강우가 차량통행패턴을 통해 대기질에 미치는 영향 모형화

곽하영¹ · 고준호² · 이승호³ · 조창현¹

¹경희대학교 지리학과 · ²서울연구원 세계도시센터 · ³건국대학교 지리학과
(2015년 6월 8일 접수, 2015년 6월 22일 수정, 2015년 6월 22일 게재 확정)

A Modeling of the Rainfall's Impact on the Air Quality via Changes of Vehicle Travel Pattern

¹Ha-Young Kwak · ²Joonho Ko · ³Seungho Lee · ¹Chang-Hyeon Joh

¹Department of Geography, Kyung Hee University

²Megacity Research Center, The Seoul Institute

³Department of Geography, Konkuk University

(Received 8 June 2015, Revised 22 June 2015, Accepted 22 June 2015)

Abstract : The extreme weather conditions negatively affect the traffic flow performance, and the change of traffic systems has significant impacts on the air pollutant emission. This study identifies the correlation between rainfall, traffic volume, travel speed and air pollution concentration (NO₂ and PM₁₀) in Seoul. We employed a path analysis using rainfall data from Korea Meteorological Administration and Seoul's air quality and traffic monitoring data in July and August on 2014. It is found that the occurrence of rainfall decreases NO₂ and PM₁₀ concentration due to the higher washing effect, while rainfall increases NO₂ and PM₁₀ concentration via the changes in traffic volume and traffic speed. The analysis of the rainfall intensity reveals that the rainfall increases NO₂ concentration due to the traffic volume increase and the traffic speed reduction if an hourly rainfall is more than 5mm. It is to note that the current model succeeds in identifying the relationship between weather conditions, traffic flow performance and air pollution in a unified and consistent framework, which can be used for better predicting the changes in air pollution concentration.

Key Words : rainfall, traffic volume, travel speed, air quality, path analysis

주요어 : 강우량, 통행량, 주행속도, 대기질, 경로분석

1. 서론

서울시의 대기환경은 인구, 자원, 각종 시설 등 도시 활동의 집중으로 인해 열악하다. 국립환경과

학원이 발표하는 국가 대기오염물질 배출량에 따르면(National Institute of Environmental Research, 2012), 특히 서울시 도로이동오염원에 의한 대기 오염배출은 전체의 50.1%로 가장 많은 비율을 차

지하는 주요 원인으로 평가되고 있다. 이에 관련하여 중앙정부 및 서울시는 환경친화적인 교통수요관리, 저공해 자동차 사업 등 자동차 관련 대기환경 개선 정책을 시행하고 있으나 아직 기대만큼의 효과를 얻지 못하고 있다. 효율적인 대기오염 배출 저감 정책 시행을 위해서는 통행행태의 변화가 주는 영향에 대한 이해가 필요하다. 특히 기상변화시 사람들의 통행행태가 변하게 되고 이에 따라 교통흐름이 일상과 차이를 보여 대기오염 배출에 영향을 미치게 될 것이다. 또한 도로이동오염원은 장기적인 관점에서 향후 이상기후를 초래하는 원인으로 작용하여 교통시스템에 다시 영향을 미치게 되는 순환 관계를 가진다.

이와 관련된 기존 연구는 기상요인에 따른 교통류 변화 분석, 교통과 대기질의 상관성 분석과 강수에 의한 대기오염 세정효과 연구 등으로만 한정되어, 기상조건-교통-대기질의 상관성을 통합적으로 분석한 연구는 찾아보기 힘들다. 이러한 배경에서 본 연구는 기상청에서 제공하는 강우량과 서울시에서 구축되어 수집되고 있는 대기 및 교통 모니터링 자료를 활용하여 세 변수간의 연관성을 파악하고자 한다.

2. 관련연구에 대한 검토

본 연구에서는 강우에 따른 차량통행패턴 변화가 대기오염에 미치는 영향을 분석하고자 기상조건과 통행행태 간 관계에 대한 연구와 교통과 대기질 간의 상관성에 관련된 국내 연구를 위주로 살펴보고자 한다. 먼저 기상조건과 교통조건·통행특성에 관한 연구로 Baek *et al.* (2008)은 강우가 차량통행 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 2006년 1년간 전국적 강우일의 고속도로 차량통행 특성을 분석하고 강우일과 비강우일의 차종별 통행량, 총

통행거리, 평균통행거리를 비교 분석하였다. 분석결과 강우일의 통행량 및 통행거리는 비강우일 때보다 감소한다는 것을 확인하였으며, 강우량 증가에 따라 1종은 단거리 통행이 민감하게 반응하여 단거리 차량의 통행량이 줄고, 2~5종은 전반적으로 통행량이 감소하는 경향을 보임을 언급하였다. Sohn *et al.* (2013)은 강설 및 안개 발생 등으로 인한 기상 악화 시 시정거리 감소가 교통량과 속도에 미치는 영향을 분석하고자 시정거리 수준을 5단계로 분류하였고, 그에 따라 시정거리 수준별로 교통량과 속도 차이가 있는 것으로 분석되었다. Choi *et al.* (1999)은 올림픽대로 교통관리시스템의 영상검지기를 통해 수집된 현장 조사 자료를 이용하여 분석한 결과 단위시간당 최대 통과교통량을 뜻하는 교통류율은 비가 올 경우 맑은 날에 비해 약 16% 정도 감소하였고 속도-교통류율 간의 관계는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 해외 연구로는 Hassan *et al.* (1999)에 따르면 폭우 발생시 주말에는 교통량이 약 4% 감소하고 강설 발생시 평일에는 10%, 주말에는 15% 감소한다고 하였다. Agarwal *et al.* (2005)는 Twin cities 주변의 도시고속도로를 대상으로 도로 표면 감지 시스템과 도로기상정보시스템을 이용하여 4년 동안 교통자료를 수집하였고 분석 결과 속도는 강우량 0.01in/hr 미만, 0.01~0.25in/hr, 0.25in/hr 이상에서 각각 1~2%, 2~4%, 4~7% 감소하는 것으로 나타났다.

교통과 대기질의 상관성에 관한 연구로, Ko *et al.* (2009)은 서울시에서 구축해 온 2005~2007년 3년간의 대기오염 자료(CO, NO, NO₂, PM₁₀) 및 교통모니터링 자료들을 활용하여 상관성을 살펴본 결과 NO, NO₂가 타 오염물질에 비해 교통량과 높은 상관관계를 보였으며, 오전시간대, 강수 다음날의 자료를 사용한 경우 그 상관성이 높아지는 것을 확인하였다. Cho *et al.* (2009)은 대기오염배출(NO₂, SO₂, CO)을 예측하는 모형의 설명변수

를 교통특성인자(교통량, 속도), 도로특성인자(차로 수, 영향권, 교차로 형태), 기상특성인자(풍속, 온도, 습도) 등으로 설정하여 예측 회귀 모형식을 구축하여 상관관계를 알아보았다. 분석 결과 NO_2 모형이 가장 설명력이 높게 추정되었다. Park *et al.* (2001)은 기존의 차종별 일일 평균주행거리에 의한 배출량 산정과 이보다 정확하게 예측하고자 강남구 지역에 설치된 실시간 교통정보 중 통과교통량과 통과속도 자료를 활용하고 도로의 길이와 시간대별 평균주행속도에 따른 배출계수를 고려하여 배출량 산정 모형을 비교, 분석하였다.

그밖에 일반적으로 대기오염물질의 농도는 오염물질 배출량뿐만 아니라 강우의 세정효과와도 관련이 있다는 것이 선행연구에서 밝혀진 바가 있다. Kim *et al.* (2012)은 2000년부터 2009년까지의 강수에 의한 PM_{10} , NO_2 농도의 변화패턴을 분석하였고 NO_2 보다 PM_{10} 에서 저감 효과가 뚜렷하게 나타났다. 일반적으로 강수량이 많을수록 세정율이 높아지고 일강수량이 5mm 이하일 때 PM_{10} 의 세정율은 15.9%를 보였으며, 50mm 이상일 경우에는 46.3%이었다. 한편, NO_2 의 경우 일강수량이 5mm 이하일 때 세정율은 12.8%이었으며, 50mm 이상일 경우에는 29.8%이었다.

이상의 국내 기상조건에 따른 교통패턴의 변화에 대한 연구는 대부분 고속도로를 대상으로 교통흐름의 변화를 분석하였고 분석 결과, 기상악화의 종류에 따라 교통특성에 미치는 영향 정도가 연구별로 상이하지만 통행량, 주행속도, 교통류율에 부정적인 영향을 미친다는 사실이 증명되었다. 자동차에서 배출되는 오염물질 산정은 대기오염 배출계수를 사용하거나 실시간 대기오염 데이터를 활용하는 방법이 활용되었고 배출오염물질 특성에 따라 상관성의 차이를 보였다. 이에 본 연구에서는 강우가 직접적으로 대기질에 미치는 영향과 차량통행패턴이 달라지면서 간접적으로 대기질에 미

치는 영향 정도를 분석하기 위하여 강수량, 교통량, 주행속도와 대기오염의 관계를 계량화하였다.

3. 자료 및 연구 방법

1) 분석 자료

본 연구는 서울에서의 강우가 연중 비교적 잦은 7, 8월을 선정하여(Kim *et al.*, 2008), 강우발생이 교통량과 속도의 차량통행패턴 변화를 통해 대기질에 미치는 영향을 살펴보았다. 연구기간은 2014년 7월 15일부터 8월 28일까지 요일 특성에 최대한 영향을 받지 않는 화, 수, 목요일을 선정하였다. 서울은 1퍼센타일을 제외한 모든 퍼센타일의 미우에 해당하는 강수 사상에서 발생하는 강수량의 비율이 가장 낮은 지점이지만, 호우에 의한 강수량의 비율은 가장 높은 지점이라는 특징이 있다(Choi *et al.*, 2011).

분석을 위해서는 기상청에서 제공하는 강우자료와 서울시에서 구축되어 수집되고 있는 대기측정소 자료 중 도시 대기측정소 25개, 도로변 측정소 15개를 활용하였다. 또한 대기오염물질 배출량에 영향을 미칠 수 있는 속도측정 자료(TOPIS, 서울교통정보센터)와 교통량자료(서울지방경찰청)를 이용하여 서울시 전역의 121개 지점을 분석하였다. 교통량은 차량검지기를 매설하고 교통량측정기를 설치하여 특정 지점에서 측정되고, 주행속도 조사방식은 영업용 택시 위치정보(GPS)/버스 위치정보(GPS)연계를 통해 구간별로 수집이 이루어진다. 따라서 교통량 측정지점에 해당하는 지점을 포함한 구간의 속도를 추출하였다. 조사지역 선정은 강우-교통-대기질의 상관성을 분석하기 위해 교통과 대기질 측정지점의 이격거리를 계산하였고, 대기오염 농도가 도로이동 오염원에 의해 영향받았다고 분석하는 데 적합하도록 측정지점의

Figure 1. Distribution of the weather stations, traffic stations and air-quality stations in Seoul City.

Figure 2. Distribution of the selected weather stations, traffic stations and air-quality stations in Seoul City.

이격 거리가 1km 이내인 지점들을 추출하였고 추출된 측정지점이 해당하는 구의 기상청 날씨 측정 지점들을 선별하였다. 또한 측정단위는 시간당으로 강우량, 교통량, 속도, 대기질 등의 자료가 수집되었다(Figure 1 및 Figure 2 참고).

2) 연구 방법

본 연구에서는 강우가 직접적으로 대기오염물질을 세정하는 효과와 강우가 차량통행패턴을 변화시켜 교통량과 주행 속도가 달라지면서 대기오염물질 배출에 미치는 영향을 통합적으로 분석하고자 경로 분석을 실시하였다. 경로분석은 여러 변수 간의 인과관계를 설명하는 기법으로 변수들 간의 직접적인 관련성만 파악하는 것이 아니라 중간의 매개변수를 통한 간접효과를 파악할 수 있는 분석이다.

경로분석을 사용하기 위해서는 변수들 간의 인과적 순서가 밝혀져 있어야 하는데 앞서 살펴본 강우, 교통량, 주행속도, 대기질의 상관관계를 다른 선행연구와 이론적 고찰을 바탕으로 경로모형을

Figure 3과 같이 설정하였다. 경로모형은 강우가 대기질에 직접 영향을 미치고 강우 발생시 교통량과 주행속도가 변화하여 간접적으로 대기질에 영향을 미치는 것으로 가정하고 있다. 즉, 독립변수는 강우량, 매개변수는 교통량과 주행속도로 하였고 자동차에 의한 대기오염물질 중 대표적인 NO_2 과 PM_{10} 의 양을 종속변수로 구성하였다.

국립환경과학원에서 제공하는 2012년 배출량 자료에 따르면, NO_x 는 대부분 고온 연소 과정에서 생성되어 대기 중으로 배출되는데, 배출량 중 도로이동오염원에 의한 서울시 NO_2 배출량은 44% 정도를 차지한다. 또한 PM_{10} 은 대기 중에 있는 먼지 입자 중에 직경 $10\mu\text{m}$ 이하인 미세먼지를 의미하고 서울시 PM_{10} 배출량의 45% 정도가 도로이동오염원에 의한 것이다. 대기오염물질 NO_2 와 PM_{10} 에 관하여 강우, 교통량, 주행속도에 대해 제시한 모형이 인과관계를 설명하는지, 그리고 강우가 각 경로를 통하여 구체적으로 어느 정도 영향을 미치는지를 경로계수를 통해 파악하였다.

Figure 3. Path analysis model.

4. 분석 결과 및 고찰

1) 전체 데이터를 활용한 경로분석 결과

(1) NO₂

NO₂에 대한 강우, 교통량, 주행속도 변수들의 총효과, 직접효과, 간접효과를 요약해서 제시하면 Figure 4와 Table 1과 같다. 각 변수가 미치는 효과를 분석한 결과는 모든 경로계수가 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 강우 발생시 교통량은 감소하게 되며($\beta = -0.019$), 강우가 속도에 미치는 직접적인 효과는 $\beta = -0.017$ 이고, 강우가 교통량을 감소시켜 속도에 미치는 간접적인 효과는 $\beta = 0.002$ 로 총효과는 $\beta = -0.015$

Figure 4. Path Analysis for NO₂.Table 1. Rainfall's direct effects, indirect effects and total effects for NO₂ model.

Division		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects
Traffic volume	Rainfall	-.019**	.000	-.019*
	Speed	-.116***	.000	-.116***
NO ₂	Rainfall	-.050***	.004*	-.046**
	Traffic volume	.059***	.041*	.101**
	Speed	-.356***	.000	-.356**

Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

로 나타난다. 또한 교통량이 증가하면 주행속도는 감소하고($\beta = -0.116$), 교통량이 NO₂에 직접적으로 미치는 효과는 $\beta = 0.059$ 이고, 교통량이 늘어나면 속도가 감소하여 NO₂에 미치는 간접 효과는 $\beta = 0.041$ 로 총효과는 $\beta = 0.101$ 이 된다.

주행속도가 NO₂에 미치는 영향은 $\beta = -0.356$ 로 높은 부(-)의 효과를 보인다. 이에 따라 강우가 NO₂에 미치는 직접적인 효과는 $\beta = -0.05$ 이며 간접효과는 강우→교통량→NO₂(-0.019×0.059), 강우→속도→NO₂(-0.017×-0.356), 강우→교통량→속도→NO₂($-0.019 \times -0.116 \times -0.356$) 경로의 합으로 $\beta = 0.004$ 이고, 총효과는 $\beta = -0.046$ 로 나타났다. 즉, 강우의 세정효과가 NO₂ 농도에 미치는 부(-)의 효과는 교통량과 속도의 관계를 통한 정(+)의 효과보다 커 결국 NO₂ 농도가 감소하

는 것으로 분석되었다.

(2) PM₁₀

경로분석 결과는 Figure 5 및 Table 2와 같이 제시되고 모든 경로가 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 통계적으로 유의하게 분석되었다. 강우→교통량, 강우→속도, 교통량→속도 경로계수는 NO₂ 경로모형 결과 값과 동일하게 나타난다. 교통량이 속도를 매개로 PM₁₀에 미치는 간접효과는 $\beta=0.002$ 이고 직접효과는 $\beta=-0.018$ 로 총효과는 $\beta=-0.016$ 이다. 주행속도가 PM₁₀에 미치는 영향은 $\beta=-0.020$ 로 속도가 감소하면 PM₁₀ 농도는 증가한다. 강우가 교통량과 속도를 매개로 PM₁₀에 미치는 간접효과는 $\beta=0.001$, 직접효과는 $\beta=-0.137$ 로, 총효과는 $\beta=-0.136$ 으로 각각 나타나 NO₂의 경우와 마

Figure 5. Path Analysis for PM₁₀.

찬가지로 강우의 세정효과는, PM₁₀ 농도에 미치는 부(-)의 효과가 교통량과 주행속도의 관계를 통한 정(+)의 효과보다 커, PM₁₀의 농도를 감소시키는 것으로 분석되었다.

2) 시간당 강우수준을 적용한 경로분석 결과

강우가 차량통행패턴 변화를 매개로 대기질에 미치는 효과와 직접 대기질에 미치는 효과를 시간당 강우 수준에 따라 분석하고자 하였다. 도로용량편람(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013)에 따르면, 강우 수준을 0mm/h, 0~5mm/h, 5~10mm/h, 10mm 이상으로 구분하였다. 본 연구에서는 강우량이 5mm/h 이상인 경우는 표본의 수가 505개로 5mm/h 이상의 강우량을 세분화하여 분류하는 것은 통계적으로 유의하다고 보기 어렵다는 판단 하에 0mm 이상 5mm 미만인 경우와 5mm 이상 발생한 경우를 나누어 살펴보았다.

(1) NO₂

시간당 강우량이 5mm 미만일 경우와 5mm 이상일 경우 NO₂에 대한 경로분석 결과는 각각 Table 3, Table 4와 같이 제시된다. 강우가 교통량에 미치는 효과는 시간당 강우량이 5mm 미만일 경우 $\beta=-0.038$ 로, 강우가 발생하면 교통량이 감소하게 된다. 반면 시간당 강우량이 5mm 이상일 경우,

Table 2. Rainfall's direct effects, indirect effects and total effects for PM₁₀ model.

Division		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects
Traffic volume	Rainfall	-.019**	.000	-.019*
	Speed			
Speed	Rainfall	-.017**	.002*	-.015**
	Traffic volume	-.116***	.000	-.116**
PM ₁₀	Rainfall	-.137***	.001**	-.136**
	Traffic volume	-.018**	.002**	-.016**
	Speed	-.020**	.000	-.020**

Note: * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$

강우발생이 교통량에 미치는 총효과가 $\beta=0.084$ 로 교통량이 증가하게 된다. 시간당 강우량이 5mm 미만일 경우, 강우가 속도에 미치는 효과는 간접 효과는 $\beta=-0.002$, 직접효과와 총효과는 유의하지 않았고, 시간당 5mm 이상 강우가 발생하면 강우가 속도에 미치는 직접적인 영향은 $\beta=-0.126$ 이고 교통량을 매개로 속도에 미치는 간접효과는 $\beta=-0.006$ 으로 총효과는 $\beta=-0.132$ 로 나타났다. 교통량이 속도에 미치는 효과는 5mm 미만의 강우 발생시 $\beta=-0.117$ 으로 교통량이 증가할수록 속도가 감소하고 5mm 이상인 경우에는 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 시간당 강우량이 5mm 미만일 경우 교통량이 증가하여 NO₂에 직접적으로 미치는 효과는 $\beta=0.057$ 이고, 교통량이 증가함에 따라 주행속도가 감소하여 NO₂에 미치는 간접적인 효과는 $\beta=0.042$ 로 총효과는 $\beta=0.099$ 으로 나타나고 5mm 이상인 경우는 NO₂에 직접적으로 $\beta=0.106$ 의 효과를, 간접적으로 $\beta=0.028$ 의 효과를 보여 총

0.0134의 영향을 미친다. 시간당 강우량이 5mm 미만일 경우, 주행속도가 NO₂에 미치는 영향은 $\beta=-0.356$ 로 높은 부(-)의 효과를 보이고 속도가 시간당 강우량이 5mm 이상일 경우에도 $\beta=-0.358$ 로 속도 감소는 NO₂ 농도 증가에 높은 영향력을 미친다고 분석되었다.

결과적으로 시간당 강우량이 5mm 미만일 때는 강우가 NO₂에 대하여 간접적으로 미치는 효과($\beta=-0.002$, $p=0.304$)로 유의하지 않았으나 직접 효과($\beta=-0.024$, $p<0.001$)가 추가되면 총효과는 $\beta=-0.026$, $p=0.014$ 로 나타나 5mm 미만의 강우발생은 NO₂를 감소시킨다는 것을 알 수 있다. 반면 5mm 이상 강우가 발생한 경우에는 직접효과($\beta=0.048$, $p=0.252$)는 유의하지 않았으나 교통량과 속도의 관계를 통한 간접효과($\beta=0.056$, $p=0.01$)가 추가되면 총효과가 $\beta=0.104$, $p=0.019$ 로 유의하였고, 이는 5mm 이상의 강우의 세정효과는 NO₂ 농도에 유의한 영향을 미치지 못하며 통행량과 속

Table 3. Direct effects, indirect effects and total effects of the rainfall less than 5mm/h for NO₂ model.

Division		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects
Traffic volume	Rainfall	-.038***	.000	-.038**
Speed	Rainfall	-.004	-.002**	.001
	Traffic volume	-.117***	.000	-.117**
NO ₂	Rainfall	-.024***	-.002	-.026**
	Traffic volume	.057***	.042**	.099**
	Speed	-.356***	.000	-.356**

Table 4. Direct effects, indirect effects and total effects of the rainfall more than 5mm/h for NO₂ model.

Division		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects
Traffic volume	Rainfall	.084*	.000	.084*
Speed	Rainfall	-.126**	-.006*	-.132**
	Traffic volume	-.077	.000	-.077*
NO ₂	Rainfall	.048	.056**	.104*
	Traffic volume	.106**	.028*	.134**
	Speed	-.358***	.000	-.358**

Table 5. Direct effects, indirect effects and total effects of the rainfall less than 5mm/h for PM₁₀ model.

Division		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects
Traffic volume	Rainfall	-.038***	.000	-.038**
Speed	Rainfall	-.004	.004**	.001
	Traffic volume	-.117***	.000	-.117**
PM ₁₀	Rainfall	-.141***	.001**	-.140**
	Traffic volume	-.024***	.002*	-.022**
	Speed	-.016*	.000	-.016*

Table 6. Direct effects, indirect effects and total effects of the rainfall more than 5mm/h for PM₁₀ model.

Division		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects
Traffic volume	Rainfall	.084*	.000	.084*
Speed	Rainfall	-.126**	-.006*	-.132**
	Traffic volume	-.077	.000	-.077*
PM ₁₀	Rainfall	-.119*	.049**	-.070*
	Traffic volume	.031	.027*	.057
	Speed	-.349***	.000	-.349**

도를 매개로 NO₂ 농도 증가에 미치는 효과가 높다는 것을 보여준다. 이 같은 결과는 강수에 의한 대기 중 오염물질의 세정은 초기 강수 시 더 효율적이라고 보고한 Koester and Hites(1992), Lim *et al.*(2013)의 연구 결과와 합치한다.

(2) PM₁₀

시간당 강우량이 5mm 미만일 경우와 5mm 이상일 경우 PM₁₀에 대한 경로분석 결과는 각각 Table 5, Table 6과 같이 제시된다. 시간당 강우량이 5mm 미만과 이상일 경우, 강우→교통량, 강우→속도, 교통량→속도에 미치는 경로계수는 NO₂ 분석과 동일하게 나타난다. 교통량이 PM₁₀에 직접적으로 미치는 효과는 시간당 강우량이 5mm 미만일 경우, $\beta=-0.022$ 이고 교통량이 늘어나면 속도가 감소하여 PM₁₀에 미치는 간접효과는 $\beta=0.002$ 로, 총효과는 $\beta=0.057$ 이 된다. 5mm 이상인 경우는 교통량이 PM₁₀에 미치는 총효과는 유의

하지 않았다. 시간당 강우량이 5mm 미만일 경우, 주행속도가 PM₁₀에 미치는 영향은 $\beta=-0.016$ 이고 시간당 강우량이 5mm 이상일 경우에는 $\beta=-0.349$ 로 높은 부(-)의 영향을 미친다. 5mm 미만일 때는 강우가 PM₁₀에 대한 직접효과는 $\beta=-0.141$, $p<0.001$ 로 유의하고 간접효과는 $\beta=0.001$, $p=0.01$ 로 총효과는 $\beta=-0.140$, $p=0.001$ 로 나타났다. 또한 5mm 이상 강우가 발생한 경우에는 PM₁₀에 대한 직접효과는 $\beta=-0.119$, $p=0.005$ 이고 교통량과 속도의 관계를 통한 간접효과는 $\beta=0.049$, $p=0.01$, 총효과는 $\beta=-0.070$, $p=0.039$ 로 유의하게 나타났다.

PM₁₀에 대해서는 시간당 강우량이 5mm 미만과 이상일 경우 모두 강우의 세정효과가 통행량과 속도를 통해 PM₁₀ 농도 증가에 미치는 영향보다 높아 PM₁₀ 농도를 감소시킨다는 것을 알 수 있다. 이는 Lim *et al.*(2002, 2012, 2013)이 강수 시에는 입자상 물질인 PM₁₀의 세정효과가 가스상 물질인 NO₂보다 더 크다고 보고한 것과 일치한다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 강우, 교통량, 주행속도, 대기오염물질 간의 인과관계와 영향 정도를 파악하고자 서울시에서 수집한 대기질, 교통자료와 대기측정소와 교통측정지점이 1km 이내로 선별된 지점의 해당 구의 날씨 정보를 종합한 자료를 이용해 경로모형을 설정하여 분석하였다.

전체 데이터를 활용한 경로분석은 모든 경로계수가 유의하였고, 강우발생은 직접효과와 차량통행패턴 변화를 통한 간접효과를 통해 NO_2 와 PM_{10} 에 부(-)의 효과를 나타냈다. 또한 교통량이 증가하면 NO_2 의 농도는 증가하지만($\beta=0.101$), PM_{10} 은 오히려 감소효과($\beta=-0.016$)를 보이는 것으로 나타났다. 속도는 NO_2 에 높은 영향($\beta=-0.356$)을 미치지만 PM_{10} 에는 미미한 영향력($\beta=-0.020$)을 보였다.

시간당 강우량을 적용한 분석 결과, NO_2 에 대해서는 5mm 미만일 때와 이상인 경우 강우가 대기질에 미치는 총효과가 상반되게 분석되었다. 5mm 미만일 때는 강우가 NO_2 에 미치는 총효과가 $\beta=-0.026$, $p=0.014$ 로 나타나 NO_2 를 감소시킨다는 것을 알 수 있는 반면, 5mm 이상 강우가 발생한 총효과는 $\beta=0.104$, $p=0.019$ 로, 5mm 이상의 강우는 오히려 통행량과 속도를 통한 NO_2 농도에 미치는 효과가 높아 NO_2 의 농도를 증가시킨다고 분석되었다. PM_{10} 에 대해서는 시간당 강우 수준에 상관없이 강우가 PM_{10} 의 농도를 감소시킨다고 나타났다.

본 연구는 기상조건에 따른 차량통행패턴 변화와 교통과 도시 대기오염의 상관관계에 관한 기존의 연구의 틀에서 한 단계 더 나아가 기상조건-교통-대기질의 연계성을 서울 대도시 차원에서 분석하였다는데 의의를 지닌다. 또한 시간당 강우수준별 분석으로 도출된 결과를 활용하여 강우 발생

에 따른 정확한 대기오염농도 예측이 가능해 질 것으로 기대한다. 단 대기 측정망 관리 주체와 교통 측정 주체가 달라 동일 지점에서 측정이 이루어지지 않아 두 측정지점의 이격거리가 1km 이내이면 상관성이 있을 것이라는 가정 하에 분석이 이루어졌으므로, 결과의 해석에 유의하였다. 또한 도로 이동오염원에 의해 발생하는 대기오염물질 지표를 NO_2 와 PM_{10} 으로만 한정 지어 분석하였는데 향후 다른 오염물질에 대한 분석과 통행시간대 별 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013 S1A3A2052995).

참고문헌

- Agarwal, M., Maze, T. H., and Souleyrette, R., 2005, *Impact of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity*, Center for Transportation Research Education, Iowa State University.
- Baek, S. K., Kim, B. J., and Lim, Y. T., 2008, Analysis of rain impacts on freeway trip characteristics, *Journal of Korean Society of Transportation*, 26(3), 119-128.
- Cho, H. J. and Choi, D. Y., 2009, Effects of road and traffic characteristics on roadside air pollution, *Journal of Korean Society of Transportation*, 27(6), 139-146 (in Korean).
- Choi, J. S., Sohn, B. S., and Choi, J. S., 1999, The effect of rain on traffic flows in urban freeway basic segments, *Journal of Korean Society of Transportation*.

- tation, 17(1), 29-39 (in Korean).
- Choi, Y. E., Kim, M. G., Kim, Y. J., and Park, C. Y., 2011, Characteristics and changes of extreme precipitation events in the Republic of Korea, 1954-2010: Their magnitude, frequency, and percent to total precipitation, *Journal of Climate Research*, 6(1), 45-58 (in Korean).
- Hassan, Y. A. and Barker, D. J., 1999, The impact of Unseasonable or Extreme Weather on Traffic Activity with in Lothian Region, Scotland, *Journal of Transport Geography*, 7, 209-213.
- Kim, D. S., Lim, D. Y., and Lim, T. J., 2012, Quantitative estimation of precipitation scavenging and wind dispersion contributions for PM₁₀ and NO₂ using long-term air and weather monitoring database during 2000-2009 in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 325-347 (in Korean).
- Kim, S. Y., Kwon, Y. A., Park, C. Y., and Chun, J. H., 2008, Regional characteristics of the monthly variability of precipitation from May to September over South Korea, *Journal of Climate Research*, 3(2), 64-75 (in Korean).
- Ko, J. H., Choi, Y. J., Lee, S. H., and Lee, T. K., 2009, Exploration of the relationship between traffic volume and air quality using existing monitoring data, *Journal of Korean Society of Transportation*, 27(5), 29-37 (in Korean).
- Koester, C. J. and Hites, R. A., 1992, Wet and dry deposition of chlorinated dioxins and furan, *Environmental Science and Technology*, 26, 1375-1382.
- Lim, D. Y., Heo, J. S., and Kim, D. S., 2002, Washout removal efficiencies of major air pollutants by precipitation, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 18(2), 97-106.
- Lim, D. Y., Lee, T. J., and Kim, D. S., 2012, Quantitative estimation of precipitation scavenging and wind dispersion contributions for PM₁₀ and NO₂ using long-term air and weather monitoring database during 2000-2009 in Korea, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 28, 325-347.
- Lim, D. Y., Lee, T. J., and Kim, D. S., 2013, Development and validation test of effective wet scavenging contribution regression models using long-term air monitoring and weather database, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 29(3), 297-306 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013, *2013 Highway Capacity Manual (HCM)*.
- National Institute of Environmental Research, 2012, http://airemiss.nier.go.kr/nape/data/airpollution/airpollution_down.jsp?seq=109.
- Noh, G. S., 2014, *SPSS & AMOS 21*, Han Bit Academy.
- Park, S. K., Kim, S. D., and Lee, Y. I., 2001, Comparative study on the methodology of motor vehicle emission calculation by using real-time traffic volume in Gangnam-Gu, *Journal of Korean Society of Transportation*, 19(4), 35-47 (in Korean).
- Sohn, Y. T. and Jun, J. S., 2013, A study on traffic-flow characteristic changes on expressway by visibility, *Journal of Intelligent Transport System*, 12(6), 116-126 (in Korean).

책임 편집: 이승호

영문 교열: 이은결