

유동인구 밀집지역 인근의 도로구간별 배출량 산정 및 보행자 노출 강도 평가

이상은* · 신명환* · 이석주** · 홍다희*** · 장동익**** · 길지훈* · 정택호* · 이태우† · 홍유덕*

Estimation of Link-Based Traffic-Related Air Pollutant Emissions and the Exposure Intensity on Pedestrian Near Busy Streets

Sangeun Lee, Myunghwan Shin, Seokjoo Lee, Dahee Hong, Dongik Jang,
Jihoon Keel, Taekho Jung, Taewoo Lee and Youdeog Hong

Key Words: Activity(활동도), Emissions(배출량), Exposure Intensity(노출강도), Traffic-related air pollutants(TRAPs, 도로오염물질)

Abstract

The objective of this study is to estimate the level of exposure of traffic-related air pollutants (TRAPs) on the pedestrians in Seoul area. The road network's link-based pollutant emission was calculated by using a set of mobile source emission factor package and associated activity information. The population information, which is the number of pedestrian, was analyzed in conjunction with the link-based traffic emissions in order to quantify exposure level by selected 23 spots. We proposed the Exposure Intensity, which is defined by the amount of traffic emission and the population, to quantify the probability of exposure of pedestrian. Link-based traffic NO_x and PM emissions vary by up to four times depending on the location of each spot. The Hot-spots is estimated to be around 1.8 times higher Exposure Intensity than the average of the 23 selected spots. The information of Exposure Intensity of each spot allows us to develop localized policies for air quality and health. Even in the same area, the Exposure Intensity over time also shows a large fluctuation, which gives suggestions for establishing site-specific counter-measures.

1. 서 론

보행자들은 도로를 지나는 자동차에서 배출되는 오염 물질의 영향에 쉽게 노출된다. 선행연구 결과들은 도로 교통에 의해 유발되는 오염물질(TRAPs, traffic-related

air pollutants)에 노출되는 것이 심혈관 및 폐 질환의 위험 증가와 관련 있음을 보고하고 있다⁽¹⁻³⁾. 많은 개별 역학 연구를 종합한 미국 건강영향연구소(HEI, Health Effect Institute)의 연구 역시 도로오염물질에 대한 노출이 이러한 건강 위험 증가 원인이 될 수 있음을 시사하고 있다⁽⁴⁾.

국내에서도 주요 교통 시설 인근에서 건강상의 문제가 많이 발생된다는 연구결과가 제시되어 있다.⁽⁵⁾ 도로 오염물질의 영향 파악과 대책 마련을 위해서는 지역 내의 중요한 배출원, 즉, 도로특성에 따른 오염물질 농도 변화에 대한 이해가 필요하다.

도로오염물질 농도는 도로 근처의 공간과 시간에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에^(6,7), 관심을 두고 있는 지

(Received: 29 Mar 2018, Received in revised form: 17 Apr 2018, Accepted: 20 Apr 2018)

*국립환경과학원 교통환경연구소

**한국교통연구원 4차 산업혁명 교통연구본부

***한국교통연구원 도로교통연구본부

****한국교통연구원 국가교통빅데이터사업단

†책임저자, 회원, 국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : taewoolee@korea.kr

TEL : (032)560-7606 FAX : (032)561-7013

역 도로 교통의 시간적, 공간적 변화 정보를 파악하는 것이 매우 중요하다⁽⁸⁾. 해외에서는 도로 네트워크에서의 배출량과 주변지역에 미치는 영향을 분석하는 연구가 여러 모습으로 진행되고 있으나⁽⁹⁻¹¹⁾, 현재까지 국내에서는 그리 활발하게 진행되고 있지는 않은 실정이다.

자동차 오염물질 배출량은 오염물질 배출계수와 활동도 정보를 연계하여 얻어지게 된다. 우리나라의 자동차 배출량 산정은 ‘대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)’에 의해 계산된다⁽¹²⁾. 배출계수는 자동차의 단위 활동도에서의 배출량을 표시하는 지표이다. 우리나라와 유럽은 단위 주행거리당 배출량인 [g/km] 형태의 배출계수를 사용하며^(12,13), 미국 연방에서는 단위 시간당 배출량인 [g/s] 형태의 계수를 사용한다.⁽¹⁴⁾ 활동도는 주행거리, 주행시간, 차속과 같은 도로상에서의 자동차 활동정보이다. CAPSS는 전국을 대상으로 한 비교적 큰 스케일의 배출량 산정시스템이라 할 수 있다. 앞에서 언급한 도로별 인증의 오염물질 노출 정도를 파악하기 위한 목적으로는 이와 같은 큰 스케일의 배출량 산정은 물론, 개별 도로의 짧은 소구간(Link) 배출량과 같은 미시적인 규모의 배출량 산정도 함께 요구된다.

본 연구에서는 도로구간별 배출량 산정을 위한 배출계수-활동도 계산 체계를 구축하고, 이를 활용하여 유동인구 밀집지역 인근 도로의 세부 도로 구간별 배출량을 계산하였다. 이 배출량 결과를 관심 지점의 유동인구 분포와 연계함으로써 주요 노출 영향권에서의 노출 강도를 상대적으로 비교하고, 배출량 감축·회피 방안 도출을 위한 정책수립에 활용될 수 있도록 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 배출량 계산 지역 선정

배출량 계산을 위한 관심지역은 Fig. 1과 같은 서울특별시 주요 23개 유동인구 밀집지점이다⁽¹⁵⁾. 배출량 계산 대상인 ‘도로구간’은 23개 각 지점을 중심으로 반경 500 m 내에 도로구간의 중심점이 포함되어 있는 도로구간을 선별하였다.

도로는 국토교통부 표준 전자지도(ITS 표준 링크·노드)에 포함된 왕복 2차선 이상의 도로를 대상으로 하였다⁽¹⁶⁾. 여러 도로구간 중에서 반경 500 m 영역 내에 전체 도로구간이 포함되지 않고 도로의 일부 구간만 걸쳐 있는 경우에는, 영역 내에 포함되어 있는 길이만을 적용한 후 이렇게 조정된 거리에 대한 활동도를 별도로 계

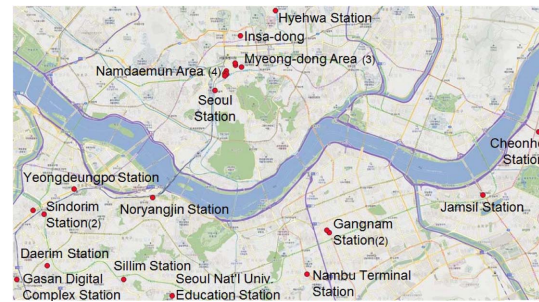


Fig. 1 Selected 23 spots in Seoul area

산하여 사용하였다.

2.2 도로 소구간별 배출량 계산

도로 구간별로 배출량을 계산하기 위해서는 차종별, 연식별, 연료별 자동차 배출계수와 각 도로 구간별 활동도를 연계한 대응량의 계산이 필요하게 된다. 이를 위해 교통환경연구소에서 보유중인 자체 배출계수 산정 시스템의 하위 모듈로서 도로별 배출량 계산기 모듈을 새롭게 구축하여 활용하였다.

계산기 모듈의 입력자료는 크게 배출계수 입력과 활동도 입력으로 구분할 수 있다. 자동차 오염물질 배출계수는 교통환경연구소에서 개발하여 CAPSS 시스템에 적용중인 배출계수 패키지⁽¹⁷⁾를 기본으로, 그 이후 연식의 계수를 업데이트하여 사용하였다. 우리나라의 배출계수는 대상 자동차의 평균 차속(km/h)을 독립변수로, 배출량(g/km)을 종속변수로 갖는 함수 형태를 가지고 있다. 배출계수 함수는 서로 다른 평균 차속을 갖는 15개 주행패턴을 주행할 때의 평균 차속⁽¹⁸⁾과 배출량 간의 상관회귀식으로 도출된 것이다. 배출계수 산출용 주행패턴은 우리나라의 주요 도로별 주행패턴을 모사하여 차속별로 분류한 NIER 주행패턴을 사용하고 있다. 아울러, 최근 불거진 소형경유자동차의 실도로 NOx 과다 배출현상을 반영하기 위해 이동식 배출가스 측정장비(PEMS, Portable Emissions Measurement System)을 이용하여 측정된 실도로 NOx 배출량을 배출계수화하여 함께 반영하였다.⁽¹⁹⁻²¹⁾ 계산기 모듈에 배출계수를 입력할 때에는 계수의 배출특성을 조금씩 조정할 수 있는 조정계수를 부여해 줌으로써 향후 새로운 자동차가 보급되거나, 배출허용기준이 강화되는 등, 미래 배출량을 여러 시나리오로 예측해야 하는 경우에 효율적으로 대응할 수 있도록 하였다. 교통량 입력자료는 상용 교통량 모델의 출력자료를 가급적 수정없이 그대로 입력할 수

있는 구조적 체계를 구성함으로써 향후 교통공학 부문에서 연구되고 생산되어진 다양한 교통량 예측 자료를 용이하게 활용할 수 있게 하였다.

활동도 자료는 국립환경과학원과 한국교통연구원의 산정방법을 적용하여 얻어진 2015년 기준 도로별 평균 차속과 총 주행거리(VKT, Vehicle Kilometer Travel)를 이용하였다⁽²²⁾. VKT는 교통량의 지표로서, 도로구간을 지나는 자동차의 대수에 해당 도로구간의 길이를 곱한 값이다. 활동도 자료 중 자동차의 연료 및 연식 구분별 대수는 배출계수의 특성을 구분 짓는 매우 중요한 변수인 반면, 상대적으로 교통량 측면에서는 그다지 중요하게 취급되지 않고 있다. 본 연구에서는 전국 단위의 사

용연료별 자동차 비율과 차종별 연식 구분 비율이 본 연구범위인 서울특별시에서 그대로 적용된다고 가정하여 연료별·연식별 비율을 할당하였다. 차종 구분 역시 배출계수 자료에서의 구분과 교통량 자료에서의 구분이 서로 달라 매칭이 필요하였으며, 교통량 자료의 10종 구분체계를 배출계수의 33종 체계에 맞게 매칭시킨 후 적용하였다. Table 1에 23개 지점의 주요 특성을 요약하였다.

2.3 유동인구 밀집지역의 노출수준 분석

도로별 배출량 결과를 이용하여 도심 Hot-Spot에서의 오염물질 노출 가능성을 정량화하였다.

서울시내 주요 23개 지점의 유동인구 자료는 2015년

Table 1 Number of pedestrians and characteristics of road links near selected 23 spots

ID	Spot name	# of pedestrian (#/day)	# of links	Mean speed (km/h)	Total length (km)	VKT (Veh-km/day)
1	Myeong-dong CGV	75,453	109	24.8	16.3	462,548
2	Cheonho Station Exit 5	36,729	54	28.1	15.7	377,601
3	Nambu Terminal Station Exit 5	28,059	79	25.6	16.7	170,571
4	Sindorim Station Hyundai Department Store	27,318	92	27.6	16.3	290,847
5	Hyeonhwajong Station Exit 4	52,317	29	25.3	9.2	129,276
6	Myeong-dong Street M Plaza	23,379	110	26.7	18.5	409,822
7	Insa-dong Ssamzigil	49,773	87	21.4	15.3	221,961
8	Seoul Nat'l Univ. Education Station Exit 3	29,427	23	24.2	6.9	258,044
9	Myeong-dong Lotte Department Store	40,872	114	23.8	18.0	513,066
10	Namdaemun-ro Underground Shopping Center Exit 2	27,885	105	25.5	15.6	420,788
11	Namdaemun Jung-ang Shopping Center	37,542	108	24.5	17.0	491,577
12	Namdaemun Daedo Shopping Center	31,392	88	25.2	14.3	405,006
13	Seoul Station Square	14,016	67	29.1	13.5	164,377
14	Gangnam CGV	41,919	53	24.8	11.9	245,661
15	Sillim Station Exit 2	25,911	64	21.5	11.3	300,204
16	Yeongdeungpo Station Bus Stop	34,557	48	26.1	12.8	453,615
17	Bicycle parking in front of Sindorim Station	20,112	90	30.2	17.3	239,241
18	Jamsil Station Exit 6	28,959	40	28.5	9.6	260,221
19	Daerim Station Exit 4	23,715	56	21.0	13.5	370,097
20	Gasam Digital Complex Station Exit 7	14,673	75	29.4	18.0	481,456
21	Hoehyeon Station Exit 5	33,888	88	26.7	13.5	336,060
22	Noryangjin Station Exit 3	49,932	41	36.9	12.4	542,663
23	Gangnam Station	87,978	60	24.4	13.5	262,272

서울특별시 조사결과를 사용하였다. 유동인구는 오전 7시부터 오후 9시(21시)까지의 14시간 동안의 조사결과이며, 본 연구에서는 2015년도 8월 중 금요일 조사자료를 사용하였다⁽¹⁵⁾.

도로변 Hot-Spot을 다룬 선행 연구에서는 대기 중 오염물질 농도가 높은 지역을 Hot-Spot으로 정의하거나^(7,23), 교통량이 많은 지역⁽²⁴⁾, 또는 토지이용도 분석에 기반한 회귀모델 결과로 예측된 고농도 지역으로 정의하고 있다^(25,26). 본 연구에서는 동일한 지점에서 얼마나 많은 사람들이 얼마나 높은 배출량과 함께 체류하는지를 정량화하는 방법으로 Hot-Spot을 정의하였다. 유동인구와 배출량을 함께 감안하기 위해, 노출강도(Exposure Intensity)라는 변수를 다음과 같이 제안하였다. 각 도로구간과 유동인구 조사지점 사이에는 이격거리가 존재하게 되며, 이 이격거리가 길수록 도로에서 발생된 배출량이 유동인구 조사지점에 미치는 영향은 적어지게 된다. 본 연구에서는 도로로부터의 이격거리에 따른 대기오염 물질별 감쇄비율⁽⁷⁾을 적용하여 각 도로구간이 유동인구 조사지점에 영향을 미치는 유효 배출량을 산정하여 활용하였다.

$$\begin{aligned}
 EI_{i,j} &= normP_j \times normE_{i,j} \\
 &= \frac{P_j}{N_{spot} \sum_{j=1}^{N_{spot}} P_j} \times \frac{\sum_{k=1}^{n_j} E_{i,j,k}}{N_{spot} \sum_{j=1}^{N_{spot}} \sum_{k=1}^{n_j} E_{i,j,k}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

where,

- $E_{i,j}$ Exposure intensity of pollutant i at spot j (-)
- $normP$ Normalized value for the number of population at spot j (-)
- $normE_{i,j}$ Normalized value for the emission of pollutant i at road link k in area near spot j (-)
- P_j The number of population at spot j (#/h or #/day)
- N_{spot} The number of selected spot (in this case, $N_{spot}=23$)
- $E_{i,j,k}$ Emission of pollutant i at road link k in area near spot j (kg/h or kg/day)
- n_j The number of road links in area near spot j (#)
- subscript i denotes for pollutant ($i=NOx, PM, HC, CO$)

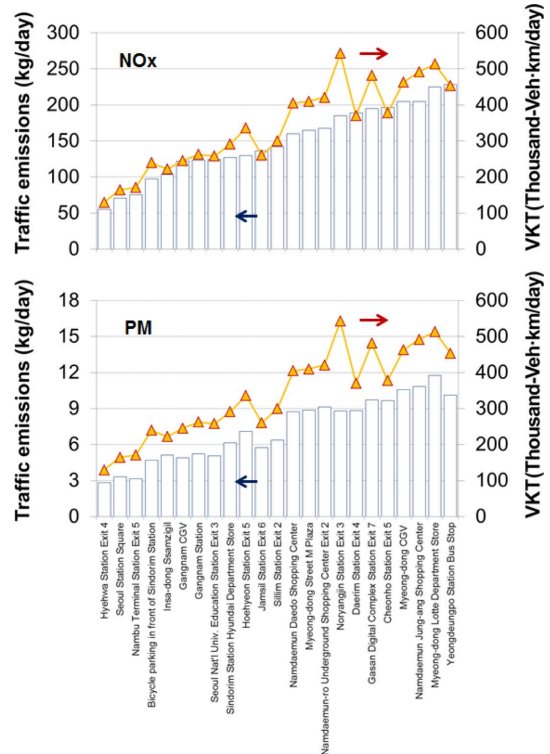


Fig. 2 Traffic emissions and VKT of selected 23 spots in Seoul area

subscript j denotes for spot ($j=1\sim 23$)
 subscript k denotes for road link ID

3. 결과 및 고찰

유동인구 밀집지역 인근 도로의 배출량을 계산한 후, 인텐시티, 즉 노출강도를 이용하여 서울시내 23개 지점별로 어떤 노출특성을 보이는지를 파악하였다. 또한 동일한 지점에서도 시간대별로는 어떤 양상을 보이고 있는지를 선택된 2개 지점에 대해 비교하였다. 노출강도의 영향 정도, 지역 특성 등을 감안하여 배출량 저감·회피를 위한 시사점을 도출해 보았으며, 시·공간적 노출 특성을 이해한 맞춤형대책의 수립 필요성 등을 고찰하였다.

3.1 도로 소구간별 배출량 계산

주요 23개 지점 인근 도로의 배출량을 산정하고, 지점까지의 이격거리에 따른 감쇄율을 반영한 도로 배출

량은 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 지점별 NOx 배출량을 기준으로 오름차순으로 정렬한 것이다. 지점별 배출량 경향은 오염물질별로 큰 차이를 보이지는 않으며, 교통량, 즉 VKT가 큰 영향을 미치고 있는 것으로 확인되었다.

같은 서울특별시라고 할지라도, 지점 인근 도로에서 배출되는 배출량은 주요 지점별로 약 4배까지 차이를 보인다. 본 23개 지점이 대부분 차량이 많은 혼잡지역임을 감안할 때, 교통량이 많지 않은 지역과의 배출량 편차는 훨씬 더 크게 나타날 것으로 사료된다. 이와 같은 지역별 배출량 편차를 적절히 감안하기 위해서는 시·도 규모의 대규모 공간 스케일을 갖는 배출량 산정과 함께, 도로 구간별 배출량 산정과 같은 소규모 접근이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 유동인구 밀집지역의 노출수준 분석 : 공간적 특성

유동인구의 경향은 배출량 경향과 일치하는 증감경향을 나타내고 있지는 않다(Fig. 3). 예를 들어, Fig. 3에서 유동인구가 많이 나타난 지점은 소평, 여가활동과 위락 활동이 활발히 이루어 질 수 있도록 상권이 형성되어 있는 강남역과 명동CGV로 확인되었으며, 유동인구가 적은 지점은 대부분 주거지역과 사업지역으로 이루어져 있는 신도림역, 가산디지털단지역 등이 있다. 한편, 같은 명동지역에서도 명동 CGV 인근과 같이 유동인구가 많은 지역이 있는 반면, 롯데 백화점 인근의 유동인구는 평균적인 수준을 나타내고 있어, 결과적으로 명동 CGV 대비 약 46% 낮은 수준을 보인다. 이는 본 연구의 유동인구 자료가 하절기인 8월 금요일 측정결과라는 데에서 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 즉, 지하철과 연결되어

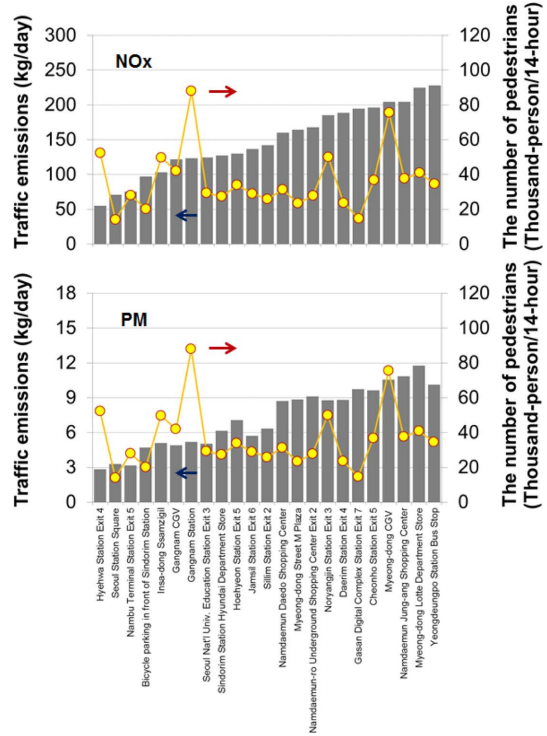


Fig. 3 Traffic emissions and the number of pedestrians of selected 23 spots in Seoul area

있는 롯데백화점은 더운 여름에 밖으로 다니는 대신 지하철통행을 선호하는 유동인구가 있기 때문에 명동 CGV보다 적은 것으로 예측 할 수 있으며, 명동 CGV의 경우 유네스코길 및 명동거리로 이동하기 위해 외부도로로 나와야 하는 지점 특성의 차이라고 사료된다. 두

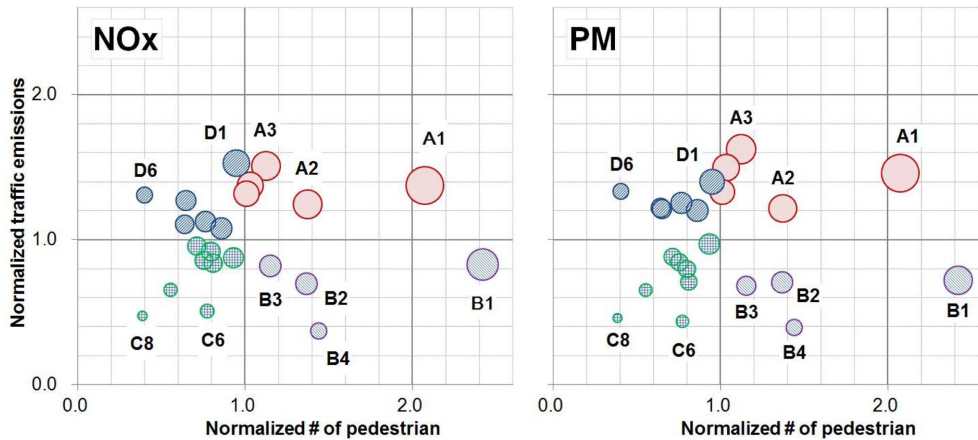


Fig. 4 Normalized traffic emissions, normalized number of pedestrian, and exposure intensity of selected 23 spots in Seoul area

변동량을 함께 고려한 노출강도 산정결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 x축은 무차원화된 유동인구수를, y축은 무차원화된 도로배출량을 나타낸다. 원의 면적은 각 지점의 노출강도를 나타낸다. 노출강도는 얼마나 많은 사람이 얼마나 많은 배출량에 노출되어 있는지에 대한 지표라고 할 수 있으며, 좀 더 보수적으로는 ‘유동인구가 배출량에 노출될 수 있는 가능성’이라고도 서술할 수 있을 것이다.

Figure 4의 x축, y축의 1.0값을 기준으로 그래프 영역을 4개 영역으로 분할했을 때, 1/4분면에 속하는 지점을 “A”로 표시하면, 이는 유동인구가 23개 지역의 평균 수준보다 많은 동시에 배출량 역시 평균 배출수준보다 많

은 지역이다. 즉, A 지점들 배출량과 노출인구를 함께 고려한 Hot-Spot이라 할 수 있다. 1/4분면부터 4/4분면까지의 영역별 평균 노출강도 값은 NOx의 경우 각각 1.80, 1.11, 0.56 및 0.89이며, PM의 경우 각각 1.88, 1.02, 0.53 및 0.91이다. 예를 들어 평균 노출강도가 1.80이라는 것은 23개 지역의 평균 대비 1.8배 높은 노출가능성이 있다고 해석할 수 있다. 2/4분면(B)은 배출량보다는 유동인구 측면의 접근이 더 중요한 지역이며, 다른 영역도 같은 흐름의 분석이 가능하다.

Figure 4는 주요 지점별 배출량 순위, 유동인구 순위, 그리고 두 값의 조합인 노출강도의 순위를 동시에 파악할 수 있게 해 줌으로서, 대기 정책 또는 보건 정책을

Table 2 Exposure Intensity of selected 23 spots in Seoul area

Zone	Zone ID	Spot name	NOx		PM		Normalized # of pedestrian (-)
			Intensity (-)	Normalized emissions (-)	Intensity (-)	Normalized emissions (-)	
A	A1	Myeong-dong CGV	2.85	1.37	3.03	1.46	2.08
	A2	Noryangjin Station Exit 3	1.71	1.24	1.67	1.22	1.37
	A3	Myeong-dong Lotte Department Store	1.70	1.51	1.83	1.62	1.12
	A4	Namdaemun Jung-ang Shopping Center	1.42	1.37	1.55	1.50	1.03
	A5	Cheonho Station Exit 5	1.33	1.32	1.34	1.33	1.01
B	B1	Gangnam Station	2.00	0.83	1.75	0.72	2.42
	B2	Insa-dong Ssamzigil	0.95	0.69	0.97	0.71	1.37
	B3	Gangnam CGV	0.94	0.82	0.79	0.68	1.15
	B4	Hyeohwa Station Exit 4	0.53	0.37	0.57	0.39	1.44
C	C1	Hoehyeon Station Exit 5	0.81	0.87	0.91	0.97	0.93
	C2	Jamsil Station Exit 6	0.73	0.92	0.63	0.80	0.80
	C3	Sillim Station Exit 2	0.68	0.95	0.63	0.88	0.71
	C4	Seoul Nat'l Univ. Education Station Exit 3	0.68	0.83	0.57	0.71	0.81
	C5	Sindorim Station Hyundai Department Store	0.64	0.85	0.64	0.85	0.75
	C6	Nambu Terminal Station Exit 5	0.39	0.51	0.34	0.43	0.77
	C7	Bicycle parking in front of Sindorim Station	0.36	0.65	0.36	0.65	0.55
	C8	Seoul Station Square	0.18	0.47	0.18	0.46	0.39
D	D1	Yeongdeungpo Station Bus Stop	1.46	1.53	1.33	1.40	0.95
	D2	NamdaemunDaedo Shopping Center	0.93	1.07	1.04	1.20	0.86
	D3	Namdaemun-ro Underground Shopping Center Exit 2	0.86	1.12	0.96	1.25	0.77
	D4	Daerim Station Exit 4	0.83	1.27	0.79	1.21	0.65
	D5	Myeong-dong Street M Plaza	0.71	1.11	0.79	1.22	0.64
	D6	Gasam Digital Complex Station Exit 7	0.53	1.31	0.54	1.34	0.40

수립함에 있어 지역별로 특화된 정책을 구상할 수 있는 기본 자료로서 활용될 수 있는 의미있는 연구결과라 할 수 있다. Table 2에 지점별 주요사항을 정량화하여 표시하였다. 예를 들어 A1 지점의 경우 무차원화된 유동인구수가 2.08로 유동인구가 많은 지점에 속하면서 도로 배출량도 NOx, PM 각각 1.37 및 1.46으로 높게 나타나는 지점에 속해있어 두 무차원 수가 곱해졌기 때문에 노출강도가 가장 높게 나타났으며, 이를 많은 사람이 많은 배출량에 노출될 수 있다고 분석할 수 있다.

3.3 유동인구 밀집지역의 노출수준 분석 : 시간적 특성

유동인구와 교통량은 하루 중에도 계속해서 변하기 때문에, 동일한 지역에서도 시간대별로 노출강도는 달라질 수 있다. Fig. 5는 노량진역과 강남역에서의 아침 7시부터 밤 9시까지의 시간대별 교통량과 유동인구 변화를 도시한 것이다.

세모로 표시된 유동인구 값을 보면, 노량진은 출근, 점심시간, 퇴근시간에 피크를 갖는 평이한 경향을 보이는 한편, 강남역은 저녁시간의 유동인구가 매우 높이 증

가하는 경향을 보이고 있다. 동그라미로 표시된 교통량 결과에서는 일반적인 인식과는 달리 노량진 교통량이 강남역 인근보다 더 높은 값을 보이고 있다. 이는 노량진의 입지여건, 즉, 인근을 지나는 올림픽대로의 높은 교통량에 기인한 결과이다. 올림픽대로의 교통량은 노량진역 인근 교통량의 67~72%를 차지하고 있다.

다시 시간대별 특성으로 돌아와서, 이런 변동특성이 배출량과 노출강도에는 어떻게 영향을 미치는지를 8-9시, 13-14시 및 18-19시의 3개 시간대에서 살펴보았다. Fig. 6의 왼쪽은 배출량, 가운데는 유동인구, 오른쪽은 노출강도 결과이다. 퇴근시간 강남역의 유동인구와 노출강도는 뚜렷하게 높은 수준을 보이는 한편, 노량진의 노출강도 역시 올림픽대로의 교통량 때문에 높은 수준을 보이고 있다.

현상적인 분석을 통해 이 두 지점에서의 보행자 노출 가능성을 줄이기 위한 방안을 도출해 본다면, 먼저 노량진에서는 올림픽대로의 배출량이 가장 중요한 요인으로 작용할 것이다. 강남역에서는 유동인구 분산이 가장 효과적일 것으로 판단되나, 시행을 위해서는 현실적으로

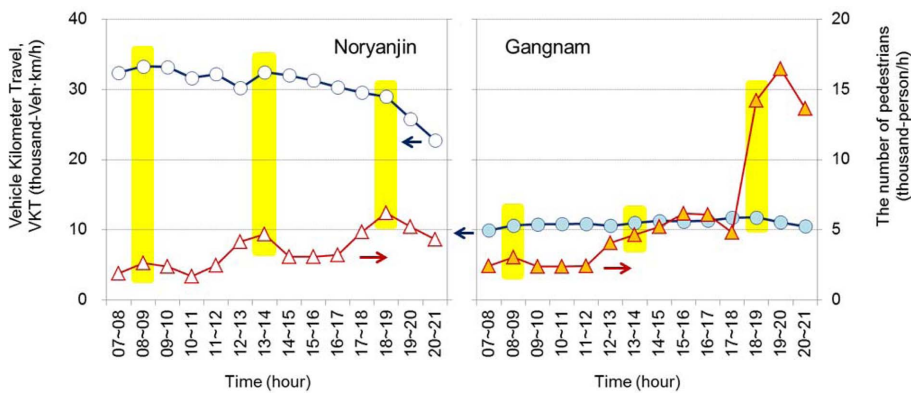


Fig. 5 Time-dependant characteristics of VKT and the number of pedestrian near Noryangjin and Gangman station

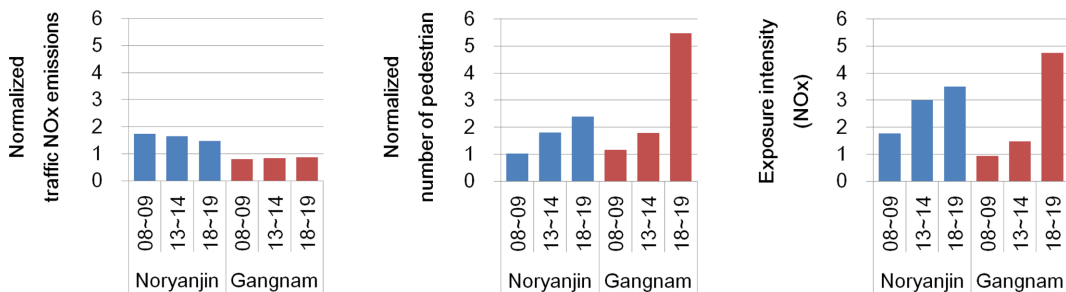


Fig. 6 Normalized traffic NOx emissions (left), normalized number of pedestrian (middle), and exposure intensity (right) near Noryangjin and Gangman station in three different period of time

많은 제약이 있을 것으로 예상된다. 배출량 측면에서만 접근해 본다면, 강남역 인근의 노출강도를 조사 대상지역의 평균 수준까지 낮추기 위해서는 퇴근시간 대의 배출량을 약 80% 삭감시켜야 할 것으로 보인다. 이는 현재 퇴근시간 강남역의 노출강도가 강남대로의 교통량을 매우 낮은 수준으로 관리해야 할 정도로 높은 수준임을 알 수 있게 해 주는 결과라 할 수 있다.

3.4 연구의 한계점 및 향후 계획

본 연구는 유동인구 밀집지역 주변에 위치한 도로의 배출량을 정량적으로 분석하고 지역별 노출 가능성의 정도를 구분하였다. 인체 위해성 영향 분석을 위해서는 주변 대기와 자동차 배출가스의 희석, 확산 및 화학적 조성 변화 등 대기화학적 분석과 인체 흡입량, 용량-반응 평가 등의 인체 노출량 검토가 함께 필요하며, 이는 본 연구의 범위를 넘어서는 연구영역으로 판단되어 별도로 다루지 않았다. 본 연구결과는 본격적인 인체 위해성 및 지역 대기환경 연구를 위한 상세 입력자료로 활용될 것으로 기대되며, 향후 관련 연구그룹과의 학제간 융합을 통해 좀 더 심도깊은 연구가 진행시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도로이동오염원 배출계수와 활동도를 이용하여 도로별 배출량을 산정하고 이 결과를 유동인구 정보와 함께 분석하여 지역별 노출강도를 정량화하였다.

인근 도로에서 배출되는 NO_x 배출량은 서울특별시 주요 지점별로 4배까지 차이를 보인다. 배출량과 유동인구를 함께 감안한 Hot-Spot에서는 조사대상 23개 지역의 평균 대비 약 1.80배 이상 높은 노출 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시한 주요 지점별 배출량 순위, 유동인구 순위, 그리고 두 값의 조합인 노출강도의 순위 결과는 대기 정책 또는 보건 정책을 수립함에 있어 지역별로 특화된 정책을 마련하는 기반이 될 것으로 기대된다.

동일한 지역에서의 시간대별 노출강도 역시 큰 변동폭을 보였으며, 이를 통해 지역 맞춤형 대책수립을 위한 시사점을 얻어낼 수 있었다. 노량진역과 강남역 사례에서, 노량진에서는 올림픽대로의 배출량 관리가, 강남역에서는 유동인구 분산이 가장 효과적인 것으로 분석되었다. 특히 강남역 사례에서는 현재 퇴근시간 강남역의 노출강도가 강남대로의 교통량을 매우 낮은 수준으로

관리해야 할 정도로 매우 높은 수준임을 알 수 있게 해 주는 결과로서, 향후 좀 더 많은 지역별·시간대별 검토가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2017-01-01-077).

참고문헌

- (1) W. Q. Gan, L. Tamburic, H. W. Davies, P. A. Demers, M. Koehoorn and M. Brauer, "Change in residential proximity to traffic and the risk of death from coronary heart disease", *Epidemiology*, Vol. 21, No. 5, 2010, pp. 1~8.
- (2) R. McConnell, T. Islam, K. Shankardass, M. Jerrett, F. Lurmann, F. Gilliland, J. Gauderman, E. Avol, N. Kunzli, L. Yao, J. Peters and K. Berhane, "Childhood incident asthma and traffic-related air pollution at home and school", *Environ. Health Perspect.*, Vol. 118, No. 7, 2010, pp. 1021~1026.
- (3) G. Hoek, R. M. Krishnan, R. Beelen, A. Peters, B. Ostro, B. Brunekreef and J. D. Kaufman, "Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review", *Environ. Health*, Vol. 12, 2013, pp. 43.
- (4) HEI (Health Effects Institute), "Traffic-related Air Pollution: a Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects", HEI, Boston, MA, 2010.
- (5) D. K. Lamichhane, H. Kim, C. Choi, M. Shin, Y. Shim, J. Leem, J. Ryu, H. Nam and S. Park, "Lung cancer risk and residential exposure to air pollution: A Korean population-based case-control study", *Yonsei Med J.*, Vol. 58, No. 6, 2017, pp. 1111~1118.
- (6) Y. Zhou and J. I. Levy, "Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis", *BMC Public Health*, Vol. 7, 2007, pp. 89.
- (7) A. A. Karner, D. S. Eisinger and D. A. Niemeier, "Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 44, No. 14, 2010, pp. 5334~5344.
- (8) C. H. Yu, Z. Fan, P. J. Liyo, A. Baptista, M. Greenberg and R. J. Laumbach, "A novel mobile monitoring approach to

- characterize spatial and temporal variation in traffic-related air pollutants in an urban community”, *Atmospheric Environment*, Vol. 141, 2016, pp. 161~173.
- (9) T. M. Barzyk, V. Isakov and S. Arunachalam, A. Venkatram, R. Cook, and B. Naess, “A near-road modeling system for community-scale assessments of traffic-related air pollution in the United States”, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 66, 2015, pp. 46~56.
- (10) S. Batterman, S. Chambliss, and V. Isakov, “Spatial resolution requirements for traffic-related air pollutant exposure evaluations”, *Atmospheric environment*, Vol. 94, 2014, pp. 518~528.
- (11) E. Dons, P. Temmerman, M. Van Poppel, T. Bellemans, G. Wets and L.I. Panis, “Street characteristics and traffic factors determining road users' exposure to black carbon”, *Science of the Total Environment*, Vol. 447, 2013, pp. 72~79.
- (12) NIER, “National air pollutants emission calculation method manual (III)”, NIER-GP2013-097, 2013.
- (13) EEA, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016”, 2016.
- (14) U.S.EPA, “MOVES2014a User Guide”, EPA- 420-B-15-095, 2015.
- (15) Seoul Metropolitan Government, “2015 Seoul floating population report”, 2015.
- (16) National Transport Information Center ([http:// www.its.go.kr](http://www.its.go.kr)), Standard node link.
- (17) NIER, “Air pollutant emission factors (2012)”, NIER-GP2015-024, 2015.
- (18) NIER, “Each nation’s air pollutant emissions inventory guidebook for transportation section”, NIER NO. 2006-13-795, 2006.
- (19) NIER, “Establishment of statistics on national air pollutant emission for transportation section (III)”, NIER-RP2016-309, 2016.
- (20) T. Lee, J. Park, S. Kwon, J. Lee and J. Kim, “Variability in operation-based NOx emission factors with different test routes, and its effects on the real-driving emissions of light diesel vehicles”, *Science of Total Environment*, Vols. 461-462, 2013, pp. 377~385.
- (21) S. Kwon, Y. Park, J. Park, J. Kim, K. H. Choi and J. S. Cha, “Characteristics of on-road NOx emissions from Euro 6 light-duty diesel vehicles using a portable emissions measurement system”, *Science of the Total Environment*, Vol. 576, 2017, pp. 70~77.
- (22) D. Hong, J. Kim, D. Jang and T. Lee, “The study for estimating traffic volumes on urban roads using spatial statistic and navigation data”, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol. 35, No. 3, 2017, pp. 220~233.
- (23) S. Mukerjee, L. Smith, H. Brantley, C. Stallings, L. Neas, S. Kimbrough and R. Williams, “Comparison of modeled traffic exposure zones using on-road air pollution measurements”, *Atmospheric Pollution Research (APR)*, Vol. 6, 2015, pp. 82~87.
- (24) A. J. Kotz, D. B. Kittelson and W. F. Northrop, “Lagrangian hotspots of in-use NOx emissions from transit buses”, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 50, No. 11, 2016, pp. 5750~5756.
- (25) G. Miskell, J. Salmond, I. Longley and K. Dirks, “A novel approach in quantifying the effect of urban design features on local-scale air pollution in central urban areas”, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 49, 2015, pp. 9004~9011.
- (26) A. P. Patton, C. Milando, J. L. Durant and P. Kumar, “Assessing the suitability of multiple dispersion and land use regression models for urban traffic-related ultrafine particles”, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 51, 2017, pp. 384~392.