

도로이동오염원의 활동도와 도로변 질소산화물 농도의 관계

Relation with Activity of Road Mobile Source and Roadside Nitrogen Oxide Concentration

김진식 · 최윤주¹⁾ · 이경빈²⁾ · 김신도*

서울시립대학교 환경공학과, ¹⁾한국상하수도협회

²⁾서울시립대학교 도시과학연구원

(2015년 7월 21일 접수, 2015년 10월 5일 수정, 2015년 10월 27일 채택)

Jin Sik Kim, Yun Ju Choi¹⁾, Kyoung Bin Lee²⁾ and Shin Do Kim*

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

¹⁾*Korea Water and Wastewater Association*

²⁾*The Institute of Urban Science, University of Seoul*

(Received 21 July 2015, revised 5 October 2015, accepted 27 October 2015)

Abstract

Ozone has been a problem in big cities. That is secondary air pollutant produced by nitrogen oxide and VOCs in the atmosphere. In order to solve this, the first to be the analysis of the NO_x and VOCs.

The main source of nitrogen oxide is the road mobile. Industrial sources in Seoul are particularly low, and mobile traffics on roads are large, so 45% of total NO_x are estimated that road mobile emissions in Seoul. Thus, it is necessary to clarify the relation with the activity of road mobile source and NO_x concentration.

In this study, we analyzed the 4 locations with roadside automatic monitoring systems in their center. The V.K.T. calculating areas are set in circles with 50 meter spacing, 50 meter to 500 meter from their center. We assumed the total V.K.T. in the set radius affect the NO_x concentration in the center. We used the hourly NO_x concentrations data for the 4 observation points in July for the interference of the other sources are minimized. We used the intersection traffic survey data of all direction for construction of the V.K.T. data, the mobile activities on the roads. ArcGIS application was used for calculating the length of roads in the set radius. The V.K.T. data are multiplied by segment traffic volume and length of roads.

As a result, the NO_x concentration can be expressed as linear function formula for V.K.T. with high predictive power. Moreover we separated background concentration and concentrations due to road mobile source. These results can be used for forecasting the effect of traffic demand management plan.

Key words : Road mobile source, NO_x, Roadside, Traffic volume, V.K.T.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6490-2860, E-mail : sdkim@uos.ac.kr

1. 서 론

대도시에서는 오존이 지속적으로 문제시 되고 있으며, 오존은 대기중의 질소산화물(NO_x), VOC와 함께 광화학적으로 생성되는 2차 오염물질이다. 이를 해결하기 위해서는 NO_x 와 VOC에 대한 해석이 선행되어야 한다.

NO_x 의 주요 배출원은 도로이동오염원이며, 서울시는 산업부문의 배출량이 적고 자동차의 통행량이 많아 전체 NO_x 배출량 중 45%가 도로이동오염원에서 배출되는 것으로 추정하고 있다. 하루 중 도로변 NO_x 의 농도 변화는 도로교통량의 변화와 유사한 경향으로 하루 중 증가, 유지, 감소하는 패턴을 나타낸다. 그림 1은 교통량과 NO_x 농도의 변화 패턴을 나타낸 그래프이다. 04시부터 09시까지는 교통량이 증가하는 증가기, 09시부터 19시까지는 교통량에 큰 변동이 없는 유지기, 19시부터 04시까지는 교통량이 감소하는 감소기이며, 이에 따라 NO_x 의 농도도 증가와 유지 감소 패턴을 보인다. 다만 교통량이 19시경의 퇴근시간에 극대값으로부터 감소하지만, NO_x 농도의 감소는 3시간~4시간 정도 고농도로 정체(그림 1의 음영처리된 사각형 부분)

된 후 약 23시경부터 감소하기 시작한다.

이처럼 도시의 NO_x 의 오염에 대해서 도로이동오염원의 활동도와 NO_x 의 관계를 명확히 할 필요가 있다.

Yim *et al.* (2008)은 대전지역의 도로변에서 확산측정기를 이용하여 이산화질소(NO_2) 농도를 측정하였으며, 녹지 및 주거지역보다 도로변의 NO_2 농도가 상대적으로 높으며, 교통량이 많은 지역일수록 이산화질소 농도가 높았음을 보고하였다.

Pandey *et al.* (2008)는 서울의 신촌지역 도로변과 대흥동의 배경지역으로 구분하여 NO_x 농도를 1996년부터 2006년까지 11년간의 장기 측정된 결과를 바탕으로 NO_x 의 거동을 파악하였다. 배경지역은 약 70 ppb 수준으로 11년간 큰 변동없이 관측되었으며, 도로변 지역은 1996년 290 ppb에서 2003년 100 ppb 수준으로 점진적으로 감소되었다고 보고하였다. 도로변지역과 배경농도 지역 모두 여름철인 6, 7월에 가장 낮은 농도를, 겨울철인 11, 12월에 가장 높은 농도를 나타내었고, 하루 중 도로변의 NO_x 농도는 인간의 활동패턴과 유사한 경향성을 나타내는 것으로 보고하였다.

Lee *et al.* (2014)는 광주지역 대기오염측정소 주변 교통량과 대기오염물질의 상관성에 대해 연구하였으며 일반 도시지역 측정소에 비해 도로변 측정소에서의

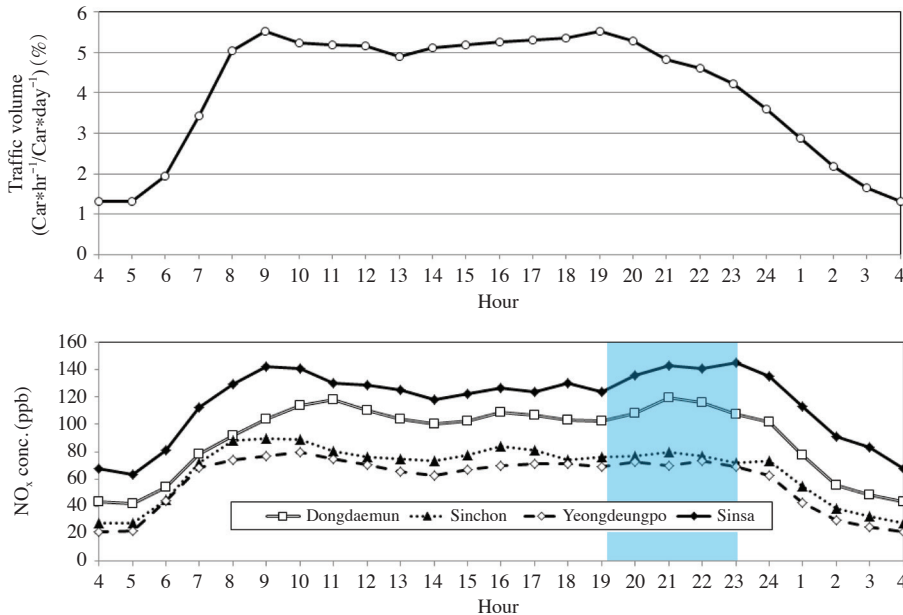


Fig. 1. Pattern of Traffic volume and NO_x concentration by time of day.

대기오염도가 교통량의 영향을 많이 받았고, 교통량이 증가할수록 NO₂의 농도가 증가함을 보고하였다.

Park *et al.* (2000)은 고속도로 요금소 부스를 통과하는 차량의 통과대수와 한국도로공사 고속도로 교통량 조사 자료의 차종 비율을 이용하여 해당 지점의 일교통량을 산정하였고 배출계수를 적용하여 NO₂의 배출량을 산정하고 CALINE3 모델을 사용하여 고속도로 요금소의 대기오염도를 예측하였다. 그 결과 교통량이 증가하는 시간대에는 자동차에서 배출되는 오염물질의 절대적 증가로 인하여 버스 외부오염도가 높게 나타남에 따라 버스 내부 농도도 증가함을 보고하였다.

Kim (2005)은 서울시 지역의 대기오염자동측정망 자료를 이용하여 자동차 배출가스로 인한 대기오염물질 중 NO_x (NO, NO₂) 농도의 시공간적 변화 특성 및 NO₂/NO_x의 비율 분석을 통하여 서울시 도로변 지역의 NO_x 농도로부터 NO₂ 농도를 예측하는 상관식을 NO_x에 대한 일차함수식으로 도출하고, NO_x 농도에 영향을 미치는 인자를 분석하였다. 그 결과 교통량이 적을수록, 오존농도가 높을수록 NO₂/NO_x ratio가 높게 나타났으며, 도심지역에서 차량에 의한 교통량, 기온, 습도와 높은 상관성을 보이고 있다고 보고하였다.

Ahn (2007)은 이동오염원의 오염도 분석을 위한 모델을 실측값과 비교·평가하였으며, 대구시 도심지의 교차로를 대상으로 CALINE4 (California Line Source Dispersion Model 4) 모델과 ISCST3 (Industrial Source Complex Short Term Model 3) 모델을 이용하여 도로 주변지역에 미치는 영향을 파악하였다. 두 가지 모델은 현저히 다른 결과를 모사하였는데, 도로변 측정소 관측값을 비교해 본 결과 점·면오염원을 주로 다루는 ISCST3 모델보다는 CALINE4가 더 적합하였음을 확인하였다. 이처럼 도로이동오염원의 분석시, 적합하지 않은 모델은 현실에 전혀 맞지 않는 결과값을 도출할 수도 있다.

Park (2010)은 기존의 배출계수에 의한 도로이동오염원 배출량 산정방법이 복잡하고, 대기측정망 자료와 불일치하는 점에 착안하여 대구, 부산, 광주 지역의 도로변 대기측정망이 위치한 지점을 선정하고 차종별 교통량 자료와 동지점 동시간대의 대기측정망 자료를 바탕으로 하여 차종별 교통량, 대기오염물질 간, 기상요소의 상관성을 분석하여 각 인자 간 연관관계를 파악하여 배출가스에 영향을 미치는 변수를 선정하여 다중

회귀분석을 통한 모형 도출하였다. 그 결과 교통량과는 양의 상관관계가 있었고, 기상인자와는 음의 관계를 보였다.

기존의 연구에서는 도로변 NO_x 농도와 배경지역의 NO_x 농도에 대해서 관측결과를 비교하거나, 배출계수법을 이용해 도로이동오염원의 배출량을 산정하여 대기분산모델을 활용해 영향을 예측한 연구들이 다수이다. 본 연구에서는 도로이동오염원과 상관성이 큰 것으로 알려져 있는 질소 산화물에 대해서, 서울시의 주요 교통혼잡지역에 대해 도로 교통량과 질소산화물 농도와의 관계를 파악하고, 교통량으로 해당지역의 NO_x 농도를 표현할 수 있는 함수식을 도출하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 도로이동오염원으로부터 배출되는 NO_x를 대상으로 하며, 서울시내 4곳의 도로변 측정소를 선정하여 도로변대기측정망의 관측 자료를 수집하였고 각 관측점의 주변 반경 내 실측 도로 교통량을 바탕으로 V.K.T.를 산정하여 비교하였다.

2.1 대상지역의 선정

본 연구에서 설정한 지역은 동대문, 신촌, 영등포, 신사의 총 4곳이며, 도로변 대기측정소가 설치되어 있어 해당 지점의 공기중 대기오염물질 농도 측정자료를 매 시간 단위로 저장하고 있다.

동대문 측정소는 중구 을지로 7가에 위치하고 있으며 주변에 동대문쇼핑센터, 동대문역사문화공원 등이 위치하고 있다. 이 지역은 서울시의 주요 도심지역으로, 주로 상업지구로 구성되어 있다. 신촌 측정소는 마포구 노고산동에 위치하고 있으며 대학가 밀집지역으로 연세대, 서강대, 이화여대 등이 주변에 위치하고 있으며 주거, 상업이 복합된 지역이다. 영등포 측정소는 강남구 논현동에 위치하고 있으며 준공업, 상업지역으로 상습 정체구간이며, 올림픽대로와 노들길이 인접해 있는 상습 정체구간이다. 신사 측정소는 금융, 의료, 업무 지구 및 주거지역이다. 네 곳의 측정소 모두, 주변 도로의 교통량이 많은 혼잡지역이라는 공통점을 가지고 있다.

2.2 관측자료의 선정

선정된 4곳의 측정소에서 매 시각 생성되는 질소산화물 농도 자료를 이용하여 본 연구의 관측자료로 활용하였다. 표 1은 연구대상 4개 지역의 도로변 측정소의 2006년 7월 중 시각대별 NO_x 농도 관측값의 평균치로 정리하여 나타낸 것이다.

도로이동오염원의 영향을 뚜렷하게 보기 위하여 난방에너지 사용량 감소로 인해 비산업연소 부문의 배출량이 최소화 되어 도로이동오염원의 배출량 비율이 더욱 증가할 것으로 예상되는 여름철(7월)로 한정하여 연구를 수행하였으며, 1시부터 24시까지 매 시각별 31일간의 관측자료를 평균하여 시각대별 NO_x 농도 자료로 선정하였다. 관측값 중 동대문지역은 총 744개의 관측값 중 739개의 유효 관측값을 활용하였으며, 신촌

지역과 영등포 지역은 736개, 신사 지역은 731개의 유효 관측값을 활용하였다.

일평균 NO_x 농도가 가장 높은 지점은 신사동 지역으로 119ppb로 나타났으며, 그 뒤로 동대문 지역이 92ppb, 신촌 지역이 68ppb, 영등포 지역이 61ppb 순이었다. 가장 농도가 높은 신사동 지역은 가장 낮은 영등포 지역에 비해 NO_x의 농도가 약 2배 수준이었다.

2.3 도로이동오염원 활동도 자료 구축

도로이동오염원의 활동도는 일반적으로 단위시간당 도로구간을 운행하는 차량수인 교통량과 해당 도로구간의 길이를 곱한 값인 Vehicle Kilometer Traveled(이하 V.K.T.)로 나타낸다.

교통량자료는 서울시의 각 구별 교차로 교통량 실측

Table 1. Average NO_x concentration data each time.

Time (h)	Region		Dongdaemun		Sinchon		Yeonwgdeungpo		Sinsa	
	N ¹⁾ (Number)	Conc. ²⁾ (ppb)	N ¹⁾ (Number)	Conc. ²⁾ (ppb)	N ¹⁾ (Number)	Conc. ²⁾ (ppb)	N ¹⁾ (Number)	Conc. ²⁾ (ppb)	N ¹⁾ (Number)	Conc. ²⁾ (ppb)
1	31	78	31	55	31	42	31	91		
2	31	56	31	38	31	30	31	83		
3	31	49	31	33	31	25	31	68		
4	31	43	31	28	31	22	31	63		
5	31	42	31	28	31	22	31	81		
6	31	54	31	45	31	45	31	112		
7	31	78	31	72	31	69	30	129		
8	31	92	31	88	30	74	31	142		
9	31	104	30	90	31	76	31	141		
10	31	114	29	89	31	79	26	130		
11	28	118	28	81	31	75	26	128		
12	29	110	29	76	30	70	31	125		
13	31	103	31	74	29	65	30	118		
14	31	100	31	73	28	63	30	122		
15	31	102	31	77	30	67	31	127		
16	31	109	31	84	31	69	31	124		
17	31	107	31	81	31	71	31	130		
18	31	103	31	74	31	71	31	124		
19	31	102	31	76	31	69	31	136		
20	31	108	31	77	31	73	31	143		
21	31	119	31	79	31	70	31	141		
22	31	115	31	77	31	73	31	145		
23	31	108	31	72	31	69	31	135		
24	31	102	31	73	31	63	31			
Sum or A.V.G. ³⁾	739	92	736	68	736	61	731	119		

¹⁾N: Number of available data.

²⁾Conc.: Average NO_x concentration of each time.

³⁾Sum of available data (N), Average of NO_x Concentration (Conc.).

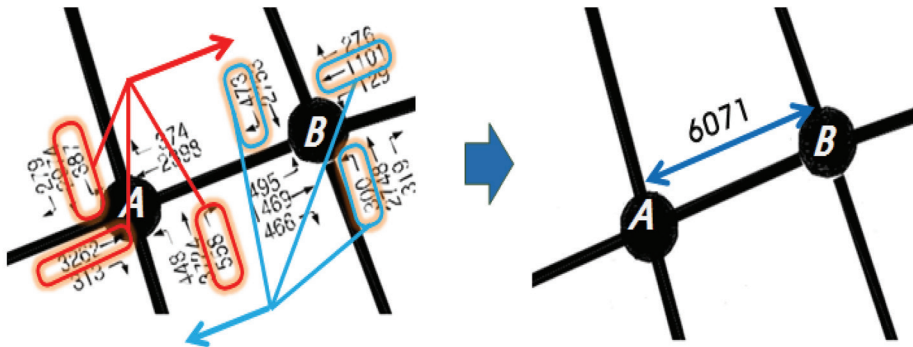


Fig. 2. Construction of traffic volume data of each road section.

Table 2. Emission factor and mixing rate of vehicle in each region.

Vehicle type			Emission factor ¹⁾ (g/km)	Vehicle mixing rate			
				Dongdaemun	Sinchon	Yeongdeungpo	Sinsa
Sedan	Compact	Gasoline	0.058	0.020	0.027	0.026	0.028
		Gasoline	0.065	0.095	0.127	0.124	0.131
	Small	Diesel	0.876	0.023	0.030	0.030	0.031
		LPG	0.364	0.016	0.022	0.021	0.022
	Midsize	Gasoline	0.045	0.166	0.223	0.217	0.230
		Diesel	0.876	0.040	0.053	0.052	0.055
		LPG	0.110	0.028	0.038	0.037	0.039
	Luxury-size	Gasoline	0.045	0.095	0.128	0.124	0.131
		Diesel	0.876	0.023	0.031	0.030	0.031
		LPG	0.110	0.016	0.022	0.021	0.022
	Taxi	LPG	0.253	0.208	0.067	0.083	0.074
	Van	Gasoline	0.150	0.001	0.001	0.001	0.001
Diesel		0.650	0.033	0.028	0.043	0.034	
LPG		0.073	0.020	0.017	0.026	0.021	
Bus	Diesel	12.041	0.029	0.023	0.025	0.017	
	CNG	5.126	0.012	0.007	0.006	0.005	
Truck	Light	Diesel	0.496	0.071	0.121	0.101	0.090
	Middle	Diesel	3.433	0.004	0.011	0.010	0.009
	Heavy	Diesel	16.909	0.003	0.016	0.011	0.010
Motor cycle	Gasoline	0.100	0.097	0.009	0.012	0.017	

¹⁾Emission factor of NO_x (NIER, The manual of calculation methods of air pollutants emissions of Korea III)

조사자료를 수집하여 각 교차로에서 해당 도로구간의 방향으로 진행되는 차량수의 합계를 해당 도로구간의 교통량으로 하였다. 그림 2는 교차로 교통량 조사자료를 이용해 해당 구간의 교통량을 산정하는 방법을 나타낸 그림이다. A 교차로에서 B 교차로로 직진, 우회전, 좌회전하여 이동하는 단위시간당 교통량의 총합과

B 교차로에서 A 교차로로 직진, 우회전, 좌회전하여 이동하는 단위시간당 교통량의 총합을 더하여 AB 도로구간의 단위시간당 교통량이 산정된다.

차종에 따라 NO_x의 배출량이 차이가 나기 때문에, 이를 고려하여 교통량을 보정하였다. 산정된 교차로 교통량은 차종의 구분 없이 계수된 값이므로, 서울시

의 각 구별로 조사된 차종별 혼입률 자료와, 차종별 NO_x 배출계수 자료(NIER, 2013)를 이용해 각 차종별 교통량의 가중치를 적용하였다. 표 2에 각 지역의 차종별 혼입률과 배출계수를 나타냈다.

승용차의 평균 NO_x 배출량인 0.342 g/km를 기준으로 하여 NO_x 배출계수 비율에 따라 차종별 교통량 값을 보정하였다. 보정식은 다음과 같다.

$$t_{rev.} = t_{raw} \times \sum \left(\frac{e_j}{e_s} \times m_j \right)$$

where,

- t_{rev.} : revised traffic volume (vehicles/h)
- t_{raw} : raw data of traffic volume (vehicles/h)
- e_j : emission factor of NO_x of vehicle type “j” (g/km)
- e_s : average emission factor of NO_x of sedan (g/km)
- m_j : vehicle mixing rate of vehicle type “j”

본 연구에서는 관측점을 중심으로 하여 50 m부터 500 m까지 50 m 간격으로 총 10개 반경을 설정하였으며 각 반경별로 해당 반경 내에 위치하는 도로의 길이를 Geographic Information System 프로그램 (ArcGIS 10.2)를 이용하여 산정하였다. 그림 3은 동대문 지역의 반경 설정에 대한 예시이다.

그림 4는 해당 반경 내의 V.K.T. 산정 방법을 나타낸 것이다. 설정한 반경 내에 위치한 모든 도로를 해당 반경의 동심원으로 잘라내어 구간의 길이를 산정하고, 앞서 해당 구간의 차종별 혼입률이 보정된 단위시간당 교통량과 곱하여 V.K.T.를 산정한다. 설정반경 내의 V.K.T. 산정식은 식(1)과 같다.

$$V.K.T._r = \sum_i (t_i \times l_i) \tag{1}$$

where,

- V.K.T._r : total V.K.T. in radius “r” (vehicles · km/h)
- t_i : revised traffic volume of section “i” (vehicles/h)
- l_i : length of section “i” (km)
- r : radius from the center (m)
- i : section of road

전술한 방법론을 이용하여 50 m부터 500 m까지 설정한 10개의 각 반경별로 포함하는 도로의 총 V.K.T. 합을 산정할 수 있으며, 각 지역별 설정반경에 따른 V.K.T.는 다음 표 2와 같이 나타났다. 산정된 V.K.T.는

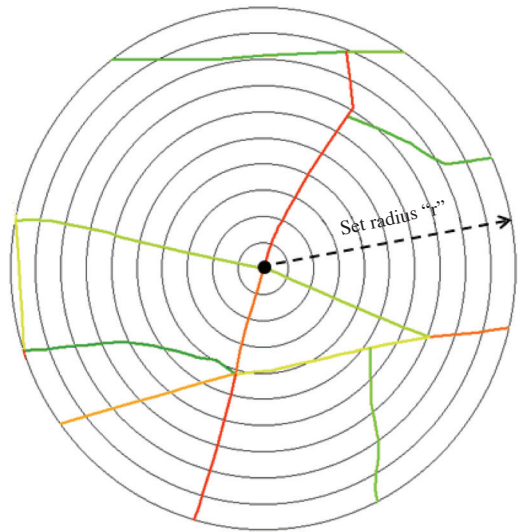


Fig. 3. Setting Radius from the center.

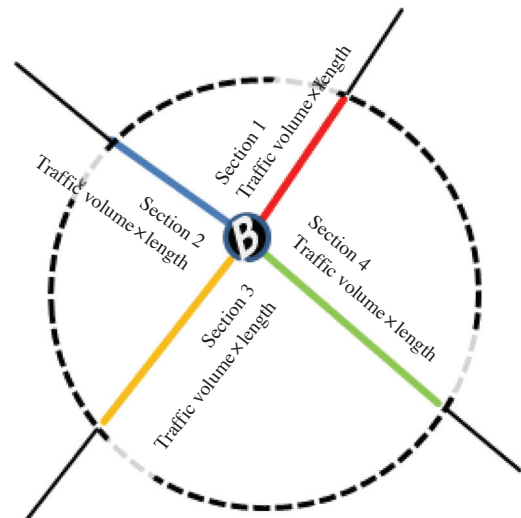


Fig. 4. Calculation of V.K.T. of each section.

오전 침두시인 9시의 교통량 조사자료를 기반으로 산정되었기 때문에 하루 24시간의 시각대별 V.K.T.를 산정하기 위해서 서울시의 시간대별 교통량 변화율을 적용하여 각 시각별 V.K.T. 자료를 생성하였다.

표 3은 교통량 조사자료가 구축된 오전 9시에 대하여 4개 지역의 설정반경별 V.K.T. 산정 결과이다.

Table 3. V.K.T. in radius "r" (AM 9:00).

Radius 'r' (m)	Total V.K.T.r in radius 'r' (vehicles · km/h)			
	Dongdaemun	Sinchon	Yeongdeungpo	Sinsa
50	1,309	1,698	2,997	1,695
100	2,622	3,366	5,975	3,373
150	3,927	5,550	8,949	5,282
200	6,217	7,710	11,439	6,829
250	10,400	9,437	14,910	8,526
300	14,122	12,244	19,115	10,251
350	16,025	13,548	21,342	23,390
400	18,152	15,987	28,841	25,814
450	20,142	16,491	35,969	37,961
500	21,473	18,723	37,213	44,073

3. 연구 결과

3.1 질소산화물 관측농도값과 V.K.T.의 상관관계

앞서 정리한 도로변 측정소의 질소산화물 관측농도 값 C를 y축으로 하고, 도로이동오염원의 활동도 자료인 V.K.T.를 x축으로 하여 상관관계식을 도출하면 식 (2)와 같이 관측점의 질소산화물 농도값 C를 V.K.T.에 대한 일차함수로 나타낼 수 있었으며 설명력 (R²)은 0.76~0.90으로 높게 나타났다.

$$C = a_r \cdot V.K.T._r + b \quad (2)$$

where,

- C : NO_x concentration of center (ppb)
- a_r : impact factor of radius "r" (ppb · h / vehicles · km)
- V.K.T._r : total V.K.T. in radius 'r' (vehicles · km/h)
- b : background concentration (ppb)
- r : set radius from center (m)

위 수식에서 기울기 (a_r)은 V.K.T.와 NO_x 농도 간의 영향계수로서 해당 반경 내의 V.K.T. 증가가 관측점의 농도에 영향을 주는 정도를 나타낸다. y절편에 해당하는 b값은 중요한 의미를 가지는데, V.K.T.이 "0"일 때의 관측점의 예상농도로, 도로이동오염원이 배제된 배경농도를 뜻한다.

그림 5는 동대문, 신촌, 영등포, 신사 지역의 도로변 측정소의 질소산화물 농도와, 반경 100 m 내의 V.K.T. 합(V.K.T.₁₀₀)에 대하여 그래프로 나타낸 것이다.

동일한 방법으로 50 m부터 500 m까지 10개의 다른

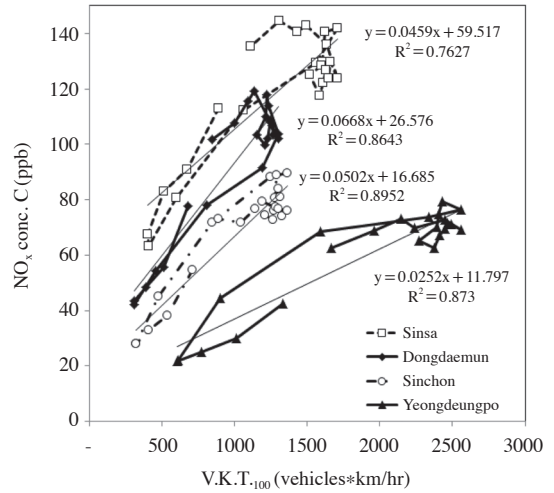


Fig. 5. NO_x concentration and V.K.T.₁₀₀.

크기로 설정한 반경별로 V.K.T._r에 대한 C의 일차 함수 식으로 나타낼 수 있으며, 각 지역별로 다음 그림 6과 같이 나타난다.

일차함수식의 영향계수는 설정한 반경이 커질수록 작은값을 나타내지만, 배경농도 b값은 설정한 반경에 관계없이 동일 지역에서는 일정한 값을 나타낸다. 네 개의 연구 대상 지역에서 모두 설정반경이 증가할수록 V.K.T.의 총합이 증가하므로, 그래프상의 기울기인 영향반경이 감소하였다.

동대문 지역은 도로이동오염원을 제외한 배경농도가 약 27 ppb로 확인됨에 따라 도로이동오염원에 의한 일평균 NO_x 농도는 65 ppb로, 동대문 지역의 일평균 NO_x 오염농도인 92 ppb의 약 70%가 도로이동오염원에서 기인하는 것으로 나타났다. 반경 50 m에서의 영향계수는 0.0665 ppb · h/vehicles · km로 네 개 연구대상 지역 중 가장 크게 나타났다. 이는 50 m 반경에서 가장 영향계수가 낮은 영등포 지역에 비해 약 3.1배 수준으로, 동대문 지역의 단위 V.K.T.당 NO_x 농도 증가에 기여하는 정도가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 설정반경이 증가될수록 영향계수는 감소되어 반경 500 m에서는 0.0041 ppb · h/vehicles · km로 나타났다. 500 m 반경에서는 50 m 반경 내에서의 비교하여 단위 V.K.T. 증가당 중심점의 농도에 미치는 영향이 약 16분의 1 수준으로 감소되는 것으로 해석할 수 있다.

신촌 지역은 배경 농도가 약 17 ppb로 확인됨에 따

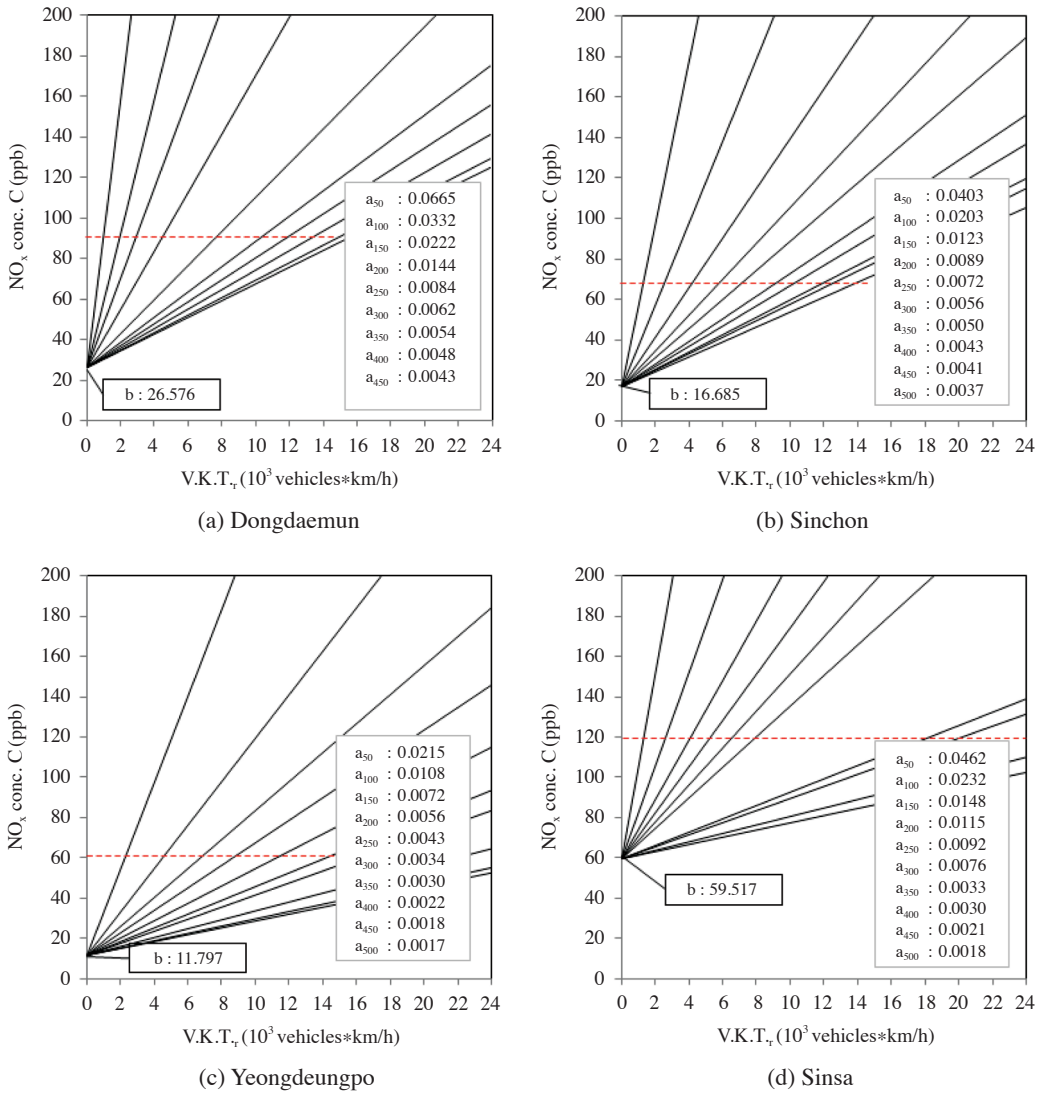


Fig. 6. Linear function formular of each radius. ※ ----- : average daily NO_x concentration

라 도로이동오염원에 의한 일평균 NO_x 농도가 51 ppb로, 신촌 지역의 일평균 NO_x 오염농도인 68 ppb의 약 75%가 도로이동오염원에서 기인하는 것으로 나타났다. 반경 50 m 내에서의 영향계수는 0.0403 ppb · h/vehicles · km로 나타났으며 설정반경이 증가될수록 감소하지만, 감소폭이 네 개의 연구대상 지역 중 가장 적은 특성이 나타났다.

영등포 지역의 배경농도는 약 12 ppb 수준으로 확인됨에 따라 도로이동오염원에 의한 일평균 NO_x 농도는

49 ppb로, 영등포 지역의 일평균 NO_x 오염농도인 61 ppb의 약 80%가 도로이동오염원에서 기인하는 것으로 나타났다. 50 m 반경에서의 영향계수는 0.0215 ppb · h/vehicles · km로 가장 작았으며, 50 m 반경에서의 영향계수가 가장 큰 동대문 지역에 비해 약 37% 수준에 불과하였다.

신사동 지역은 4개의 연구대상 지역 중 배경농도의 값이 가장 높은 지역으로 약 60 ppb로 확인됨에 따라 도로이동오염원에 의한 일평균 NO_x 농도는 59 ppb로,

Table 4. Impact factor and background concentration.

Region \ Radius	Dongdaemun		Sinchon		Yeungdeungpo		Sinsa	
	a_r (ppb · h / vehicles · km)	b (ppb)	a_r (ppb · h / vehicles · km)	b (ppb)	a_r (ppb · h / vehicles · km)	b (ppb)	a_r (ppb · h / vehicles · km)	b (ppb)
50 m	0.0665	26.576	0.0403	16.685	0.0215	11.797	0.0462	59.517
100 m	0.0332	26.576	0.0203	16.685	0.0108	11.797	0.0232	59.517
150 m	0.0222	26.576	0.0123	16.685	0.0072	11.797	0.0148	59.517
200 m	0.0144	26.576	0.0089	16.685	0.0056	11.797	0.0115	59.517
250 m	0.0084	26.576	0.0072	16.685	0.0043	11.797	0.0092	59.517
300 m	0.0062	26.576	0.0056	16.685	0.0034	11.797	0.0076	59.517
350 m	0.0054	26.576	0.0050	16.685	0.0030	11.797	0.0033	59.517
400 m	0.0048	26.576	0.0043	16.685	0.0022	11.797	0.0030	59.517
450 m	0.0043	26.576	0.0041	16.685	0.0018	11.797	0.0021	59.517
500 m	0.0041	26.576	0.0037	16.685	0.0017	11.797	0.0018	59.517

신사동 지역의 일평균 NO_x 오염농도인 119ppb 약 50%가 도로이동오염원에서 기인하는 것으로 나타났다. 50 m 반경에서의 영향계수는 0.0462 ppb · h/vehicles · km로 신촌 지역과 유사한 수준이었다.

표 4는 각 지역별, 설정반경별로 산정된 영향계수와 배경농도값을 정리한 것이다.

3. 2 설정반경에 따른 영향계수의 변화

각 지역별로 설정반경에 따라 영향계수가 어떻게 변화하는지 알아보기 위해서 설정반경(r)과 영향계수(a_r)의 관계식을 도출하였다. 그림 7은 각 지역별 설정반경과 그 반경에서의 영향계수값을 표시하여 나타난 그래프이다.

각 관측지역의 영향계수는 설정반경에 대하여 거듭제곱함수 형태로 나타났고, 각각의 설명력(R²)는 4개 지역 모두 0.93 이상으로 매우 높게 나타났다.

$$a_r = k \cdot r^v$$

where,

a_r : impact factor (ppb · h /vehicles · km)

r : set radius (m)

k : proportional constant, related NO_x

v : decrease exponent, related V.K.T._r

각 지점별로 영향계수를 설정반경의 거듭제곱함수 형태로 나타낸 수식은 표 5와 같다. 영향계수의 감소지수(v)는 -1.061~-1.419로, 설정반경과는 반비례관계에 있음이 확인되었다.

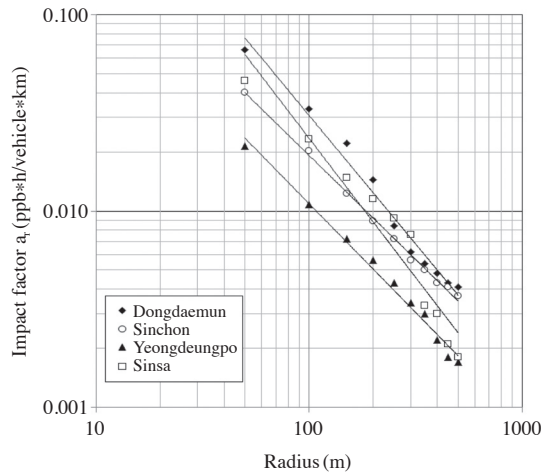


Fig. 7. Impact factor of each set radius.

설정반경이 증가함에 따라 V.K.T.의 증가폭이 가장 큰 신사동 지역의 영향계수 감소 지수가 -1.419로 가장 급격히 감소하였다. 신촌 지역은 설정반경이 증가함에 따라 영향계수의 감소지수가 -1.061로 나타나 4개 지역 중 가장 소폭으로 감소하였다.

4. 연구결과의 검증 및 고찰

4. 1 대기확산모델과의 결과 비교

대기확산모델에 의한 관측지점에서의 대기오염도 예측값과 본 연구에서 도출한 일차함수식을 이용해 예

Table 5. Functional formula of set radius for impact factors.

Region	Functional formula	Predictive power (R ²)
Dongdaemun	$a_r = 12.876 \cdot r^{-1.311}$	0.983
Sinchon	$a_r = 2.549 \cdot r^{-1.061}$	0.997
Yeungdeungpo	$a_r = 1.8082 \cdot r^{-1.110}$	0.989
Sinsa	$a_r = 16.193 \cdot r^{-1.419}$	0.933

측한 값의 비교를 수행하였다. 대기확산모델은 가우시안 확산방정식을 기본으로 하는 ICSST3 (Industrial Source Complex Short Term Model 3)를 이용하여 4개 지점의 도로변 대기측정소를 중심으로 반경 500 m 내의 도로를 배출원으로 설정하여 V.K.T.를 활동도로 하고 차종별 NO_x 배출계수를 적용하였다. 그림 8은 각 측정소의 관측값과 본 연구에서 도출한 일차함수식에

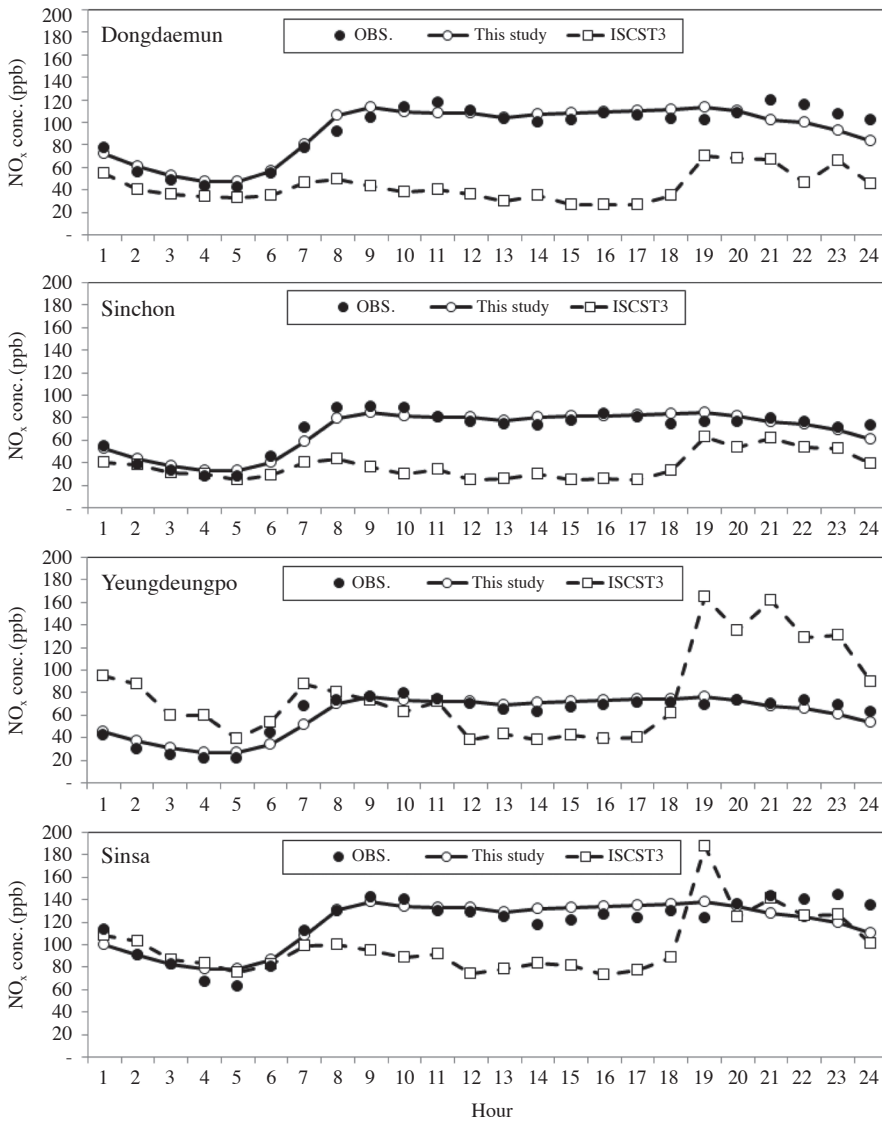


Fig. 8. Comparison of NO_x concentration of observed & predicted. OBS.: Average observed concentration of NO_x in July 2006, this study: Average predicted concentration of NO_x by regression model in July 2006, ISCST3: Average predicted concentration of NO_x by ISCST3 model in July 2006

Table 6. Prediction of NO_x concentration in 50% decreased V.K.T. (AM 09:00).

Region	Observed conc.	Background conc.	Attributed conc. ¹⁾	Current V.K.T. ₁₀₀	Decreased V.K.T. ²⁾	Predicted conc. ³⁾	Conc. decrease rate ⁴⁾
	C (ppb)	b (ppb)	C-b (ppb)	V.K.T. ₁₀₀ (vehicles*km/h)	V.K.T. ₁₀₀ (vehicles*km/h)	C' (ppb)	(%)
Dondaemun	103.7	26.6	77.1	2,622	1,311	70.1	-32.4
Sinchon	89.7	16.7	73.0	3,366	1,683	50.9	-43.3
Yeungdeungpo	76.4	11.8	64.6	5,975	2,988	44.1	-42.3
Sinsa	142.0	59.5	82.5	3,373	1,687	98.7	-30.5

¹⁾Attributed conc.: NO_x concentration that attributed in mobile sources.
²⁾Decreased V.K.T.: 50% decreased V.K.T.
³⁾Predicted conc.: NO_x concentration in 50% decreased V.K.T.
⁴⁾Conc. decrease rate: Decrease rate of predicted NO_x concentration contrast observed.

Table 7. Prediction of target V.K.T. for 30% reduction of NO_x concentration (AM 09:00).

Region	Observed conc.	Background conc.	Attributed conc. ¹⁾	Current V.K.T. ₁₀₀	Target conc. ²⁾	Target V.K.T. ³⁾	V.K.T. decrease rate ⁴⁾
	C (ppb)	b (ppb)	C-b (ppb)	V.K.T. ₁₀₀ (vehicles*km/h)	C' (ppb)	V.K.T. ₁₀₀ (vehicles*km/h)	(%)
Dondaemun	103.7	26.6	77.1	2,622	72.6	1,386	-47.1
Sinchon	89.7	16.7	73.0	3,366	62.8	2,271	-32.6
Yeungdeungpo	76.4	11.8	64.6	5,975	53.5	3,860	-35.4
Sinsa	142.0	59.5	82.5	3,373	99.4	1,719	-49.1

¹⁾Attributed conc. : NO_x concentration that attributed in mobile sources.
²⁾Target Conc. : Target NO_x concentration that 30% reduction.
³⁾Target V.K.T. : Target V.K.T. to achieve the target NO_x concentration value. It was calculated by estimation function.
⁴⁾V.K.T. decrease rate : Decrease rate of target V.K.T. contrast Current.

의해 예측한 값, ISCST3 모델에 의한 예측값을 나타낸 비교 그림이다. ISCST3의 예측값은 실제 관측값과 다소 차이가 있으며, 하루 중 변화 패턴도 관측값의 변화 패턴과 차이가 있는 반면, 본 연구의 예측값은 상대적으로 실제 관측값을 잘 모사하고 있다.

4. 2 교통수요관리 시나리오 활용 방안

본 연구에서는 관측점으로부터의 여러 개의 반경을 설정하여 각 반경 내 실제 도로이동오염원의 활동도 자료인 V.K.T.와 중심의 도로변 대기측정소에서 관측된 NO_x 농도의 관계식을 도출하였으며, 모두 설명력이 높은 일차함수식의 형태로 나타낼 수 있었다.

지역별로 산정된 각 일차함수식을 이용하여 도로이동오염원의 활동도가 변화하였을 경우 관측점에서 예상되는 NO_x의 농도값을 예측할 수 있다.

표 6은 현재의 V.K.T.에서 V.K.T.가 50% 감축되었을 경우로 가정하여 관측점에서 예상되는 농도값을 본 연

구에서 도출한 추정식으로 산정한 결과이다. 교통량을 50% 감축시키면 각 지역의 NO_x 농도는 30~43% 정도 줄어드는 것을 볼 수 있다.

표 7은 관측지점의 NO_x 농도를 현재 농도에서 30% 줄이는 것으로 가정했을 때, 감축해야 하는 V.K.T. 목표치를 나타낸 것이다. 각 지역별로 NO_x 농도를 30% 감축하기 위해서는 32~50%의 V.K.T.를 감축해야 하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

서울시의 주요도로의 교차로 교통량 실측자료를 바탕으로 실제적인 도로이동오염원의 활동도를 산정하였으며, Geographic Information System을 활용하여 다양한 원형반경 내의 총 V.K.T.를 산정할 수 있었다. 본 연구에서 다룬 4개의 대상지역은 모두 차량의 통행이

많고 도로정체가 발생하는 지역이며, 중심점의 NO_x 농도를 설정한 반경 내의 V.K.T.에 대한 설명력이 높은 일차함수 형태로 표현할 수 있었다.

본 연구에서 산정한 일차함수식은 단위 V.K.T. 변화량당 NO_x 농도 변화량을 나타내는 영향계수 a, 값을 포함하는 도로이동오염원과 관계된 항과 도로이동오염원이 배제되었을 때 예상되는 배경농도 b값으로 이루어진 항으로 구분할 수 있었으며, 신사동 지역과 같이 도로이동오염원에 의한 영향 못지않게 그 이외의 오염원에 대한 관리가 중요한 지역의 확인도 가능하였다.

기존의 대기오염 모델은 기상요소, 지형자료, 토지이용 등 여러 입력자료를 필요로 하였음에도 불구하고 부정확한 결과를 도출하기도 하였는데, 본 연구의 일차함수는 매우 간단하지만 설명력이 높은 형태로 V.K.T. 변화에 의한 NO_x의 농도변화를 추정해 볼 수 있어, 교통수요관리 등의 정책 수립 시, 사전예측단계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

References

Ahn, W.S. (2007) Sensitivity Analysis of air pollutants disper-

sion model in the road neighboring area due to the line source - The object on ISCST3, CALINE4 model -, J. Env. Sci. Inter., 16(6), 715-723. (in Korean with English abstract)

Kim, J.H. (2005) A study on the characteristics of atmospheric concentrations of NO_x at roadside in Seoul, University of Seoul, South Korea. (in Korean with English abstract)

Lee, D.H., S.S. An, H.M. Song, O.H. Park, K.S. Park, G.Y. Seo, Y.G. Cho, and E.S. Kim (2014) The effect of traffic volume on the air quality at monitoring sites in Gwangju, J. Environ. Health Sci., 40(3), 204-214. (in Korean with English abstract)

NIER (National Institute of Environmental Research) (2013) The manual of calculation methods of air pollutants emissions of Korea III, Incheon, 246-268.

Pandey, S.K., K.H. Kim, S.Y. Chung, S.J. Cho, M.Y. Kim, and Z.H. Shon (2008) Long-term study of NO_x behavior at urban roadside and background locations in Seoul, Korea, Atmos. Environ., 42, 607-622.

Park, J.S. (2010) Analysis on the relationship between observational traffic volumes and air pollution, University of Seoul, South Korea. (in Korean with English abstract)

Park, S.K., S.D. Kim, and J.J. Lee (2000) Air pollution prediction at highway tollgate by using real time traffic volume, Kor. J. Env. Hlth. Soc., 26(4), 134-140. (in Korean with English abstract)

Yim, B.B., S.T. Kim, and H.M. Yang (2008) Nitrogen dioxide measurement with diffusive passive samplers at the curbside points in Daejeon, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24(2), 143-152. (in Korean with English abstract)