

접수번호	2019- 190528_007	
지원분야	<input type="checkbox"/> 학생부문	<input checked="" type="checkbox"/> 일반부문
지원주제	<input checked="" type="checkbox"/> 자유주제	<input type="checkbox"/> 지정주제

「2019 서울연구논문공모전」

## 녹색교통지역 운행 제한 전후 대기오염 변화량 추정

- 행위자기반모형을 이용한 분석 -

신혜섭\* · 김영룡\*\*

요약 : 서울시의 대기오염은 시민 일상생활의 안전을 위협하는 중요한 요인으로 꼽힌다. 대기오염에는 여러 가지 요인이 있겠으나, 그 중 도심 내 차량 통행으로 인한 도로오염원이 차지하는 비중이 높다. 이러한 배경 하에 서울시는 교통량 감축과 대기질 개선을 위해 도심에 녹색교통진흥지역을 지정하여 오염물질 다배출차량의 운행 제한을 시범 기간을 거쳐 2019년 12월부터 본격적으로 시행할 예정이다. 이 정책이 서울시민들의 삶의 질에 직접적인 영향을 미치게 되는 만큼, 시민의 불편은 최소화하고 정책 효과는 극대화할 수 있도록 정책의 미세조정이 이루어져야 할 것이다. 이러한 문제의식에서 이 연구는 차량의 통행 및 대기오염물질 배출과 확산에 대한 구체적인 가정을 반영한 행위자기반모형(agent-based modeling)을 구축하여 녹색교통진흥지역 차량 운행제한이 대기오염물질 농도에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 정책 시행 시 일평균 대기오염물질( $\text{NO}_2$ ) 농도가 유의미하게 줄어드는 것을 확인하는 동시에, 정책의 효과가 크게 나타나는 도로와 시간대를 도출하였다. 향후 차량 운행제한의 범위, 대상, 시점 등에 대한 다양한 요구와 정책결정이 필요한 상황에서, 이 연구에 제시하는 개념적, 분석적 틀은 증거기반정책(evidence-based policy) 수립 과정에 기여할 수 있을 것이다.

주제어 : 녹색교통진흥지역, 대기오염, 행위자기반모형, 시뮬레이션, 증거기반정책

\* 케임브리지 대학교 지리학과 박사과정, 교신저자(E-mail: hs621@cam.ac.uk)

\*\* 경기연구원 연구위원(E-mail: ylkim@gri.re.kr)

## I. 서론

서울시는 전례 없는 도시 광역화 현상과 인구증가, 그에 따른 교통량의 증가로 대기질 관리에 몸살을 앓고 있다. 수도권 대기환경청 통계자료에 따르면, 지난 2010-2014년까지 평균 오염물질배출량 중에서 도로오염원이 차지하는 비중이 약 55-60%에 이르렀으며, 이는 2003년부터 2017년까지 차량등록자의 증가세와 비례하는 양상을 보였다. 도로오염원으로 인한 건강상의 피해 관련 국내역학조사는 뚜렷이 밝혀진 바 없으나, 런던남부의 대로주변에 살던 건강했던 소녀가 차량의 질소산화물( $\text{NO}_x$ )로 인해서 천식을 앓게 되고 3년 만에 사망한 영국의 사례를 보았을 때<sup>1)</sup>, 차량의 오염물질에 의한 추가피해의 심각성은 충분히 짐작 가능하다(Nyhan et al. 2016).

대기오염 농도 증가의 염려 속에서 서울시는 교통량 감축과 대기질 개선을 위해 4대문 내 도심 지역을 녹색교통지역으로 지정하여 공해차량 운행제한을 도입할 예정이다. 이 정책은 2019년 12월부터 정식으로 시행할 예정이며 배출가스 5등급으로 분류된 차량들은 녹색교통지역 내로 진입할 수 없다. 그러나 이렇게 획기적인 정책임에도 불구하고 여전히 우려의 목소리가 나오고 있다. 이는 시에서 2017년에 시행했던 미세먼지 비상저감 조치를 위한 '대중교통 무료' 정책이 미봉책으로 그쳤던 사례도 있었으며, 이번 정책의 주요방안에서도 개인단위 도로오염원의 노출에 대한 논의는 상대적으로 미약하기 때문이다. 이처럼 시민들이 일상에서 부딪히는 대기오염 노출이 검토되지 않은 상황에서 새로운 정책을 시행하게 된다면 정책의 효과성을 극대화하는데 어려움을 겪을 수밖에 없다.

사전적 정책평가 방법 중에서 모델링 기법이 정확성과 경제적 측면에서 가장 효율적이며(Belem et al., 2018), 그 중에서도 행위자기반모형이 크게 주목받고 있다. 행위자기반모형(Agent-based modelling, ABM)은 컴퓨터 시뮬레이션 모형 중 하나로, 자율적인 사고를 가진 개별행위자(개인과 집단 모두 해당)가 상호작용하며 전체 시스템에 미치는 영향을 탐색하는 모형이다(Wilensky and Rand, 2015; Crooks et al., 2019). 모형은 행위자에게 초기변수 설정 및 간단한 규칙을 부여하되 나머지는 개인의 자율적인 사고에 맡긴 후, 행태적 특성을 파악하기 때문에 다양한 탐색결과를 포착할 수 있다(Wilensky and Rand, 2015). 녹색교통지역 운행제한정책의 경우, 차량운행제한 시행 전후의 오염원 대기질 뿐만 아니라 행위자 개인의 통행패턴(대로변으로 걷는지, 공원 등 녹지지역을 통과하는지)의 차이에 따른 노출량 비교평가가 또한 가능하다.

이 연구의 목적은 행위자기반 접근법을 활용하여 서울 녹색교통지역 차량통제 정책이 시행되기 전후의 도시를 통과하는 보행자들의 잠재적 대기오염 노출 변화 여부를 추정하는 것이다. 구체적인 질문은 다음과 같다.

첫째, 녹색교통지역 내 대기질의 시공간적 특성은 어떠한가?

<sup>1)</sup> BBC, Illegal levels of air pollution linked to child's death(<https://www.bbc.co.uk/news/science-environment-44612642>)

둘째, 차량특성 및 통행패턴이 이 행위자기반모형에 어떻게 적용될 것인가?

셋째, 정책시나리오의 모의결과로 어느 정도의 대기질이 개선되었고, 개선된 장소의 특성은 어떠한가?

## II. 연구지역 및 방법

### 1. 연구지역

연구지역은 서울시 내 녹색교통지역으로 지정된 중구와 종로구 일대 16,657km<sup>2</sup>로 설정하였다. 연구지역 내 포함되는 행정동은 종로구 8개동 (사직동, 청운효자동, 삼청동, 가회동, 종로 1-4가동, 종로5-6가동, 이화동, 혜화동)과 중구 7개동 (소공동, 회현동, 명동, 필동, 장충동, 광희동, 을지로동) 이상 15개동이다. 주요도로는 세종대로 (숭례문-광화문 1700m), 남대문로 (남대문-종로1가 1350m), 통일로 (경찰청-서울역 600m), 새문안로, 을곡로, 장충단로이다. 도심지역(종로, 명동 일대)은 업무지구, 관광, 쇼핑, 그리고 부도심을 잇는 거점역할을 동시에 수행하고 있기 때문에 인구와 교통량이 항상 많고, 통행이 혼잡하며, 대기질이 좋지 않은 실정이다. 하루 평균 35만 명에 육박하는 유동인구가 드나드는 도심지역에 아무런 제한조치가 없다면 보행자와 거주자 뿐 아니라 차량탑승자까지도 대기오염으로 인한 피해를 피할 수 없을 것이다.

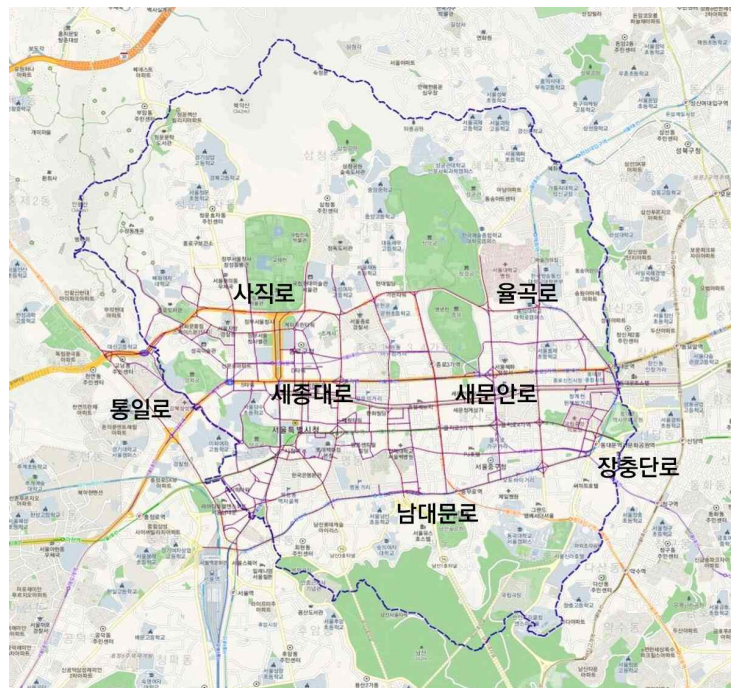


그림 1 연구지역 및 주요도로

## 2. 대기정보의 탐색

대기정보는 도시대기측정소 2곳(종로구, 중구)과 도로변측정소 2곳 (종로4가, 청계천로)의 정보를 사용하였으며, 대상 오염물질은 이산화질소( $\text{NO}_2$ )이다. 겨울철 대기오염 농도가 심각해지는 특성을 감안하여 연구 대상 기간은 2018년 1월1일 00시부터 3월 31일 23시로 정하였다. 따라서 이 기간 동안 도로주변부의 이산화질소 특성은 어떠한지, 그리고 이 농도가 도로에서 떨어진 지역과의 차이는 어떤지 이해할 수 있을 것이다. 자료정제와 기초통계분석, 그리고 시각화기법은 모두 R 3.6.0 환경 내에서 작업하였다.

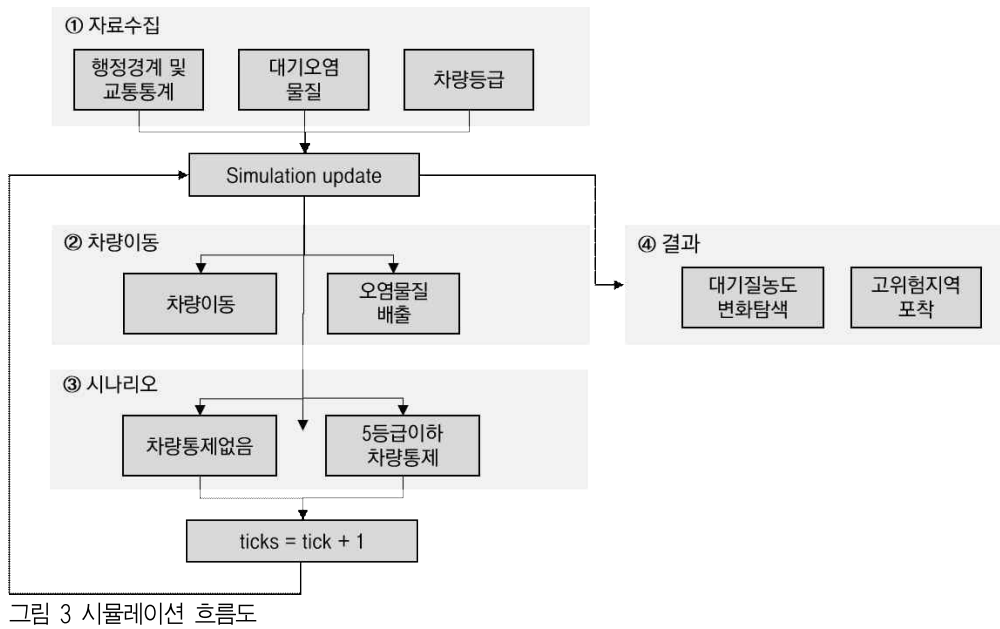


그림 2 한양도성 내 도시대기측정소(청색) 및 도로변측정소(적색)

## 3. 행위자기반모형의 설계

본 연구에서 행위자기반모형의 활용의 가치는 정책을 사전탐색할 수 있다는 것이다. 이번 논문에서는 서울시의 새 교통정책을 시범 적용한다는 것에 주안점을 두고 개념검증모형(proof-of-concept model) 구축에 주력하여 차량의 이동과 배출특성에 집중하였다.

아래 그림은 모형의 흐름도이며 이는 자료수집, 차량의 이동, 시나리오 설계, 결과 단계까지 모든 과정을 조감할 수 있는 도구이다. 행위자의 선택, 이동 및 가정, 차량통제시나리오에 대한 설명은 순서대로 기재하였다.



### 1) 행위자 선택

행위자는 통상적으로 이동행위자와 고정행위자로 분류된다. 이동행위자는 가상세계 안에서 판단하며 움직이는 객체인 반면 고정행위자는 상태가 변화하지만 한 좌표에 고정되어 있다. 사람과 건물이 대표적인 예시이다(그림4).



그림 4 행위자기반모형에 사용된 행위자 및 속성

#### ○ 이동행위자

시뮬레이션 구축이 초기단계인 점을 감안하여, 이동 행위자는 한양도성 내 진입 가능한 승용차로 설정하였으며, 대형 및 화물차량은 이번 연구에서는 고려하지 않았다. 이는 교통통제 시간 외 물류운송이 가능하다는 점을 참고하였다.<sup>2)</sup>

차량의 속성란에는 차량의 출시년도와 차량등급을 부여하였다. 이는 서울시 교통정책과의 발표와 아래 표를 참고한 것이다. 만약 해당차량이 출시년도가 2002년이고 휘발유를 사용하면 3등급을 부여받고, 2007년 경유차이면 4등급을 받게 된다. 모형 내부에서는 연료별 배출량이 서로 다르기 때문에 출시년도, 연료종류를 기준으로 한 차량등급만을 구분자로 삼아 배출량을 정하였다. 휘발유 1-2등급의 배출가스는 배출량을 1.1배로 가정하고, 3-4등급은 1.3배, 5등급은 1.7배로 설정하였다.

표 2 자동차의 등급산정 기준

등급	휘발유 / LPG		경유 / 하이브리드	
	출시년도	배출가스기준	출시년도	배출가스기준
1	2009-2016	0.019	해당사항 없음	
2	2006-2016	0.1		
3	2000-2003	0.72	2009 이후	0.353
4	1988-1999	1.93	2006	0.463
5	1987 이전	5.3	2002 이전	0.56

배출가스 기준 (g/km) = 일산화탄소(CO) + 탄화수소(OC)

자료출처: 환경부 자동차 배출가스 등급제(<https://emissiongrade.mecar.or.kr/www/ceg/cegCalcRule.do>)

모형 내 차량의 총 대수는 2018년 서울시 자동차 등록대수를 참고하였다(표3). 소유자가 한대 이상을 보유할 수 있고 관의 등록차량의 출입으로 실제 연구지역 내 통행차량 간의 오차가 발생할 수 있지만, 적어도 사용 연료별 등록차량 비율을 반영하는 것은 의미있다. 따라서 이동행위자(승용차)의 비율은 등록차량의 특성을 반영하여 휘발유 및 LPG 주유차량은 약 60%, 경유 및 하이브리드는 38%와 가깝게 유지하였다.

표 3 2018년 서울시 차량등록현황

기간	차종별	계	휘발유	경유	LPG	전기	CNG	하이브리드	기타연료
2018	계	3,124,651	1,592,471	1,147,787	284,328	9,564	9,635	75,178	5,688
	%	100	51.0	36.7	9.1	0.3	0.3	2.4	0.2
	승용차	2,658,637	1,589,567	744,280	239,192	9,507	597	75,126	368
	승합차	120,780	1,059	93,190	16,699	33	8,621	52	1,126
	화물차	337,241	1,827	302,557	28,357	23	414	-	4,063
	특수차	7,993	18	7,760	80	1	3	-	131

자료출처: 서울열린데이터광장, 서울시 자동차등록현황(연료별) 통계

(<http://data.seoul.go.kr/dataList/datasetView.do?infrId=10860&srvType=S&serviceKind=2>)

한편 도로별 차량흐름을 파악하기 위하여 서울시 교통정보시스템(TOPIS)에서 집계한 교통량을 참고하여 차량의 도심 진입 증감을 반영하였다.<sup>3)</sup> 일례로 율곡로, 을지로, 종로의 평균 교통량을 살펴보면 율곡로가 가장 많았고, 이어 을지로 종로 순이었다(그림 5). 율곡로의 교통량은 03시에 가장 낮았고, 이후 꾸준히 증가하여 10시에는 2000여대를 상회하였다. 16시 이후에는 점차 줄어들어

2) 환경부 자동차 배출가스 등급제(<https://emissiongrade.mecar.or.kr/>)

3) 서울시 차량통행속도 보고서([https://topis.seoul.go.kr/refRoom/openRefRoom\\_1\\_1.do](https://topis.seoul.go.kr/refRoom/openRefRoom_1_1.do))

23시에는 1500대 정도 통행하였다. 종로의 최저 교통량은 03시에 500여대에서 을곡로와 비슷한 시간인 10시 경에 최대를 기록하고 16시부터 줄어들었다. 을지로도 이와 같은 분포였으나 수치는 더 낮았다. 이를 반영하여 시뮬레이션 상에서는 22시부터 익일 04시까지 매시마다 10% 감소하게 하였다.

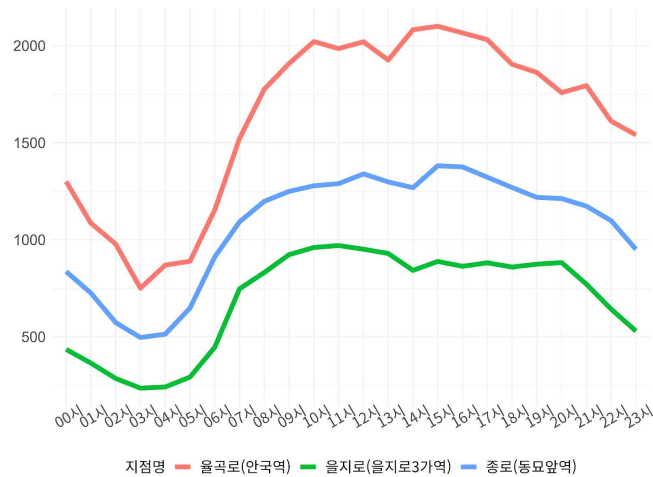


그림 5 2018년 5월 서울시 주요도로의 일별 평균 교통량 현황

#### ○ 고정행위자

첫 번째 고정행위자는 신호등(node)이다. 신호등이 녹색과 적색일 때 차량이 출발하고 정지한다. 이 연구에서는 실제 신호 길이는 반영하지 않았기 때문에 도로등급과 관계없이 임의로 신호가 변경된다. 이 때문에 가속과 감속 시에 대기가스 배출이 상당히 많기 때문에 모형 내 신호등이 집중되어 있는 곳일수록 오염물질의 농도가 높다.

또 다른 고정행위자이자 이 연구에서 주목하는 오염물질은 이산화질소( $\text{NO}_2$ )이다.  $\text{NO}_2$ 는 차량이동 시 배기가스에서 배출되는 투명한 가스로 고농도에 일정시간 이상 노출되어 있으면 심각한 두통이 올 수 있으며, 장기노출 시 COPD나 폐섬유증이 발생할 수 있다(Andersen et al., 2011; Schikowski et al., 2005). 영국 환경부(Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA) 보고서에 따르면 vehicle emission에 직접적인 효과는  $\text{NO}_x$  값을 통해서 확인할 수 있다<sup>4)</sup>. 통상적으로  $\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO} + \alpha$ 로 알려져 있지만, 계산상의 편의를 위해  $\text{NO}_x = \text{NO}_2 \times 1.91$ 로 발표하였다(DEFRA, 2003). 그러나  $\text{NO}_x$ 에 대한 대기환경기준이 설정되어있지 않은 관계로 이번연구에서는  $\text{NO}_2$  값을 사용하였다.

$\text{NO}_2$ 는 서울연구원에서 제공한 시간대 별 대기오염자료를 사용하였으며, 녹색교통진흥지역 내 도시대기측정소인 종로구와 중구, 도로변측정소인 종로와 청계천로를 추출하였다. 이번 공모에서는 모형의 설

<sup>4)</sup> Department for Environment Food & Rural Affairs, UK Air Information Resource(<https://uk-air.defra.gov.uk/>)

계에 주안을 두어 2018년 1월 1일부터 3월 31일 총 3개월의 자료로 모의하였다. 원자료는 통계분석에 사용되었으며, 모형에서는 계산능력(computing power) 및 지역적 이질성(geographical heterogeneity)을 고려하여 도시대기측정소 2곳의 주 평균값(weekly mean)에 표준편차를 더하여 각 격자에 나타내었다.

표 4 행위자기반모형에 사용된 자료의 형태와 NetLogo상의 코드(하단)

날짜	시간	평균 NO <sub>2</sub>	표준편차
Jan_week1	0	37.66667	18.14754
Jan_week1	1	34.28571	18.46589
Jan_week1	2	33	18.76166
Jan_week1	3	33.78571	18.6761
Jan_week1	4	34.21429	17.03019
Jan_week1	5	33.64286	17.53505
Jan_week1	6	34.85714	15.14472
Jan_week1	7	37.92857	12.54202

```

to calc-poll
  ask patches with[road_buffer =true][
    set no2_road (item 2 table:get no2-stat (ticks +1))+ random-float(item 3 table:get no2-stat 1)]
  
```

## 2) 행위자의 이동과 가정

행위자(차량)의 이동에 대해서는 다음과 같이 가정하였다.

- 이산화질소 배출은 차량 이동 시에만 배출된다.
- 이산화질소 배출은 차량의 배출가스 등급에 따라 차등 설정하였다.
  - \* 1-2등급: 1.1배 반경 2개 격자, 후방 60도
  - \* 3-4등급: 1.3배 반경 2개 격자, 후방 60도
  - \* 5등급 이하: 1.7배 반경 3개의 격자, 후방 90도
- 회색은 1 - 15 ticks 범위 내에서 사라지도록 설정하였다.
- 도로의 종류는 구별이 없고 차량이 자유롭게 방향을 설정할 수 있다.

모형에서 차량의 초기 값은 이전 절에 통계 값을 반영하였지만, 행위자가 자율적으로 도로를 선택하기 때문에 반드시 교통량 값과 일치하지 않는다.

## 3) 행위자(차량)의 NO<sub>2</sub> 배출특성

행위자(차량)의 배출특성은 차의 연료, 배기량, 구입년도, 도로의 특성(신호등 위치, 경사, 차선)에 따라 다르다. 한양도성은 좁은 골목길부터 대로변까지 도로등급이 다양하며, 복잡한 거리를 연결하는 신호등도 많이 분포한다. DEFRA에 따르면, 런던의 도심 도로변측정소에서는 오염물질이 평균 24m 정도로 확산되었다는 보고가 있었다.<sup>5)</sup> 본 연구에서는 확산을 최대 60m로 보고 도로에 인접한 인도 최대 2격자



까지 확산 되도록 설정하였다(그림 6). 또한 차량의 연료와 등급에 따라 오염물질의 배출범위를 그림 6의 우측과 같이 표현하였다. 오염물질 배출이 가장 적은 1-2등급 차량은 통행 시 주변2격자 후방 반경 60° 범위에 도시대기측정소 농도의 1.1배 상승하도록 설정하였고, 3-4등급은 같은 배출조건을 갖고 대기측정소 농도의 1.3배 상승하도록 설정하였으며, 5등급 이하 차량은 주변 3격자에 반경 90°에 도시대기측정소의 1.7배 상승하도록 설정하였다.

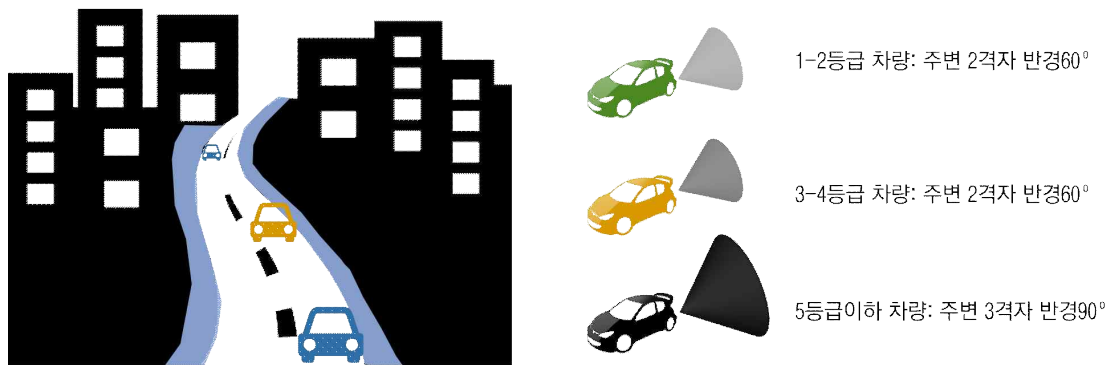


그림 6 모형에서 설정한 NO<sub>2</sub>의 영향권(좌, 2개 격자)과 차량 등급별 오염물질 배출범위(우)

#### 4) 차량통제 시나리오

연구의 핵심은 연구지역 내 주요도로(세종대로, 사직로, 퇴계로, 삼일대로, 을곡로)의 진출입로에서 (배출가스 5등급 이하) 차량통제정책을 시행했을 때, 대기질 저감의 효과성을 파악하는 것이다. 현재 서울시에서는 노후차량은 상시출입불가, 5등급이하는 09-18시까지 출입불가로 명시하였지만, 본 연구에서는 5등급이하도 상시출입불가로 간주하여 연구를 진행하였다. 이를 위해 시뮬레이션에서는 통제 시 5등급이하 차량들은 제거하였다.

#### 5) 모형 인터페이스

그림7은 서울 녹색교통진흥지역을 모의하는 NetLogo 프로그램의 초기화면이다. 좌측상단에는 자료불러오기(setup)와 시뮬레이션 모의시작(go), 단계별 모의(step)가 있으며, 배경지도 및 행정경계 GIS파일도 시각화가 가능하게 하였다.

<sup>5)</sup> Department for Environment, Food and Rural Affairs, Nitrogen Dioxide fall off with distance  
(<https://laqm.defra.gov.uk/tools-monitoring-data/no2-falloff.html>)

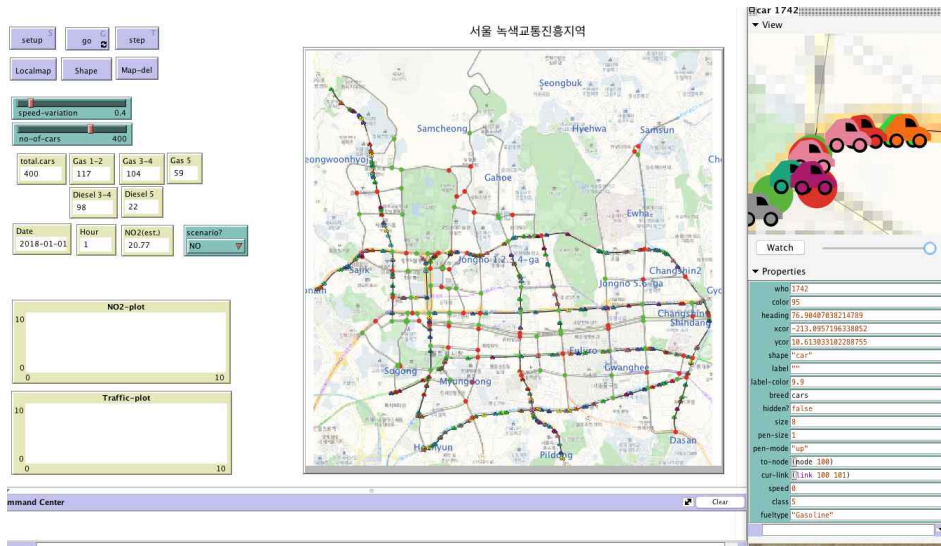


그림 7 넷로그 모형의 초기화면

## IV. 연구결과

### 1. 대기오염의 시계열 변화

2018년 1월부터 3월까지의 NO<sub>2</sub> 변화는 아래 표5와 같다. 도시대기측정소인 종로구와 중구의 평균 농도는 34-37ppb이었고 최소는 10ppb이하 최대는 87-94ppb를 기록하였다. 도로변측정소인 종로(4가)와 청계천으로는 앞선 두 측정소의 평균농도보다 약10%를 상회하는 40-43ppb를 기록하였고 최대농도는 94-110ppb에 육박하였다.

일별 평균자료의 시계열변화는 아래 그림 8에서 확인할 수 있다. 4개의 측정소의 NO<sub>2</sub> 농도는 증가와 감소를 반복하는 패턴으로 관측되었다. 최저 농도는 약15ppb 이었으며 1월 10일, 23-24일, 2월 4일과 24일이 이에 해당했다. 반대로 최고 평균농도는 60-78ppb 이었으며 1월15-16일, 2월 27일, 3월 12일, 그리고 3월 23일로 관측되었다. 도로변 측정소의 초과횟수가 도시대기측정소보다 1-2회 더 많았다.

그림 9의 4개의 상자그림 중 좌측2개는 도시대기측정소(종로구, 중구)이고, 나머지 2개는 도로변측정소 (종로(4가), 청계천로)이다. 4개 측정소 모두 04시에 최저농도를 기록하였고 (도시대기: 약 25ppb, 도로변 31ppb) 09시에 최고농도를 기록하였다 (도시대기: 약 44ppb, 도로변 53ppb). 일간 변화폭을 살펴보면 06-09시 및 18-21시에 상승하는 분포를 보였다. 4개의 측정소에서 08-22시까지 이상치 값들이 다수 분포하였다. 이는 실제 교통량이 많고 대기가 안정된 날의 NO<sub>2</sub> 농도는 언제든지 100ppb를 초과할 수 있다는 점을 시사한다.

실제 기준농도를 초과에 대한 결과는 표 6에서 확인할 수 있다. 연구기간동안 총 9건이 관측되었고, 이는 공교롭게 모두 2월 27일였다. 그중 청계천로(측정소 111124)가 7건, 종로(측정소111125)가 2건이었다. 시간대를 살펴보면 07-10시, 20-22시로 출퇴근시간에 집중되어 있었다. 앞선 대기환경초과 결과와 마찬가지로 출퇴근 시간 내 차량급증이 주요한 영향을 주었다고 볼 수 있다.

표 5 2018년 1-3월 녹색교통진흥지역 내 측정소의 요약통계량

측정소	월	관측값	평균	표준편차	최솟값	최댓값	중위수
종로	1	743	37	18.2	8	87	35
	2	672	35.3	19.9	6	94	32
	3	744	36.5	16.9	6	88	34.5
중구	1	743	34.5	18.2	7	89	34
	2	672	34.2	19.4	5	92	31
	3	744	34.9	15.5	6	84	33
종로4가	1	743	38.4	19	7	99	40
	2	672	38	21.5	7	108	36
	3	744	42.8	16.7	8	95	42
청계천로	1	743	40.9	20.4	5	94	41
	2	672	42.7	22.9	7	110	41
	3	744	43	17.8	8	94	42

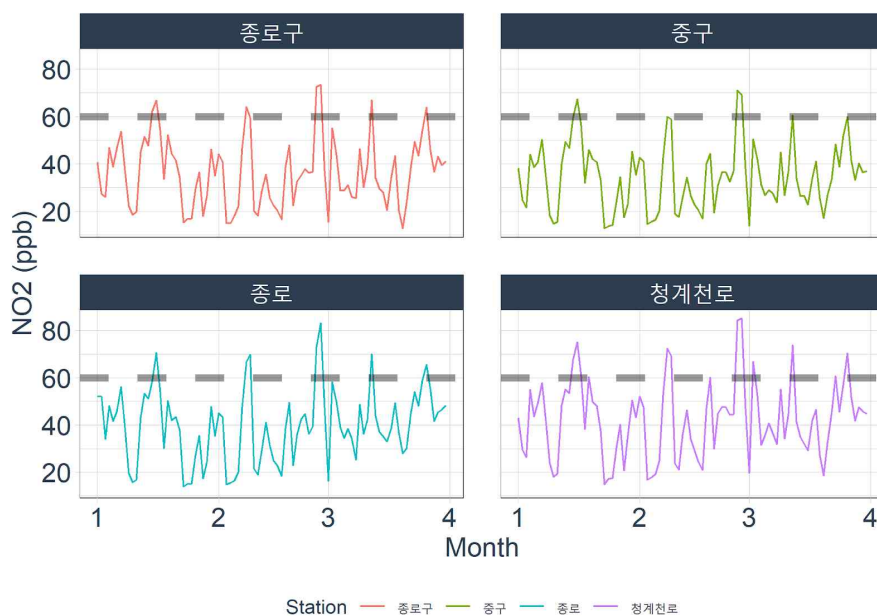
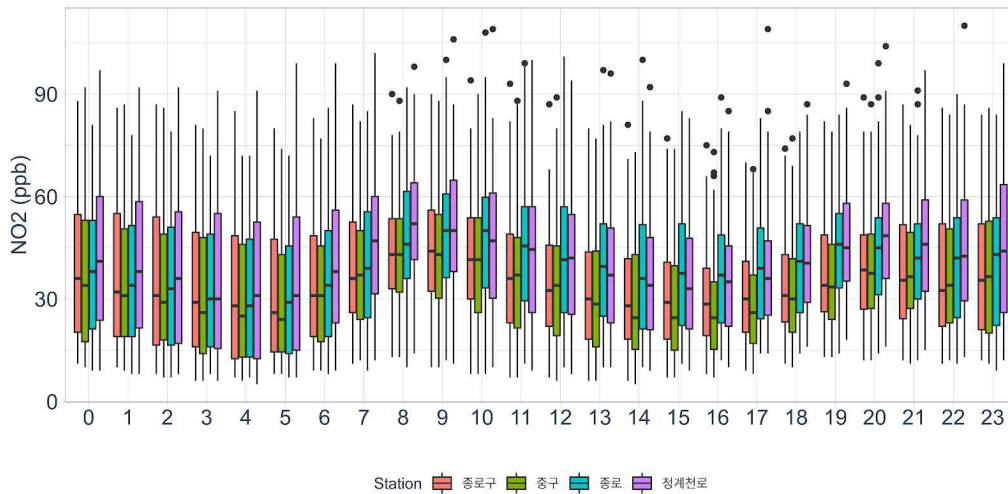


그림 8 녹색교통진흥지역 내 측정소 별 NO<sub>2</sub>의 시계열 변화 (2018.1-3)

그림 9 측정소 및 시간대 별 NO<sub>2</sub> 농도의 추이표 6 NO<sub>2</sub> 농도 100ppb 초과한 측정소명 및 시간대 분포

번호	지역	측정소명	ID	시간	NO <sub>2</sub> (ppb)
1	중구	청계천로	111124	2018-02-26 20:00	104
2	중구	청계천로	111124	2018-02-26 22:00	110
3	중구	청계천로	111124	2018-02-27 07:00	102
4	중구	청계천로	111124	2018-02-27 09:00	106
5	중구	청계천로	111124	2018-02-27 10:00	109
6	중구	청계천로	111124	2018-02-27 11:00	100
7	중구	청계천로	111124	2018-02-27 17:00	109
8	종로구	종로	111125	2018-02-27 09:00	100
9	종로구	종로	111125	2018-02-27 10:00	108

대기환경기준에 따르면 시간별 NO<sub>2</sub> 농도가 100ppb 이내일 경우 안정권임

## 2. 행위자기반모형을 활용한 녹색교통진흥지역 통제전후의 대기오염 변화

행위자기반모형을 활용한 차량통제 시나리오는 환경5등급 이하 차량의 통제정책의 효과성을 시험하는데 유효하다. 본 연구는 그중에서도 녹색교통진흥지역 내 여섯 개 대로의 NO<sub>2</sub> 농도 변화를 관찰하였다.

6개 대로에 대한 모의결과, 5등급 이하 차량통제 전의 전체 평균농도는 39.4ppb를 기록하였으며, 통제 이후에는 38.6ppb로 0.8ppb정도 저감하였다. 도로별로 살펴보면, 사직로 통제전은 39.5ppb, 통제 후 38.6로 0.9ppb 저감, 율곡로 통제 전 45.0ppb 통제 후 39.2ppb로 5.8ppb 저감, 종로는 통제 전 41.7ppb에서 통제 후 38.9ppb로 2.8ppb저감, 퇴계로는 통제 전 40.3ppb에서 통제 후 38.6ppb로 1.6ppb 저감, 세종대로 통제 전 40.2ppb에서 통제 후 38.6로 1.6ppb 저감, 삼일대로는 41.0ppb에서 38.7ppb로 2.3ppb 저감, 도로 전체는 통제 전 39.4ppb에서 통제 후 38.6로 0.8ppb 저감하였다. 정리하면 도로별로 통제효과가 0.8-5.8ppb로 다르게 타났다는 점이고, 도로등급이 낮은 곳 까지 포함한 도로평균값에서 큰 차이가 나

지 않은 것으로 보아 효과성을 입증하기에는 다소 부족할 수 있다. 그러나 모형 상에서 도로등급에 차등을 두지 않았기 때문에 이를 보완한다면 보다 현실감 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

일별평균치를 관측하였을 때는 통제전후의 농도차를 확연히 관측할 수 있다 (그림 10). 원으로 표시한 날짜는 통제전의 최고치를 기록했던 지점으로 이미 일평균 100ppb를 초과했다. 차량 통제 시나리오의 결과, 1월 16일에는 울곡로 10.8ppb, 종로 5.47ppb, 삼일대로 5ppb, 퇴계로 4.7ppb, 사직로 3.68ppb, 세종대로 3.72ppb를 각각 저감하였다. 2월 9일에는 울곡로 10.9ppb, 삼일대로 6.27ppb, 퇴계로 4.48ppb 세종대로 1.77ppb, 사직로 1.31ppb를 각각 저감하였고, 종로는 거의 변화가 없었다. 2월 27일은 울곡로 16.5ppb, 종로 9.1ppb, 삼일대로 5.3ppb, 세종대로 3.68ppb, 퇴계로 2.42ppb, 사직로 0.19ppb를 각각 저감하였다. 마지막으로 3월 27일에는 세종대로 8.6ppb, 울곡로 5.8ppb, 퇴계로 4.2ppb, 종로 3.88ppb, 삼일대로 1.46ppb를 저감하였고 사직로는 거의 변화가 없었다. 이처럼 시나리오에서는 교통량이 상대적으로 많았던 울곡로, 종로, 세종로의 농도변화는 통제 후에 10% 이상 차이가 날 정도로 두드러진 것으로 보았을 때 통제의 효과는 분명히 관찰할 수 있었다.

해당 자료를 시간 별 상자그림으로 변형시키면 농도변화와 통제 전후의 차이를 시간대 별로 포착할 수 있다. 울곡로의 경우 6개의 대로 중 통제효과가 가장 두드러진 도로였다. 09시부터 17시까지는 농도의 큰 차이가 없으나, 퇴근시간 이후인 18시부터 익일 03시까지 4-18ppb 정도의 차이를 보였으며, 평균 10ppb 이상보인 시간대는 20시부터 22시 사이인 것으로 드러났다. 울곡로는 경복궁 및 서북부 서울을 연결하는 관문역할을 할 뿐만 아니라 혜화동, 홍인지문까지 도심 주요연결고리를 담당하는 도로이기 때문에 퇴근이후에 승용차 및 대중교통편이 수시로 지나다닌 결과로 해석된다. 그림 5 내 울곡로의 두 개의 첨두(peak)패턴을 살펴보면 통제전의 교통량이 시간대별로 다른지를 설명할 수 있다. 세종대로의 평균 NO<sub>2</sub> 농도는 통제전후에 큰 효과를 보지 못했다. 다만 통제 이전 08시부터 21시까지에 관측되었던 이상치(outlier)값이 통제이후 대부분 사라진 사실을 보았을 때 세종대로의 높은 교통량의 통제효과는 분명 있었다고 추정할 수 있다.



그림 10 통제시나리오 전(No) 후(Yes)의 도로별 NO<sub>2</sub> 농도비교.(네 개의 원은 100ppb 이상 초과한 날을 의미)

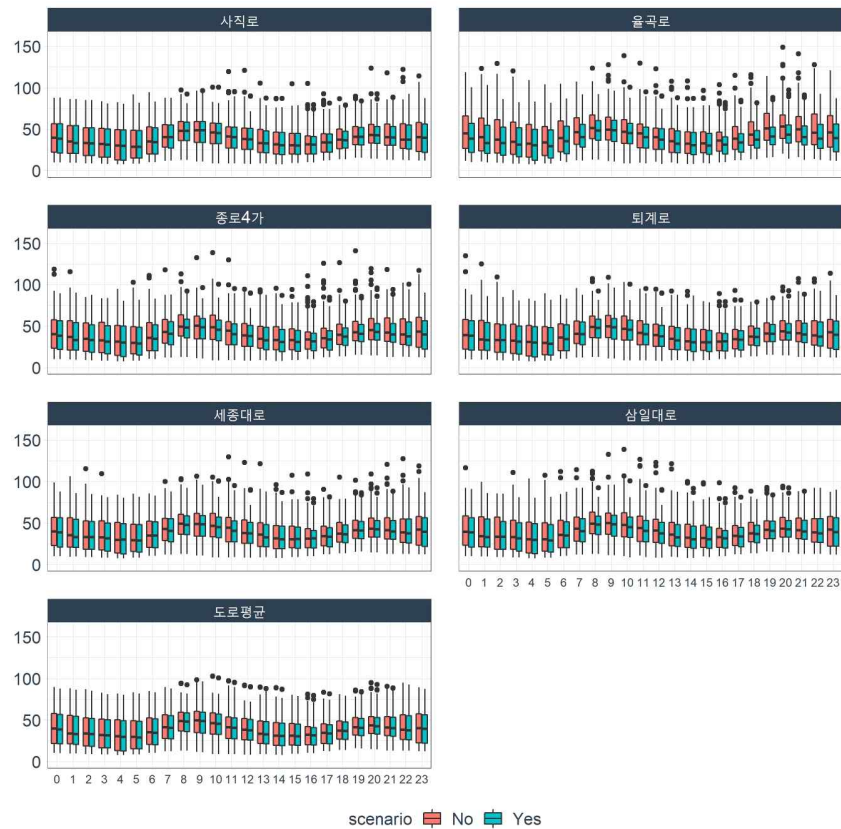


그림 11 통제시나리오 전(NO)후(YES)의 NO<sub>2</sub> 농도의 시간대 별 비교

### 3. 정책적 시사점

이 연구는 기존의 정책에 대한 보건환경평가에 근접하는 논문으로, 시뮬레이션 측정결과를 실제 녹색교통진흥지역에 대한 정책에 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 런던의 경우, 도심의 대기오염 감축을 위해 2008년 2월에 런던 전역을 대상으로 LEZ(Low Emission Zone)를 도입하였고 도심에는 도로혼잡비용(Congestion Charge Scheme, CSS)을 시행하고, 도심으로 진입하는 차량을 대상으로 통행세를 부과하였다. Holman et al.(2015)의 연구에서는 시행 후 5년 동안 대기오염 노출 위험성이 줄지 않은 것으로 발표하였고, 재고 끝에 CSS 대상 지역을 중심으로 디젤차량 통행을 전면금지하는 ULEZ(Ultra Low Emission Zone)를 2019년 4월에 도입하였다. 서울에서도 이러한 사례(Kelly et al., (2011))를 바탕으로 하여 녹색교통진흥지역을 설정하고 차량통제정책을 시행하면서 새로운 환경정책의 출발선에 서 있다.

서울 녹색교통진흥지역 내 차량통제정책 시행 시 예상되는 파장은 상당하다. 2009년 이전의 경유차 및 2000년 이전 휘발유 및 LPG차량의 출입이 전면 통제되기 때문이다. 그러나 날로 악화되어 가는 대기오염의 심각성과 하루 평균 30만 명의 유동인구를 기록하는 도심의 특성 상, 강력한 정책의 도입은 불가피해 보인다. 이미 시범 시행이 시작되고 전면 시행을 앞두고 있는 현 시점에서 더욱 중요한 문제는, 시민의 불편은 최소화하면서 정책 효과는 극대화할 수 있는 세밀한 정책 설계일 것이다. 이러한 고민은 운행제한에 대한 중장기 계획안 등(한진석 외, 2019)을 통해 상당히 진행된 만큼, 이를 뒷받침할 수 있는 구체적인 시뮬레이션 결과가 필요할 것이다. 이러한 문제의식에서 본 연구는 행위자기반모형을 이용한 시뮬레이션을 통해 차량통제정책의 효과를 예측하고자 하였다.

특히 이 연구는 이동행위자와 고정행위자를 구분하고, 차량의 통행 및 대기오염물질 배출과 확산에 대한 구체적인 가정을 통해 행위자기반모형을 구축하였다. 시뮬레이션 결과 일평균 대기오염물질 농도가 유의미하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, 이는 차량통제정책에 대한 정당성을 뒷받침하는 증거로 활용될 수 있을 것이다. 다만, 정책의 효과가 가장 크게 나타나는 것은 일평균 NO<sub>2</sub> 농도가 기준치를 초과한 4일을 기준으로 율곡로의 퇴근시간 이후라는 점 등을 고려한다면, 포괄적인 정책 적용에 대해서는 의문을 제기할 수 있다.

향후 녹색교통진흥지역의 차량통제정책은 시민들의 요구, 대기 환경의 변화, 특정 이벤트 발생 등에 따라 미세조정이 필요할 것으로 보인다. 즉 어느 등급까지의 차량을 통제할 것이냐, 어느 시간대까지 통제할 것이냐, 평일과 휴일은 다른 기준을 적용할 것이냐, 대기질에 따라 한시적인 통제 강화 및 완화가 필요할 것이냐 등에 대한 세부적인 정책적 결정이 뒤따를 것이다. 이러한 요구에 대해 증거기반정책(evidence-based policy)으로 답하려면 데이터뿐만 아니라 보다 세밀한 조건들을 설정한 시뮬레이션 결과로 뒷받침할 수 있어야 할 것이다. 비록 연구 범위를 한정하기 위해 모든 가능한 시나리오를 고려해보지는 않았지만, 이 연구에서 구축한 개념적, 분석적 틀은 향후 필요한 정책 결정 과정에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

## IV. 결론

본 연구는 서울 녹색교통진흥지역 내 차량통제 정책시행 전후의 차량통제가 지역의 대기질 향상에 주는 영향을 평가하고자 행위자기반 접근법을 사용하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 2018년 1-3월 사이 종로구와 중구의 도시대기측정소 기준 평균농도는 34-37ppb이었고 최소는 10ppb이하, 최대는 87-94ppb를 기록하였다. 도로변측정소인 종로(4가)와 청계천으로는 앞선 두 측정소의 평균농도보다 약 10%를 상회하는 40-43ppb를 기록하였고 최대농도는 94-110ppb에 육박하였다. 참고로 40ppb가 일별 농도기준 상한선이며, 시간당 농도 상한선은 100ppb이다.
- 도로변측정소에서 기준 농도를 초과한 경우가 연구기간 3개월 동안 청계천로가 7건, 종로가 2건으로 총 9건이 관측되었다. 초과시간대는 07-10시, 20-22시로 이는 실제 교통량이 많고 대기가 안정된 날의 NO<sub>2</sub> 농도는 도시대기측정소에서도 언제든지 100ppb를 초과할 수 있다는 점을 시사한다.
- 행위자기반모형을 활용한 차량통제 시나리오는 환경5등급 이하 차량의 통제정책의 효과성을 시험하는데 유효하다. 전체 도로의 평균농도는 39.4ppb를 기록하였으며, 통제이후에는 38.6ppb로 0.8ppb정도 저감하였다는 점에서 전체 평균의 변화는 미미하다.
- 6개 대로에 대한 모의결과, 도로별로 통제효과가 0.8-5.8ppb로 상이하였고, 가장 저감효과가 큰 도로는 을곡로였다. NO<sub>2</sub>가 가장 높은 4일(1월 16일, 2월 9일, 2월 27일, 3월 27일)의 자료를 비교해보면 각각 10.8ppb, 10.9ppb, 16.5ppb, 5.8ppb로 일별기준인 60ppb보다는 웃도는 수치였다. 을곡로의 도로통제가 효과를 본 이유는 다른 대로에 비하여 도로연장이 길고(3.1km), 도심과 서북부, 해화화 홍인지문을 잇는 4-6차선의 관문도로가 노후차량이 드나들 수 없게끔 조치를 취해서이다.
- 상대적으로 연장은 짧은 세종대로는 차량통제의 효과가 평균적으로 두드러지지는 않았다. 다만 통제 이전 08시부터 21시까지에 관측되었던 이상치(outlier)값이 통제 이후 대부분 사라지는 효과를 확인할 수 있었다. 이를 통해 세종대로의 교통량 급증에 따른 NO<sub>2</sub>의 일시적인 첨두현상을 완화하는 차량통제정책의 효과를 기대할 수 있다.

아직 본 연구가 초기단계에 있기 때문에 한계점이 다수 존재한다. 향후 연구에서는 다음과 같은 사항들을 추가한다면 보다 시의적절한 정책결정과정에 기여할 수 있을 것이다.

- 통제시간에 대한 조정시나리오: 현재 시에서는 5등급 차량은 09-18시, 그 이하 노후차량들은 상시 출입을 엄금하고 있다. 향후연구에서는 5등급차량에 속하는 승용차 및 승합차 출입시간대를 축소하거나, 친환경등급 3-4등급에 해당하는 차량들도 범위 내 포함시키는 시나리오를 고려할 예정



이다.

- 개인 오염물질 노출연구: 대기오염과 개인노출연구는 근래 환경독성학, 보건의료, 및 환경보건과 GIS연구 분야에서 활발히 진행되고 있다. 차량에 대한 유효성검사가 충분히 이루어진 후, 사람들의 통근통행특성을 파악하여 이를 반영하게 되면 실제 노출량과 건강의 악영향에 대한 흥미로운 결과가 생길 수 있을 것이다.

## 참고문헌

한진석 황인창 박한나 고준호 and 손원익. (2018). 지자체 교통부문 미세먼지 관리 방안 연구 : 서울시 자동차 친환경등급제를 중심으로, 수시연구보고서, 2018(8), 1 - 155

Andersen Hvidberg Jensen Ketzel Loft Sørensen ... Raaschou-Nielsen. (2011). Chronic obstructive pulmonary disease and long-term exposure to traffic-related air pollution: a cohort study. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 183(4), 455 - 461.

Belem Bazile and Coulibaly. (2018). Simulating the Impacts of Climate Variability and Change on Crop Varietal Diversity in Mali (West-Africa) Using Agent-Based Modeling Approach. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 21(2), 8. <https://doi.org/10.18564/jasss.3690>

Crooks Malleson Manley and Heppenstall. (2019). Agent-Based Modelling and Geographical Information Systems: A Practical Primer (Spatial Analytics and GIS) (1st ed.). SAGE Publications Ltd.

DEFRA. (2003). Conversion Factors Between ppb and  $\mu\text{g m}^{-3}$  and ppm and  $\text{mgm}^{-3}$ . Retrieved from [https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat06/0502160851\\_\\_Conversion\\_\\_Factors\\_\\_Between\\_\\_ppb\\_\\_and.pdf](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat06/0502160851__Conversion__Factors__Between__ppb__and.pdf)

Halonen Blangiardo Toledano Fecht Gulliver Anderson ... Tonne. (2016). Long-term exposure to traffic pollution and hospital admissions in London. Environmental Pollution, 208, 48 - 57. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.051>

Kelly Armstrong Atkinson Anderson Barratt Beevers ... Mudway. (2011). The London low emission zone baseline study. Research Report (Health Effects Institute), (163), 3 - 79.

Mastio Zargayouna Scemama and Rana. (2018). Distributed agent-based traffic simulations. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 10(1), 145 - 156.

Nyhan Grauwin Britter Misstear McNabola Laden ... Ratti. (2016). "exposure track" - The impact of mobile-device-based mobility patterns on quantifying population exposure to air pollution. Environmental Science and Technology, 50(17), 9671 - 9681.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02385>

- Nyhan Sobolevsky Kang Robinson Corti Szell ... Barrett. (2016). Predicting vehicular emissions in high spatial resolution using pervasively measured transportation data and microscopic emissions model. *Atmospheric Environment*, 140, 352 - 363.
- Schikowski Sugiri Ranft Gehring Heinrich Wichmann and Krämer. (2005). Long-term air pollution exposure and living close to busy roads are associated with COPD in women. *Respiratory Research*, 6(1), 152.
- Wilensky and Rand. (2015). *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. MIT Press.