, 김영국²⁾, 김선영^{3),*}

서울대학교 경제학부

¹⁾목원대학교 의생명보건학부

²⁾한국교통연구원

³⁾국립암센터 국제암대학원대학교 암관리학과

접수일 2018년 3월 7일
수정일 2018년 7월 13일
채택일 2018년 8월 6일

Received 7 March 2018
Revised 13 July 2018
Accepted 6 August 2018

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-920-2745

E-mail : sykim@nccr.kr

Yeon-Ju Baik, Da-Wool Kim, Hye-Young Kwon¹⁾, Youngkook Kim²⁾, Sun-Young Kim^{3),*}

Department of Economics, Seoul National University

¹⁾Department of Biology & Public Health, Mokwon University

²⁾The Korea Transport Institute

³⁾Department of Cancer Control and Population Health, Graduate School of Cancer Science and Policy, National Cancer Center

Abstract Since many previous studies reported the health effect of air pollution and indicated traffic as a major pollution source, significant policy efforts have been made to control traffic to reduce air pollution. However, there have been few studies that evaluated such policy implementation. In Seoul, Korea, the exclusive median bus lane system was implemented in 2004, and the metropolitan government applied air pollution reduction policies such as conversion of diesel buses to compressed natural gas buses and installation of emission control devices. This paper aimed to investigate the impact of the exclusive median bus lane system on air pollution reduction. Using hourly concentrations of particulate matter (PM₁₀) and nitrogen dioxide (NO₂) measured at 131 regulatory monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do for 2001-2014, we calculated annual and daily average concentrations at each site. We assessed the impact of the policy using differences-in-differences analysis by annual and daily average models after adjusting for geographic and/or meteorological variables. This method divides population into treatment and control groups with and without policy application, and compares the difference between the two time periods before and after the policy implementation in the treatment group with the difference in the control group. We classified all monitoring sites into treatment and control groups using two definitions: 1) Seoul vs. Gyeonggi-do; 2) within vs. outside 300 meters from the median bus lane. Pre- and post-policy periods were defined as 2001-2005 and 2006-2014, and 2004 and 2014 in the annual and daily models, respectively. The decrease in PM₁₀ concentrations between the two periods across monitoring sites in the treatment group was larger by 1.73-5.88 µg/m³ than in the control group. NO₂ also showed the decrease without statistical significance. Our findings suggest that an efficient public transport policy combined with pollution abatement policies can contribute to reduction in air pollution.

Key words: Air pollution, Difference-in-difference analysis, Median bus lane, Nitrogen dioxide, Particulate matter, Traffic

1. 서론

정부는 대기오염의 감소를 위해 주요 오염원으로

지적되는 교통과 관련하여 1990년대부터 정책적인 노력을 기울여 왔다. 1977년 『환경보전법』과 1990년 『환경정책기본법』과 후속 법률로 『대기환경보전법』

이 제정된 이후, 1995년 개정부터 지방자치 단체의 권한이 강화되며 지자체 중심으로 대기질을 관리하기 시작하였다(Seoul Solution, 2014a). 서울시는 『수도권 대기환경개선에 관한 특별법』 제25조~28조에 따라 운행경유차 저공해화 사업을 활발히 추진하고 있다. 위 법은 대기관리 권역에 등록된 경유 자동차 중 대기환경 보전법에서 규정한 배출가스 보증기간이 지난 자동차와 같은 특정 경유 자동차가 특정 배출허용기준을 충족하지 못할 경우, 해당 차에 대해 정밀검사를 실시하고 배출가스 저감장치(diesel particulate filter) 부착, 액화석유가스(liquefied petroleum gas; LPG) 엔진개조, 조기 폐차 등의 조치를 취하도록 하고 있다. 이를 이행하지 않을 경우 각 시도의 조례에 따라 운행제한 지역, 범위 및 과태료 등을 정하도록 하고 있다(Seoul Solution, 2014b). 또한 『대기환경보전법』 58조 3항에 따라 시내버스 운송사업자에게 천연가스 버스로의 교체를 위한 보조금을 지급하는 천연가스 버스 보급사업을 실시하고 있다. 그 결과 서울시는 천연가스자동차 보급사업 시범사업을 시작한 2002년부터 2013년까지 천연가스 버스 및 청소차 만여 대를 보급하였고(Seoul Solution, 2014c), 2015년 기준 서울시를 운행하는 시내버스 7천 여 대에 대해 100% 천연가스 버스로 교체하였다(Seoul Statistics, 2017).

한편 서울시는 2004년 7월 기존 버스 시스템을 간선급행버스체계(Bus Rapid Transit (BRT) 체계)로 전환하기 위해 중앙버스전용차로를 도입하였다. 중앙버스전용차로 도입의 목적은, 교통혼잡으로 평균통행속도가 저조한 지역에 버스전용차선을 확보함으로써 자동차에 비해 버스의 우월한 통행속도를 유지하여 자동차 이용객의 버스로의 수단전환을 유도하는 것이었다(Lee, 2016). 서울시는 2004년 36.1 km로 연장된 중앙버스 차로 설치를 시작으로 2014년 기준 117.5 km를 추가로 연장하여 세계에서 6번째로 많은 BRT 노선을 확보한 도시가 되었고(Ko et al., 2015), 이와 더불어 요금 시스템의 선진화, 대중교통과의 환승 및 연계 개선, 버스운행관리 개선 등을 통하여 시

내버스의 이용률이 크게 증가하였다. 이러한 BRT 체계의 성공적 정착은 교통정체 방지로 인한 공회전(idling) 감소로 오염물질 배출량을 감소시키고, 대중교통의 운행이 도로 중앙으로 집중되므로 인도 및 주변지역의 대기오염을 감소시킬 수 있다. 또한 천연가스 버스 보급 및 운행경유차 저공해화 사업의 효과를 극대화시킬 수 있다.

본 연구에서는 BRT 체계의 도입, 구체적으로 중앙버스전용차로의 도입이 서울시의 대기오염 저감에 미친 효과를 분석하고자 한다. 과거 우리나라 BRT 체계 도입이 대기오염에 미친 영향에 대한 연구는 주로 BRT 체계 도입에 따라 예상되는 가상적인 시나리오를 근거로 설정된 교통량과 대기오염 배출량 혹은 대기오염비용을 제시했다(Choi et al., 2007; Lee and Kim, 2005). 이러한 연구 방법은 정책 시행 전에 여러 가지 정책에 따른 효과를 예측하고 분석할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 가상시나리오에 의해 추정된 대기오염 배출량을 이용함으로써 실제 관측된 대기오염 정도와 오차가 있을 수 있으며, 차량에서 배출되는 오염 물질 이외의 외부적인 영향으로 발생하는 대기오염을 반영하기 어렵다는 한계가 있다. Jo et al. (2006)은 중앙버스전용차로의 대기환경 영향 평가를 위해 자체적으로 관측한 관측치를 사용하였으나 그 대상을 양재 인근의 특정 노선에 한정했다. BRT 체계의 대표적인 성공사례로 평가되는 멕시코시티의 연구에서도 대중교통정책이 대기오염에 미치는 영향을 분석하고자 대기오염 관측값을 사용하였다(Bel and Holst, 2015; Wöhrnschimmel et al., 2008). 특히 Bel and Holst (2015)는 중앙버스전용차로 정책이 시행된 처리집단(treatment group)과 정책 대상이 아닌 통제 집단(control group) 사이에 정책 시행 전후의 대기오염 농도를 비교한 이중차분법(Difference-in-difference, DID) 분석을 실시하여 BRT 도입이 대기오염물질을 감소시켰음을 보였다. 그러나 이 연구 역시 버스에 설치한 계량기를 통하여 대기오염 자료를 획득하였으므로, 분석 대상이 일부 노선에 한정되며, 도시 전체 수준에서의 BRT 도입 효과성을 판단하기 어렵

다는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 서울시의 BRT 체계, 특히 중앙버스 전용차로 도입에 따른 대기오염물질 감소 효과를 이중차분법을 이용하여 평가하고자 한다. 특히, 서울시와 경기도 전역에 설치된 대기오염 상시측정망 측정소에서 측정된 미세먼지(particulate matter less than equal to 10 micrometers in diameter: PM₁₀), 이산화질소(nitrogen dioxide: NO₂) 농도를 사용하여 기존 연구의 한계를 극복하고자 한다. PM₁₀과 NO₂는 교통수단에서 상당량 배출되는 대기오염 물질로, 수많은 역학연구에서 건강에 악영향을 미치는 것으로 보고되었다(Hoek *et al.*, 2013). 이를 통해 서울시의 대중교통체계 개선 정책이 대기오염 감소의 효과를 평가할 수 있을 것이라 기대된다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

환경부와 지방자치단체에서는 대기오염의 실태 파악을 위해 전국 300여 개 측정소에서 2001년부터 시간별로 대기오염 농도를 측정하고 있다(MOE, 2011). 측정망의 대다수 측정소는 인구밀집지역과 도로변에 설치된 도시대기측정소와 도로변대기측정소이다. 본 연구의 대기오염 자료로는 대기오염 상시측정망의 2004년 101개 도시 대기 측정소와, 13개 도로변 대기 측정소, 2014년 116개 도시 대기 측정소, 21개 도로변 대기 측정소에서 2001~2014년까지 측정된 PM₁₀과 NO₂ 농도를 이용하였다. 국립환경과학원에서 제공받은 1시간 간격의 측정농도에서 측정 장비상의 문제로 이상 자료로 처리된 값(-999, 0보다 작은 값) 등은 제외하였다. 이를 이용하여 시간별 자료를 75% 이상 포함한 일에 한해, 일평균 대기오염 물질의 농도를 계산했다. 또한, 일평균 자료를 이용해서 10달 이상 측정치가 있고 45일 이하의 결측값을 가지는 측정소에 한해, 연평균 대기오염 농도를 계산하였다(Yi *et al.*, 2016).

날씨 자료는 기상청의 종관기상관측소(Automated Surface Observing System, ASOS)에서 동일기간 동안 측정한 기온, 습도, 풍속이었다. 시간별 자료를 이용해 오염물질과 마찬가지로 일평균 값을 계산하였다.

대기오염의 다양한 오염원을 대표하는 지리변수들은 Min *et al.* (2017)의 논문을 바탕으로 PM₁₀ 및 NO₂ 농도와 유의한 연관성을 보이는 인구, 교통, 토지이용 등에 대한 5개 지리변수들을 이용하였다. 이들 변수의 자료원과 상세한 계산방법은 Eum *et al.* (2015)에 소개되었다. 인구자료는 통계청 인구주택총조사통계청 2010년 자료를 바탕으로 정리된 통계지리정보서비스(SGIS) 사이트(<http://sgis.kostat.go.kr>)의 각 집계구별 산업체 수, 고용 인구, 거주 인구의 지리정보 자료들을 획득하였다. 토지이용정보는 환경공간 정보 사이트로부터(<http://egis.me.go.kr>) 인공위성 사진을 통해 토지이용을 농경지, 숲, 초지, 습지 등으로 구분한 토지 피복 지도를 획득하였다. 이 자료는 2007년도 자료와 수도권지역에 한해 업데이트된 2009년도 자료를 병합해서 사용하였다. 교통은 국가교통데이터베이스(KTDB) (www.ktdb.go.kr)의 2010년도의 도로 정보를 이용하였다. 주요도로는 고속도로와 6차선 이상의 도로를 포함했다. 버스정류장에 대한 정보와 중앙차로에 대한 정보는 2017년 현재 기준으로 서울특별시 교통정보과와 경기도 교통정보센터로부터 제공 받았다. 이들 지리자료를 이용해서, 각 대기오염 측정소로부터 100 m 내 도로 면적(Major road in 100 m), 500 m 내 습지 비율(Wetland in 500 m), 버스정류장까지의 거리(Distance to bus stop), 1,000 m 내 건설업체의 수(Construction companies in 1,000 m), 100 m 내 건설업 근로자 수(Construction employees in 100 m), 중앙버스전용차로까지의 거리(Distance to median bus lane) 변수를 계산하였다. 주요도로의 면적은 차선 수에 길이와 너비를 곱해서 계산했다.

2.2 이중차분법(Differences-in-Differences)

이중차분법은 정책의 영향을 받은 처리집단과 받

지 않은 통제집단의 정책 전후 시점 변화에 따른 정책 효과를 추정하는 방법이다. 이 방법은 회귀분석을 이용해서 다음과 같은 식에 따라 종속변수, 설명변수 및 정책 효과와 시점 효과를 반영한 더미(dummy) 변수로 구성될 수 있다.

$$Y_{ij} = \beta X_{ij} + \gamma Z_j + \kappa T_i + \alpha Z_j \times T_i + \varepsilon_{ij}$$

i: 측정소, j: 년 또는 일, Y_{ij} : 종속변수, X_{ij} : 설명변수, Z_j : 시점 더미변수(정책 이후=1, 이전=0), T_i : 처리 더미변수(처리집단=1, 통제집단=0), ε_{ij} : 오차항

이 식에서 γ 는 시점 간 변화의 평균적인 차이를 나타내는 회귀 계수이고, κ 는 처리집단과 통제집단의 평균적인 차이를 나타내는 계수이다. α 는 이중차분법에서 주요한 관심인 정책시행 후의 정책의 처리 효과(treatment effect)를 추정한 계수이다. 처리 효과는 처리집단과 통제집단의 차이의 시점 간 차이를 의미한다. 이중차분법 회귀분석에서는 대기오염 농도를 종속변수로 이용했고, 중앙차로 정책 이외에 대기오염 농도 변화에 영향을 미치는 시간적 공간적 요인들을 보정하고자 날씨 및 지리 변수를 설명 변수로 이용했다. 또한, 2006년 전후를 시점 더미변수, 중앙버스전용차로 정책 시행 여부를 처리 더미변수로 이용했다. 이러한 회귀분석은, 연평균 모형과 일평균 모형 두 가지 모형으로 분석했다. 연평균 모형에서는 각 오염물질의 측정소별 연평균 농도를 종속변수로 이용하고 측정소별 지리 변수를 설명 변수로 이용해서 정책시행 후 정책이 대기오염에 미치는 처리 효과를 평가했다. 일평균 모형에서는 오염물질의 일평균 농도를 종속변수로 하여 같은 날의 날씨 변수와 시간에 따라 변하지 않는 지리 변수를 설명 변수로 두고 정책시행 후 정책이 일별 대기오염에 미치는 처리 효과를 추정했다. 각 날씨 변수는 대기오염과의 비선형적인 관계를 반영하기 위해 평활화(smoothing)를 하여 식에 반영하였다.

이 논문에서는 두 가지 정의를 이용해서 처리 집단과 통제집단을 구분하였다. 첫 번째 정의(Definition

1)로는 서울과 경기도 간 지역별 구분으로, 서울을 처리 집단으로 경기도를 통제 집단으로 나누었다. 서울시는 2004년 이후 중앙버스전용차로의 총연장이 빠르게 확대되고 BRT 체계가 성공적으로 정착된 반면 경기도에서는 도입 시점도 늦을뿐더러 BRT 노선연장도 서울에 비해 현저히 짧기 때문이다. 또한 이 정의를 사용할 경우 정책이 실제로 시행된 지역적 구분에 따르므로 정책집행기관에 따른 정책의 영향을 가질 수 있는 장점이 있다. 그러나 설명 변수로 통제 불가능한 두 지역의 비가시적인 요인이 종속변수에 미치는 영향이 처리 효과로 추정될 수 있는 제한점이 있다. 또한, 서울의 중앙버스전용차로를 지나가는 서울 시내버스 중 상당수가 경기도 지역까지 운영하기 때문에, 서울시의 천연가스 버스 교체 사업 등의 영향이 경기도 지역까지 확대되었을 가능성이 있으나 검증이 어려운 약점이 있다(그림 1).

이와 같은 제한점을 보완하기 위해 두번째 정의(Definition 2)는 중앙버스전용차로에 위치한 버스 정류장으로부터 각 대기오염 측정소의 최단 거리를 구해 이 거리가 300 m 이내인 경우 처리집단으로, 300 m 이상인 경우에는 통제집단으로 구분하였다. 이 경우 정책에 직접적으로 영향을 받는 지역과 그렇지 않은 지역의 정책 전후 변화를 관찰할 수 있다. 그러나, 이 경우 중앙차로가 주로 교통량이 많은 도로에 설치되어 있으므로 교통량의 변화 등 처리 효과 외의 영향이 개입될 수 있다. 따라서 추가적으로 6차선 이상의 주요 도로 인근(500 m 이내, 1,000 m 이내)의 측정소만을 분석 대상으로 하여 처리 효과가 있었는지를 분석하였다.

정책이 시행된 시점은 연평균 모형의 경우 2006년 이후로 하였다. 서울시가 대중교통체계 개선 정책을 실시한 것은 2004년 7월부터이나, 정책 초기에는 서울시내 중앙버스전용차로 길어도 36.1 km에 불과해 짧았고(Seoul Solution, 2014d) 천연가스 버스 보급률도 23.8%에 불과하였다(Seoul Statistics, 2017). 2006년 기준 중앙버스전용차로가 67.9 km로 2년 사이 중앙버스전용차로 길이가 2배가량 증가하였고, 천연가

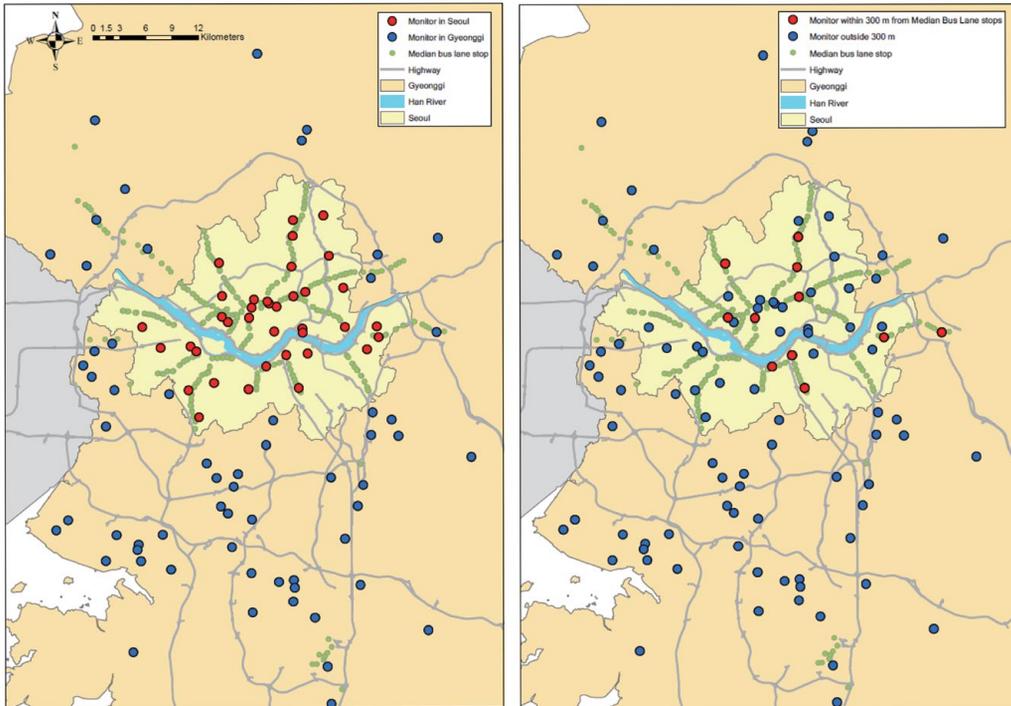


Fig. 1. Maps of bus stops on median bus lanes and air quality monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do in 2016 by two definitions (Definition 1 for the left and Definition 2 for the right) applied to difference and difference analyses.

스 보급률도 43%로 급증하였다. 따라서 본 연구에서는 대중교통 정책과 대기오염 정책의 연계 효과가 2006년 이후 나타날 것이라 보고 2001~2005년을 정책 시행 전으로, 2006~2014년을 정책 시행 후로 정의하였다. 한편, 일평균 모형의 경우 정책 시행 전은 2004년, 정책 시행 후는 2014년으로 하여 더욱 명확한 차이를 관찰하고자 하였다.

3. 결 과

3.1 기초 통계량

표 1은 서울시 37개, 경기도의 94개의 대기오염 측정소의 인근 도로 면적, 인근 습지 비율, 인근 건설업체의 수 및 근로자 수, 버스정류장까지의 거리 및 중

앙버스전용차로까지의 거리로 구성되어 있다. 중앙버스전용차로로부터 측정소까지의 거리는 경기도가 11.36 km, 서울시가 1.06 km로 큰 차이를 보였고, 측정소에서 가장 가까운 버스정류장까지의 거리 역시 경기도가 0.70 km, 서울이 0.15 km로 큰 차이를 보였다. 측정소로부터 100 m 버퍼 이내의 주요도로 면적(차선 수*길이*너비)은 경기도가 1,019 m, 서울이 2,435 m로 서울시내 도로가 2배가량 많았다. 각 측정소로부터 500 m 내의 습지 비율은 경기도의 경우 0.7%로 서울 0.15%보다 높았다. 1,000 m 버퍼 내의 건설업체 수와 건설업체 종사자 수는 기업 집중도가 높은 서울이 경기도에 비해 2배가량 높았다. 중앙버스전용차로로부터의 거리에 따른 분류로는 중앙버스전용차로에서 300 m 이내의 측정소가 그 밖의 측정소에 비해 인근 주요도로 면적이 더 넓고, 가장 가까운 버스정류장까지의 거리가 짧으며, 건설업체 수와

Table 1. Means and standard deviation of geographic and meteorological variables at air quality monitoring sites included into treatment and control groups by two treatment definitions.

Variable ¹⁾	Definition 1 ²⁾		Definition 2 ³⁾	
	Treatment	Control	Treatment	Control
Distance to median bus lane (km)	1.06 ± 0.88	11.36 ± 11.14	0.15 ± 0.08	9.12 ± 10.67
Major road in 100 m (m ²)	2435.25 ± 3340.05	1019.59 ± 2142.98	4059.51 ± 3765.51	1178.75 ± 2343.69
Wetland in 500 m (%)	0.05 ± 0.25	0.65 ± 1.99	0.65 ± 2.05	0.46 ± 1.68
Distance to bus stop (km)	0.15 ± 0.10	0.70 ± 3.42	0.10 ± 0.04	0.58 ± 3.03
Construction companies in 1,000 m (N)	73.66 ± 87.85	35.69 ± 32.28	88.67 ± 137.58	42.60 ± 40.16
Construction employees in 100 m (N/100)	30.41 ± 54.28	14.40 ± 29.00	54.95 ± 69.25	15.63 ± 32.52
Temperature (°C) ⁴⁾	13.47 ± 10.01	12.83 ± 9.61	13.27 ± 10.00	12.78 ± 9.70
Wind speed (m/s) ⁴⁾	2.51 ± 0.82	2.19 ± 1.08	2.44 ± 0.84	2.26 ± 1.04
Humidity (%) ⁴⁾	62.49 ± 15.07	66.67 ± 14.86	62.76 ± 14.87	65.78 ± 15.03
The number of monitoring sites	37	94	11	120
N ⁵⁾	518	1302	154	1666

¹⁾Major road in 100 m: sum of lengths of major roads within a 100 m circular buffer multiplied by number of lanes and lane width; Wetland in 500 m: proportion of wetland within a 500 m buffer; Distance to bus stop: distance to the nearest bus stop; Construction companies in 1,000 m: number of construction companies within a 1,000 m buffer, Construction employees in 100 m: number of employees in construction companies within a 100 m buffer

²⁾Definition 1: air quality monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do for the treatment and control groups, respectively

³⁾Definition 2: air quality monitoring sites less than or equal to 300 m from the closet median bus lane and further than 300 m for treatment and control groups, respectively

⁴⁾Average and standard deviation for weather variables were calculated from daily data, whereas other variables were calculated from annual average data.

⁵⁾Number of sites across different years for 2001-2014

종사자 수는 더 많았다. 이는 중앙버스전용차로 인근 측정소에서 더 교통량이 많고 상대적으로 도시화가 진행되었음을 제시한다.

표 2는 처리집단 및 통제집단의 정책 시행 전후의 대기오염 농도 변화를 알려준다. PM₁₀의 경우 정책 시행 전에 비해 시행 후로 크게 감소하였다. 연평균 농도를 기준으로 처리집단에 대한 첫 번째 정의에 따라 경우 처리집단에서는 PM₁₀이 15.45 µg/m³ 감소하였고, 통제집단에서는 8.13 µg/m³ 감소하여 평균적으로 처리집단에서 더 큰 폭으로 감소하였다. 두 번째 정의에 따라 경우 처리집단에서는 15.67 µg/m³, 통제집단에서는 9.82 µg/m³ 감소하여 처리집단에서 감소 폭이 더 컸다. 그러나 NO₂의 경우 정책 전후로 큰 농도 차이가 없었다. 첫 번째 정의에 따라 경우 처리집단에서는 0.36 ppb 감소, 통제집단에서는 0.66 ppb 증가하였으나, 두 번째 정의에 따라 경우 처리집단에서는 1.16 ppb 증가, 통제집단에서는 0.18 ppb 감소하였다. 일평균 농도 역시 유사한 경향성을 보여 PM₁₀의 경우 두 정의에서 모두 처리집단에서 통제집단보다

더 크게 농도가 감소하였다(표 3). 반면, NO₂ 농도는 정책 시행 전후 큰 변화가 없었고, 두 번째 정의에 따라 경우에는 처리집단보다 통제집단에서 NO₂ 감소 폭이 다소 컸다.

3.2 이중차분법 분석 결과

표 4는 PM₁₀에 대한 연평균, 일평균 모형의 이중차분법 분석 결과를 제시한다. 먼저 시점더미변수(Year dummy)의 계수가 유의하고 음의 값인 것으로 볼 때 정책 시행 이후 정책 시행 이전에 비해 PM₁₀ 농도가 유의하게 감소했으며 그 계수의 크기는 -10 가량이었다. 이는 2006~2014년의 평균 PM₁₀ 농도가 2001~2004년 PM₁₀ 농도에 비해 10 µg/m³ 가량 낮음을 의미한다. 처리 더미변수(Treatment)의 계수는 첫 번째 정의를 사용할 경우 연평균 모형에서 처리 더미변수의 계수가 -3.36로 유의했고 일평균 모형에서는 유의하지 않았다. 이는 연평균 자료 사용 시 서울시가 경기도보다 PM₁₀ 농도가 약 3 µg/m³ 낮음을 의미한다 (p<0.001). 반면, 두 번째 정의를 사용할 경우 연평균

Table 2. Means and standard deviation of annual average concentrations for PM₁₀ and NO₂ at air quality monitoring sites between treatment and control groups by two treatment definitions before and after adoption of the BRT system.

Before BRT (2001-2005)		PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppb)	N ³⁾
Definition 1 ¹⁾	Treatment group	67.86 ± 10.67	39.96 ± 8.29	155
	Control group	65.97 ± 12.60	29.66 ± 8.63	299
Definition 2 ²⁾	Treatment group	68.71 ± 9.25	40.72 ± 10.60	44
	Control group	66.39 ± 12.24	32.36 ± 9.38	410
After BRT (2006-2014)		PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppb)	N ³⁾
Definition 1 ¹⁾	Treatment group	52.41 ± 7.86	39.60 ± 9.35	320
	Control group	57.84 ± 9.36	30.32 ± 8.87	788
Definition 2 ²⁾	Treatment group	53.04 ± 8.74	41.88 ± 12.04	94
	Control group	56.57 ± 9.28	32.18 ± 9.31	1014

¹⁾Definition 1: air quality monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do for the treatment and control groups, respectively

²⁾Definition 2: air quality monitoring sites less than or equal to 300m from the closest median bus lane and further than 300m for treatment and control groups, respectively

³⁾Number of sites across different years for 2001-2006 before BRT and for 2007-2014 after BRT

Table 3. Means and standard deviation of daily average concentrations for PM₁₀ and NO₂ at air quality monitoring sites between treatment and control groups by two treatment definitions before and after adoption of the BRT system.

Before BRT (2001-2005)		PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppb)	N ³⁾
Definition 1 ¹⁾	Treatment group	63.19 ± 34.63	41.27 ± 18.05	10880
	Control group	64.60 ± 34.42	29.69 ± 15.25	28210
Definition 2 ²⁾	Treatment group	66.45 ± 34.16	41.02 ± 17.07	3046
	Control group	64.02 ± 34.50	32.23 ± 16.70	36044
After BRT (2006-2014)		PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppb)	N ³⁾
Definition 1 ¹⁾	Treatment group	48.18 ± 27.93	39.30 ± 16.80	13148
	Control group	53.18 ± 28.73	28.90 ± 15.20	36540
Definition 2 ²⁾	Treatment group	49.30 ± 28.04	42.42 ± 17.87	3046
	Control group	52.07 ± 28.65	30.73 ± 15.82	36044

¹⁾Definition 1: air quality monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do for the treatment and control groups, respectively

²⁾Definition 2: air quality monitoring sites less than or equal to 300m from the closet median bus lane and further than 300m for treatment and control groups, respectively

³⁾Number of sites across different years for 2001-2006 before BRT and for 2007-2014 after BRT

모형에서는 처리 더미변수의 계수가 유의하지 않았고 일평균 모형에서 3.24로 유의했다. 이는 중앙버스 전용차로 300 m 이내의 PM₁₀ 농도가 그 밖의 농도보다 약 3 µg/m³ 높음을 의미한다(p < 0.001).

한편, 정책 전후의 처리 효과를 가리키는 중요 계수인 Time * treat 변수의 계수의 경우 서울-경기 지역 구분의 연평균 모형을 제외하고는 모두 유의한 음의 계수를 갖는다. 즉, 정책이 유의하게 PM₁₀의 농도를 낮췄음을 의미한다. 서울-경기 지역 구분의 연평균 모형에서도 유의하지는 않으나 음의 값의 계수를

가진다. 다만 계수의 크기는 처리 효과의 정의에 따라 큰 차이를 보이는데, 첫 번째 정의에 따라서는 2~3 µg/m³ 정도로 상대적으로 적은 감소분을 보이지만, 두 번째 정의 기준으로는 5~6 µg/m³ 수준의 상대적으로 큰 감소폭을 보였다.

한편, 표 5의 NO₂ 변화를 살펴보면 처리 더미변수의 계수는 두 가지 정의 모두에서 유의한 양의 값을 가져, 처리집단의 농도가 통제집단보다 높은 것으로 나타났다. 즉, 서울지역과 중앙버스전용차로가 존재하는 주요 도로로부터 가까운 지역의 경우 일관되게

Table 4. Regression coefficients of treatment effects for annual and daily average PM₁₀ from difference-in-difference analysis by two treatment definitions.

Variables ¹⁾	Definition 1 ²⁾		Definition 2 ³⁾	
	Annual	Daily	Annual	Daily
Year dummy (γ)	-10.40 ^{***5)} (-16.20) ⁴⁾	-10.73 ^{***} (-44.89)	-9.83 ^{***} (-14.68)	-11.16 ^{***} (-52.49)
Treatment (Definition 1) (κ)	-3.36 ^{***} (-5.69)	0.13 (0.39)		
(Definition 2)			2.24 (1.44)	3.24 ^{***} (5.72)
Time * Treat (α)	-1.73 (-1.67)	-3.12 ^{***} (-6.89)	-5.88 ^{**} (-3.28)	-5.10 ^{***} (-6.83)
N ⁶⁾	1562	87759	1562	87759
R ²	0.20	0.16	0.19	0.16

¹⁾Major road in 100 m, Wetland in 500 m, Distance to bus stop, Construction companies in 1,000 m, Construction employees in 100 m were controlled for in the annual model and temperature, wind speed and humidity were additionally controlled for in the daily model.

²⁾Definition 1: air quality monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do for the treatment and control groups, respectively

³⁾Definition 2: air quality monitoring sites less than or equal to 300 m from the closet median bus lane and further than 300 m for treatment and control groups, respectively

⁴⁾t statistics are in parentheses.

⁵⁾*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

⁶⁾Number of sites from treatment and control groups across different years for 2001-2014

Table 5. NO₂ difference-in-difference analysis result of yearly and daily model according to two treatment definitions.

Variables ¹⁾	Definition 1 ²⁾		Definition 2 ³⁾	
	Yearly	Daily	Yearly	Daily
Year dummy (γ)	0.04 (0.1) ⁴⁾	-1.26 ^{***5)} (-12.35)	-0.184 (-0.41)	-1.42 ^{***} (-14.97)
Treatment (Definition 1) (κ)	6.18 ^{***} (15.89)	10.49 ^{***} (71.32)		
(Definition 2)			4.621 ^{***} (3.67)	5.32 ^{***} (20.94)
Time * Treat (α)	-0.598 (-0.79)	-0.03 (-0.14)	-1.389 (-0.94)	0.36 (1.07)
N ⁶⁾	1562	87759	1562	87759
R ²	0.50	0.43	0.44	0.37

¹⁾Major road in 100 m, Wetland in 500 m, Distance to bus stop, Construction companies in 1,000 m, Construction employees in 100 m were controlled for in the annual model and temperature, wind speed and humidity were additionally controlled for in the daily model.

²⁾Definition 1: air quality monitoring sites in Seoul and Gyeonggi-do for the treatment and control groups, respectively

³⁾Definition 2: air quality monitoring sites less than or equal to 300 m from the closet median bus lane and further than 300 m for treatment and control groups, respectively

⁴⁾t statistics are in parentheses.

⁵⁾*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

⁶⁾Number of sites from treatment and control groups across different years for 2001-2014

그 외 지역과 비교하여 NO₂가 높은 것으로 나타난다. 정책전후 비교에서는, 일평균 모형에서는 0.1% 유의 수준에서 크게 감소한 것으로 나타났다. 그러나 일별

변화가 평균된 연평균 모형에서는 시간에 따른 감소 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 한편, 중요 관심 변수인 Time * treat의 계수는 모든 모형에서 유의한

Table 6. PM₁₀ and NO₂ difference-in-difference analysis result of yearly model according to definition 2 under constrained sample of monitoring sites near major roads (MR).

Variables ¹⁾	Within 1,000 m from MR ¹⁾		Within 500 m from MR ¹⁾	
	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂
Year dummy (γ)	2.783 (1.77) ²⁾	-3.249 ^{***3)} (-5.20)	2.76 (1.73)	5.80 ^{***} (3.95)
Treatment (Definition 2) (κ)	-10.42 ^{***} (-15.22)	3.647 ^{***} (16.10)	-10.30 ^{***} (-13.77)	0.56 (1.20)
Time * Treat (α)	-5.353 ^{**} (-2.95)	0.619 (0.80)	-5.48 ^{**} (-2.98)	-1.00 (-0.58)
N	1407	1407	1244	1244
R ²	0.22	0.28	0.21	0.26

¹⁾MR: Main road include National Highways, Metropolitan city highways, Local roads above 6 lanes.

²⁾t statistics are in parentheses.

³⁾*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

값을 가지지 않았으나 두 번째 정의의 일평균 모형을 제외하고는 모두 음의 값을 보여 예측한 것과 동일한 부호를 보였다.

처리 효과에 대한 두 번째 정의에 따른 분석에서 주요도로에서 1,000 m, 500 m 이내에 있는 관측소로만 한정된 경우에도 한정하지 않은 분석과 일관된 결과를 보였다(표 6). 두 가지 처리 집단 분류 기준에서 모두 일관적으로 PM₁₀의 경우 5.5 µg/m³ 정도의 연평균 절감 효과가 정책 이후로 발생하였으나 NO₂의 경우 큰 절감 효과가 관찰되지 않았다.

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 대기오염 상시측정망 측정자료와 이중차분법을 이용하여, 서울시의 대중교통 체계 개편 후 중앙버스전용차로 도입이 PM₁₀과 NO₂ 농도를 감소시켰는지 평가하였다. 정책시행 여부를 구분하는 처리집단에 대한 정의로는, 대중교통정책을 도입한 서울시 여부와 중앙버스전용차로부터 근접 여부의 두 가지를 사용하였다. 두 가지 정의를 사용한 분석 모두에서 PM₁₀은 뚜렷한 정책 효과를 보이며 정책 시행 후에 처리집단에서 유의한 농도의 감소를 보였다. 반면, NO₂는 전반적으로 감소추세를 보였으나

통계적으로 유의하지 않았다

본 연구는 정책의 영향 범위를 특정하기 힘든 대중교통 및 환경정책이 대기오염 감소에 미치는 영향을 계량적으로 평가함으로써, 정책평가의 과학적인 근거를 제시한 강점이 있다. 대중교통 대기오염이 사람들의 건강에 미치는 악영향이 다수의 대규모 역학연구들에서 국내외적으로 보고되었다(US EPA, 2009). 이러한 악영향을 감소시키기 위해서 대기오염의 절감을 위한 정책적인 노력이 시행되었다. 그러나, 정책 평가는 단순히 기술적인 분석방법에 의존하거나 가상적인 시나리오에 따른 예상결과에 제한되었고, 특정 정책도입의 직접적인 대기오염 감소 효과를 평가한 연구는 거의 없었다.

본 연구는 타당성 높은 정책평가를 위해, 대기오염 측정자료와 이중차분법을 이용하였다. 대중교통정책이 대기오염 감소에 미치는 영향을 평가한 기존 연구에서는 주로 교통이용과 대기오염 배출에 대한 특정 가설에 기반해서 구축된 모형의 산출값인 대기오염 추정치를 이용했다(Choi *et al.*, 2007; Lee and Kim, 2005). 그러나 이러한 연구들은 가설이 실제상황과 차이가 있을 때 타당성 낮은 연구결과를 생성할 수 있다. 타당성 낮은 연구결과는 수행 중인 정책의 평가와 후속 정책의 제언에 활용되기 어렵다. 서울과 경기도에 설치된 130여 개 측정소의 측정값을 이용

한 본 연구는, 대기오염 감소와 관련된 정책의 평가와 제언을 위한 과학적인 근거를 제시한다.

이중차분법은 경제학에서 정책평가를 위해 광범위하게 이용되는 방법이지만, 대기오염 관련 정책평가에는 최근 도입되었다. 이 분석방법은 처리 효과가 완벽하게 통제되기 어려운 비실험적인 상황에서 타당성 높은 정책 효과를 추정하기 위해 개발되었다(Abadie, 2005). Bel and Holst (2015)은 멕시코시티의 BRT 시스템 도입의 영향을 이중차분법을 통해 분석한 결과 BRT 시스템이 도입된 노선을 운행하는 버스 내의 다양한 오염물질 농도가 일반 버스 및 미니버스보다 낮음을 밝혔다. 그러나 이중차분법은 비실험적인 상황에 적용되는 만큼, 처리 및 통제집단 구분의 모호성, 불확정적인 혼란 요인 등으로 연구결과의 타당성에 대한 의문이 제기되어 왔다. 본 연구에서는 정확한 처리 효과를 추정하고자, 다양한 처리집단 정의기준을 사용하고, 일평균과 연평균에 대한 두 가지 모형을 사용하였다. 또한, 날씨변수만 보정한 기존연구와 달리, 측정소의 입지에 따른 주변환경이 대기오염에 미치는 영향을 보정하고자 5가지 지리변수를 추가적으로 보정하였다.

분석 결과 두 가지 정의의 처리집단 모두에서 PM_{10} 의 경우 정책 시행 이후 전반적인 오염 수준의 절감 효과가 있었다. 이러한 결과는 교통정체 방지, 도로 중앙의 대중교통 집중, 천연가스 버스 보급 및 운행 경유차 저공해화 사업의 부대 효과로 설명할 수 있다. 미국 로스앤젤레스 지역에서 고속도로로부터 거리별로 미세먼지 대기오염을 측정한 연구에서는, 거리에 따라 미세먼지의 농도가 급격하게 줄어드는 경향을 보고했다(Zhu *et al.*, 2002). 서울시의 연구에서도 중앙차선 버스정류장 4개 지역과 인접한 일반 도시대기측정소의 대기오염 측정 자료를 비교한 결과, 중앙차선 지역은 이산화질소가 2.5~5.3배 높고 미세먼지도 27% 정도 높았다(Lee *et al.*, 2014). 2009년 버스중앙차로가 시행 중인 8개 차로 15개 지점의 중앙차로와 인도의 대기오염도 및 교통량 측정 결과에서, 중앙차로에 비해 인도에서 PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 농도는

각각 0~22%, 3~19%, 15~44% 정도 낮았다(Ha *et al.*, 2009). 한편, 중앙버스전용차로 도입시기에 맞물려 서울시에서는 2005년 운행 경유차 저공해화 사업을 시작했고, 이 사업은 배출가스 저감장치 부착, 저공해 엔진개조, 조기 폐차를 포함했다. 2008년 정책평가에서는 2005~2007년 동안 목표했던 저감장치부착차량 장착은 72%, 엔진개조는 2008년 45%를 달성한 것으로 보고했다(KEI, 2011). 대기오염 농도와 정책달성률을 이용해서 계산한 저감비율에서는, 저감장치 부착과 저공해 엔진개조에 의한 미세먼지 감소율이 80%와 20%인 것으로 보고했다(KDI, 2007).

중앙버스전용차로의 설치로 전용차로의 교통량은 감소된 반면 주변도로의 교통량 증가로 인한 서울시 전체의 대기오염의 증가경향을 의심할 수 있다. 그러나, 발표된 연구결과로 볼 때, 인근도로 교통량은 우려한 바와는 달리 통행량이 감소하여 대기오염 농도가 낮아지는 영향을 미쳤을 가능성이 크다. 서울시 중앙버스전용차로 정책을 평가한 연구들에서는, 중앙차로 설치 전후 교통량 및 교통서비스 비교를 통해 정책 시행 후 교통량 감소 및 교통속도 증가를 보고하였다. 서울시에서 2004년 7월 개통된 3개 구간에서 정책 전후 도로교통량 변화를 분석한 결과에서는, 개통 4개월 후(2004년 11월) 중앙버스전용차로 구간의 교통량은 24.7% 감소했고, 1년 후에는 1.4% 감소로 안정화, 인접우회도로 교통량도 1년 후에는 0.3% 감소로 안정화 되었다. 또한, 교통속도에서도, 중앙버스전용차로 설치 후 혼잡시간 버스통행속도가 약 15 km/h 내외에서 20 km/h 내외로 평균 약 30% 향상됨을 보고하였다(Seoul Solution, 2014d). 서울시의 평균 차량속도 및 버스속도 또한 2004년 이후 점진적으로 증가함을 보임으로써, 교통량 감소를 간접적으로 시사하였다. 이 보고에서는 2009년 이후 개통된 중앙버스전용차로에서 도로별 버스승객수도 평균 4~7% 증가함을 보였다. 중앙버스전용차로 도입의 주요 목적은 대중교통 체계의 개선이었으나, 대기오염 저감 정책과 병행하여 시행됨으로써 부가적으로 대기오염 저감을 촉진하는 역할을 했을 것으로 판단된다.

NO₂의 경우 감소 경향성이 관찰되지 않았다. 이는 저감장치 부착사업이 미세먼지 위주로 실시되었기 때문일 수 있다. 미세먼지 배출을 줄이기 위한 배출가스 저감장치 부착사업은 대대적으로 실시된 반면, 질소산화물 저감장치부착사업은 경제성 또는 예산확보 부족으로 사업시행이 저조했다(KEI, 2011). 저감장치 부착에 따른 저감비율을 분석한 결과에서도 질소산화물은 거의 저감비율 증가가 없는 것으로 나타났다.

본 연구는 일반적으로 정책 영향 범위를 특정하기 힘든 대중교통과 환경 정책이 미친 영향력을 계량적으로 측정한다는 측면에서 의의가 있는 반면, 다음과 같은 한계점을 보완할 필요가 있다. 먼저, 이중차분법에 따라 처리 효과를 식별하기 위해서는 정책시행 이전에 처리집단과 통제집단 간의 종속변수의 추세가 평행적이어야 한다. 그러한 평행적 추세가 지속되지는 가정 하에 정책시행 이후 두 집단간 유의한 추세의 차이가 관찰된다면 그것을 처리 효과로 평가할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 처리집단과 통제집단 간에는 PM₁₀과 NO₂의 평행적 추세를 관측하기 어려웠다. PM₁₀의 경우 처리시점(2006년) 이전부터 처리집단의 추세가 더 빠르게 감소하는 경향을 보였으며, NO₂의 경우에는 특정한 경향성을 찾기 어려웠다. 이는 다음과 같은 요인에 기인하는 것으로 보인다. 먼저, 본 연구에서는 서울시 및 경기도 내의 모든 관측소의 관측자료를 분석대상으로 하므로 처음 중앙버스전용차선이 도입된 2004년이 아닌 중앙버스전용차선이 서울시내 주요 도로에 설치되었다고 판단되는 2006년을 기준으로 삼았다. 그러나 서울시내 일부 구간에 중앙버스전용차로 도입의 즉각적인 효과가 발휘되었다면 PM₁₀ 농도가 그 이전부터 처리집단에서 더 빠르게 감소할 수 있다. 또한 중앙버스전용차로 도입 외의 운행경유차 저공해화 사업 등의 대기오염 저감 정책이 2004년 이후 본격적으로 추진되었으므로 그러한 효과가 함께 포함되었을 가능성도 존재한다. 또한 서울을 오가는 버스들 중 경기지역을 운행하는 버스가 많고, 매우 제한적인 구역이나 경기도

에도 중앙버스전용차선이 설치된 지역이 있으므로 서울시의 정책 효과가 일부 경기도 지역에도 발휘되거나, 경기도 정책의 효과가 통제집단에 일부 영향력을 발휘하였을 수 있다. 또한 일평균 모형의 경우 정책시행 전을 2004년, 정책시행 후를 2014년으로 하었는데 두 시점간 차이가 커서 정책 외의 효과가 함께 반영되었을 가능성이 높다. 따라서 처리집단의 시공간적인 구분을 명확히 제시하는 후속연구가 본 연구 결과를 검증할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 중앙차로 정책 이외에 대기오염 변화에 영향을 미치는 다른 요인들을 보정하고자 날씨변수와 5개 지리변수를 모형에 포함했으나, 보정하지 못한 다른 요인들이 있을 수 있다. 후속연구에서는 대안적인 방법으로 성향점수매칭(propensity score matching)을 고려해서, 처리 통제집단 간 충분한 유사성을 확보한 결과를 탐색할 필요가 있다.

본 연구는 정책 영향 범위를 특정하기 힘든 대중교통과 환경정책의 효과를 계량적으로 분석함으로써, 정책적인 제안에 기여한다는 점에서 의의를 가진다. 중앙차선전용도로의 도입은 대규모 수행 비용이 지출되었고, 향후 확대 및 새로운 적용 가능성이 논의되는 정책이다. 정책확대 및 실시 여부를 결정하기 위해서는, 분석의 많은 한계점에도 불구하고 과학적인 자료와 방법에 근거한 현 시점에서의 평가가 필수적이다. 중앙차선전용도로 정책의 성공은 본 목적이었던 교통량 감소였지만 부가적인 영향인 대기오염 감소와 이로 인한 건강 악영향 방지도 정책의 긍정적인 평가에 반영될 수 있겠다. 본 연구결과는 대기오염 저감정책을 위한 정책 연구와 대기오염 감소를 위한 정책 마련에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2013년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2013R1A6A3A04059017, 2018R1A2B600460)과 국립

암센터의 기관고유사업(NCC-1810220-01)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Abadie, A. (2005) Semiparametric difference-in-differences estimators, *The Review of Economic Studies*, 72(1), 1-19.
- Bel, G., Holst, M. (2015) Evaluation of the impact of bus rapid transit on air pollution, *Research Institute of Applied Economics (IREA) Working Paper*, 19(1), 3-43.
- Choi, K., Choi, Y.-H., Jeong, W.-H. (2007) Quantification of air pollution mitigation with BRT introduction, *Korean Society of Civil Engineers D*, 27(1D), 9-17. (in Korean with English abstract)
- Eum, Y., Song, I., Kim, H.C., Leem, J.H., Kim, S.Y. (2015) Computation of geographic variables for air pollution prediction models in South Korea, *Environmental Health and Toxicology*, 30, e2015010.
- Ha, H.J., Cho, S.J., Kim, H.S., Go, H.S., Cho, S.S., Jung, J.H., Kim, J.H. (2009) Characteristics of air quality at the center lane and roadside and correlation between traffic volume and air pollutant, *Seoul Institute of Health and Environment Report*, 45, 144-153. (Korean)
- Hoek, G., Krishnan, R.M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J.D. (2014) Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: A review, *Environmental Health*, 12, 43.
- Jo, S.J., Kim, S.D., Jeong, J.H., Oh, H.J., Park, C.H., Kim, L.T., Kim, J.H., Kim, M.Y. (2006) Analysis of ambient air quality after launching of bus rapid transit system, *Proceeding of the 43rd Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 333-334.
- Ko, J.H., Lee, S.H., Kim, D.J. (2015) International comparative study of Seoul BRT system *The Seoul Institute*. Seoul, 67pp. (Korean)
- Korea Development Institute (KDI) (2007) Vehicle emission reduction program, 2007 program evaluation report, 1-5. (Korean)
- Korea Environment Institute (KEI) (2011) Evaluation of diesel vehicle emission reduction program in Seoul metropolitan area, 40-42, 47-58. (Korean)
- Lee, H.-K., Kim, J.-H. (2005) Travel behavior change and air quality improvement by integrating TDM measures: Focusing on BRT (bus rapid transit) and road pricing measures, *Journal of Korea Planning Association*, 40(4), 175-185. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. (2016) Median Bus Lane Network, *Seoul Transport Policy Package* (https://www.seoulsolution.kr/sites/default/files/policy/%EA%B5%90%ED%86%B5_6_85-100_%EB%B2%84%EC%8A%A4%EC%A0%84%EC%9A%A9%EC%B0%A8%EC%84%A0%EB%84%A4%ED%8A%B8%EC%9B%8C%ED%81%AC_12_sl.pdf).
- Lee, Y.K., Kim, W.S., Hong, S.M., Shin, E.S. (2014) Comparison of Air Pollution Characteristics in the Center Lane-Bus Stop and the Surrounding Areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(4), 378-386. (Korean)
- Min, K.D., Kwon, H.J., Kim, K., Kim, S.Y. (2017) Air pollution monitoring design for epidemiological application in a densely populated city, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 686.
- Ministry of environment (MOE) (2011) Guidelines for installation and management of national air quality monitoring networks. (Korean)
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2009) Integrated science assessment for particulate matter (final report), 6-1-7-98. (<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=216546>).
- Wöhrensimmel, H., Zuk, M., Martínez-Villa, G., Cerón, J., Cárdenas, B., Rojas-Bracho, L., Fernández-Bremauntz, A. (2008) The impact of a bus rapid transit system on commuters' exposure to Benzene, CO, PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City, *Atmospheric Environment*, 42(35), 8194-8203.
- Yi, S.J., Kim, H., Kim, S.Y. (2016) PM₁₀ exploration and application of regulatory PM₁₀ measurement. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 114-126. (Korean)
- Seoul Solution (2014a) The change of Seoul city air quality policy. (<https://seoulsolution.kr/ko/node/3025>)
- Seoul Solution (2014b) Low emission vehicle policy for diesel vehicles on operation. (<https://www.seoulsolution.kr/ko/node/1382>)
- Seoul Solution (2014c) CNG vehicle distribution. (<https://www.seoulsolution.kr/ko/node/1388>)
- Seoul Solution (2014d) Median bus lane. (<https://www.seoulsolution.kr/ko/node/647>)
- Seoul Statistics (2017) Seoul city CNG bus distribution status.
- Zhu, Y., Hinds, W.C., Kim, S., Sioutas, C. (2002) Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway, *Journal of Air & Waste Management Association* 52(9), 1032-1042.