

차량 배출물로 인한 고속도로변 CO 및 TSP의 단기 오염 농도의 평가

An Evaluation of Short-Term Concentrations of CO and TSP From Vehicle Emissions Near Highway

장 미 숙 · 이 진 홍

충남대학교 공과대학 환경공학과
(원고접수; 1994. 4. 18)

Mi-Suk Jang, Jin-Hong Lee

Dept. of Environmental Engineering, Chungnam National University
(Received 18 April 1994)

Abstract

The research described in this paper is conducted to estimate the short-term concentrations of nonreactive pollutants such as *CO* and *TSP* from vehicle emissions near Kyungbu Highway. An emphasis is placed on the development of a model for a hourly traffic volume for each vehicle type, which is based on real traffic data. By using the model and the calculated emission factor due to vehicle speed for each vehicle type, the emission rate of *CO* and *TSP* for each traffic line is computed. The hourly emission rate and meteorological data are used to simulate by *HIWAY-2* for the distance of 5m and 10m from the downwind edge of Kyungbu Highway located in relatively uncomplicated terrain.

1. 서 론

자동차 배기가스와 같은 이동오염원에 의한 오염도 평가 연구는 평가 대상지역에서 대상 오염물질의 배출원이 독립적이기 보다는 복합적이고 따라서 이동오염원에 의한 영향만을 별도로 실측하기가 실제로 어려운 실정이다. 그러므로 이동오염원에 의한 오염도 분석에는 모형의 이용이 필수적이라 할 수 있는데, 이러한 모형은 여러가지 가정 상태에서 복잡한 실제 상황을 단순화한 것이기 때문에 모형을 이용한 오염도 분석에는 정확도의 문제가 따르지만 현재로서는 가능한 유일한 수단이라 할 수 있다.

본 연구는 경부고속도로 수원 부근 및 서울 톨게이트에 대해 92년 10-12월의 기상자료 및 고속도로 통행량 자료를 분석하고 특히 개별 차종의 시간대별 교통량에 대한 모델을 개발한 후 *HIWAY-2*

모형을 이용하여 차량 배출물로 인한 고속도로 주변의 *TSP* 및 *CO*의 단기 대기 오염도를 추정하고자 한다.

오염도 평가의 대상지역은 서울 톨게이트-수원 구간내 약 1km 길이의 남북방향으로 뻗은 편도 4차선의 상대적으로 평지인 지역이고, 이 지역에서 차량의 고속주행시 고속도로 주변의 오염도를 평가한다. 또한 서울 톨게이트가 위치한 지점의 남북 100m 구간을 선정하여 저속시의 도로 주변 오염상태를 평가한다. 오염도 평가 기간은 92년 10-12월을 대상기간으로 하였다.

2. 입력자료 및 분석방법

2.1 기상자료

풍향은 36 방위로 하고 1m/s 이하의 저풍속 혹

은 무풍속의 경우는 확산 미분 방정식을 풀기 위한 가정(풍하 방향에서는 회석이 확산보다 우세하다)을 위배하게 되어 HIWAY-2 모델은 이러한 경우의 확산을 모사할 수 없기 때문에 1m/s 이하 저풍속 및 calm 풍속을 1m/s로 가정하였다. 또한 calm 풍속시 풍향은 바로 전시간 풍향을 이용하고 calm 풍속보다는 크지만 1m/s 이하 저풍속의 경우에는 측정된 풍향이 존재하는 경우 그 풍향을 그대로 이용한다. 만약 2시간 이상 연속으로 calm 풍속이 지속된다면 풍향은 근접시간대의 풍향을 이용한다(U.S. EPA, 1977).

매시간별 안정도는 Pasquill 안정도 판정기준에 따라 지상풍속 및 운량과 태양고도를 연관하여 안정도를 판정하였다. 운량은 매 3시간 마다의 실측 자료를 기준으로 하여 일일 24시간의 매시간 운량 변화를 선형적으로 가정하여 추정하였다. 혼합고는 대상지역이 도시가 아니기 때문에 오산지역의 오전 9시의 고도별 환경감울선과 수원역의 일 최고온도를 지면온도로 한 단면곡선이 만나는 최대혼합고(H_m)만을 산출(Holzworth, 1967)한 후 다음과 같은 방법으로 매시간별 혼합고를 추정하였다(U.S. EPA, 1977).

- (1) 일몰후-일출전: 대기 안정도가 중립 또는 안정인데, 전날 일몰시 혼합고와 당일 14시의 최대혼합고를 선형내삽하여 구한다. 비도시 지역의 일몰후-일출전의 대기 안정도가 안정인 경우, Holzworth의 혼합고 산정 방법의 확실성 때문에 중립안정도로 가정하여 계산한다.(Wackter and Foster, 1986).
- (2) 일출후-14시: 일출전 대기가 중립이면 (1)의 혼합고 산정 방식과 같고, 안정이면 0m와 당일의 14시 최대혼합고를 선형내삽하여 구한다.
- (3) 14시-일몰전: 당일 최대 혼합고와 같다.

2.2 교통량 자료 및 차종별, 시간대별 교통량 모델의 개발

서울 톨게이트에서 수원 진입 교차로까지의 경부고속도로 일부구간은 남북으로 뻗은 편도 4차선의 전형적인 at-grade형 고속도로로 각 차선의 폭은 3.6m이며 중앙분리대의 폭은 3m이고 이 구간내에서 다른 고속도로와의 교차지역은 없고 따라서 구간내 외부의 교통량 유입 및 유출은 없다. 즉, 이 구간내 교통량은 서울 톨게이트의 상하행 통과차량과 동일하게 간주할 수 있다.

교통량은 도로공사의 서울 영업소에서 판매한 도로 이용권의 차종별 판매 기록과 회수 기록을 조사하고, 톨게이트 근무자가 추정된 종별 점유율의 대

략적 비율을 고려하여 1종을 승용차(80%), 2.5톤 미만 트럭(10%), 16인승 이하 승합차(10%)로 분류하였다. 2종은 버스(95%), 17인승 이상 승합차(5%)로 분류하였으며 3종과 4종은 각각 2.5-8톤 트럭과 10톤이상 화물의 교통량으로 간주하였다. 기타(면제 및 도주)의 경우는 일별 교통량이 가장 많은 승용차의 교통량에 포함하였다.

시간대별 교통량은 분석된 바 없기 때문에 통계이트 근무자의 교통량 추이 판단을 고려하여 24시간 교통량 추이를 추정하였다. 차량형태 및 하루의 시간대별 교통량의 변화추이를 추정, 모사한 모형이 그림 1에 나타나 있다. 그림 1(a)는 승용차에 대한 평일과 토요일 그리고 일요일 및 휴일의 시간대별 교통량 변화 추이이다. 평일의 경우 일일 두번의 피크(7-10시, 18-20시)가 발생하는데 이는 출퇴근에 의한 것이다. 토요일 오후(15-21시)와 일요일 오전(7-12시)의 경우는 단기 여행을 떠나는 차량으로 교통량이 증가하며 일요일 오후(15-21시)는 여행나간 차량이 돌아오는 시간으로 교통량이 다시 증가함을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 교통량의 피크가 발생하는 시간대의 매시간 교통량은 정상적 교통량 시간대의 매시간 교통량의 약 2배정도로 추정된 것이다. 새벽 1시-6시는 교통량이 현저히 떨어질 것이라고 가정하여 이 시간대의 교통량은 일일 교통량의 5%를 점유할 경우와, 10%를 점유할 경우로 가정하고 이 교통량을 시간수로 나누어 매시간 교통량으로 추정하였다.

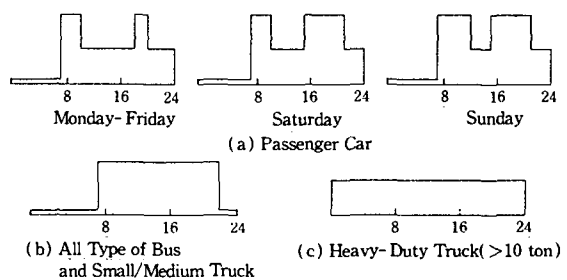


Fig. 1. Variation of hourly and daily traffic volume by vehicle type.

그림 1(b)는 버스 및 8톤 미만 트럭, 승합차의 시간대별 교통량 변화 추이이다. 버스 및 8톤 미만 트럭과 승합차의 경우 평일, 토요일, 일요일의 차이는 거의 없는 것으로 간주하였다. 다만 밤 11시-새벽 6시는 고속버스 혹은 관광버스 등의 차량이 없으므로 교통량이 급격하게 감소하여 승용차에 대한 것과 같이 이 시간대의 총 교통량은 일일 교통량의 5% 또는 10%를 점유한다고 가정하였다. 그림 1

(c)는 10톤 이상 대형화물의 변화 추이이다. 10톤 이상 화물차량의 경우는 야간 장거리 주행의 경우가 많으므로 요일별 시간별로 거의 같은 분포를 보인다고 가정하였다.

위와 같은 방법으로 시간대별 교통량이 산출되면 주행차선별 차종구분기준에 준하여 8차선 경부고속도로의 각 차선에 다음과 같은 차종별 주행추이를 가정하여 시간대별 차선별 교통량으로 전환시킨다.

- 상, 하행 1차선 : 승용자동차 30%
- 상, 하행 2차선 : 승용자동차 70%, 버스 30%
- 상, 하행 3차선 : 버스 70%, 승합차 30%, 8톤 미만 트럭 30%
- 상, 하행 4차선 : 승합차 70%, 8톤 미만 트럭 70%, 대형화물 트럭 100%

이러한 주행 추이는 실제 상황과는 다소 차이가 있는데 우리나라에서 승용자동차 및 버스의 경우 대부분이 상, 하행의 앞지르기 차선을 주행차선으로 이용하는 경향이 있기 때문이다. 그러나 HIWAY-2 모델은 고속도로변의 풍하농도를 평가하므로 위와 같은 주행 추이를 가정해도 결과에는 차이가 없다. 다만 차선별 주행추이는 각 차선의 배출계수 산정을 추정하기 위해 모형화된다. 승용자동차의 경우는 무연과 유연 사용비율(조 강래 외, 1991)을 고려하여 각 차선의 승용차에 대해 무연 87.2%, 유연 12.8%로 재분배된다.

2.3 오염물질 배출계수 산정

자동차로부터 배출되는 오염물질의 양은 자동차의 종류, 사용연료, 규제기준 적용 및 누적 주행거리 뿐만 아니라 자동차의 평균속도에 크게 좌우된다. 표 1은 평균차속별 TSP 및 CO 배출계수의 회귀상관식(조 강래 외, 1993)과 고속도로내 주행(평균 차속 85km/h)시 배출계수 및 서울 톨게이트에서 정체(평균차속 5km/h)시 배출계수를 나타낸다. 여기서 유연승용차의 TSP 배출계수 및 중형 이상의 버스와 트럭에 대한 CO 및 TSP의 배출계수는 평균차속이 증가하면 배출계수는 감소하고 평균차속이 감소하면 배출계수는 증가한다고 가정하고 소형버스 및 트럭의 차속 변화에 따른 증감율과 비슷하게 배출계수를 가정하였다. 다만 풍하농도가 보수적으로 평가될 수 있도록 소형차량의 증감율과 똑같은 비율로 산출된 수치보다는 다소 높게 배출계수를 가정하였다.

타이어 마모에 의한 입자상물질 발생량(환경처, 1982)은 승용차와 소형버스 및 트럭은 0.118g/km, 중형 및 대형버스와 트럭은 0.230g/km로 하여 배기가스에서 발생하는 분진농도에 추가하였다. 단, 5km/h주행시는 타이어 마모에 의한 분진 발생은 없는 것으로 간주하고 톨게이트 주변 TSP 배출계수 산정에서는 제외하였다.

Table 1. Estimation of emission factor.

				unit : g/km		
Motor vehicle type		Equation	85km/h	21.9km/h	5km/h	
CO	Passenger Car	Unleaded	$Q=14.814 \times V^{-0.392056}$	2.596	3.27	7.882
		Leaded	$Q=271.33 \times V^{-0.682204}$	13.099	31.71	90.502
	Bus	Small	$Q=5.19995 \times V^{-0.3748}$	0.984	1.54	2.845
		Medium		1.4	2.43	6.0
		Heavy-duty		11.0	17.21	32.0
	Truck	Small	$Q=22.3933 \times V^{-0.8352}$	0.548	1.96	5.839
		Medium		1.4	2.43	6.0
		Heavy-duty		6.0	18.59	56.0
TSP	Leaded- Passenger Car			0.004	0.01	0.013
	Bus	Small	$Q=0.839189 \times V^{-0.390452}$	0.148	0.37	0.448
		Medium		0.4	0.76	1.1
		Heavy-duty		1.0	2.39	3.0
	Truck	Small	$Q=1.1737 \times V^{-0.441978}$	0.165	0.42	0.576
		Medium		0.4	0.76	1.1
Heavy-duty			1.1	2.52	3.5	

These equations were derived from the results of driving pattern analysis studies. In these studies, the driving speeds were 4.6-47.2km/hr(조강래 외, 1993).

3. 결과 및 고찰

3.1 기상조건 및 교통량

연구 대상 기간 동안 서남서에서 서북서 사이의 풍향이 주로 발생(29.9%)하였으며, 발생빈도가 가장 높은 풍향은 서풍(14.5%)이었다. 풍속은 무풍이 22.6%, 0.3-1.4m/s의 경우 36.7%, 1.5-2.9m/s의 경우는 29.2%로 3m/s 이상의 풍속(11.5%)보다는 상대적으로 저풍속 상황이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 안정도는 일출과 일몰 사이의 주간에는 거의 '불안정'(1, 2, 3 등급)이었고 일몰후와 일출전의 야간에는 '안정'으로 산출되었다. 연구기간 동안의 월평균 H_{pm} 은 10월-1312m, 11월-1076m, 12월-807m로 12월에 다소 낮았다. 보통 대기오염은 혼합고도가 낮고 대기가 안정한 조건에서 더 심각하게 나타나는데 따라서 대상지역의 경우는 겨울철 야간에 심한 오염도를 나타내게 될 것이라고 추정할 수 있다. 그러나 그림 1에서 대상지역 야간의 교통량은 주간에 비해 현저히 낮다고 조사했고, 그림 2의 일별 교통량 추이를 살펴보면 겨울철(본 연구기간에서는 12월)의 경우는 기상 및 도로상황이 운전시 악조건으로 작용하는 관계로 10-11월의 교통량과 비교해 고속도로 이용 차량이 다소 감소하기 때문에, 실제적으로 모델에 의한 예측오염도는 겨울철 야간의 경우 그리 높지 않았다.

실제자료에 근거하여, 모형을 이용하여 산출한 대상기간(92일)의 차종별(버스, 트럭, 승용차), 시간대별 교통량의 결과는 방대하여 여기에 재록하지 않지만 92년 경부고속도로의 8차선 확장 이후 월평균 천여대 정도의 총 교통량의 증가추이를 보이고 있다.

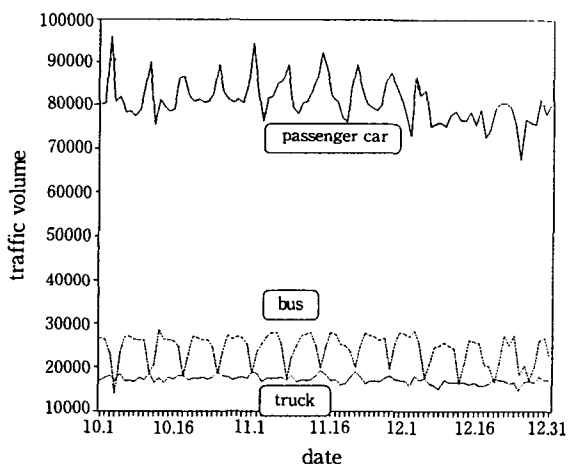


Fig. 2. Daily variation of traffic volume(Oct.-Dec., '92).

3.2 풍하농도

경부고속도로 서울 톨게이트-수원 구간내 남북으로 뻗은 약 1km at-grade형 도로와 서울 톨게이트에서 CO 및 TSP에 대한 풍하방향 5m, 10m 지점의 단기 오염도를 분석한 결과, 대상 풍하거리에서의 배경농도 및 제 2 오염원을 고려하지 않은 단일 선오염원(경부고속도로)에 의한 고속도로변 단기 오염농도는 단기 대기환경기준을 초과하지 않았다(국내 단기 대기환경기준에 따르면 24시간 평균 TSP농도와 8시간 평균 CO 농도는 각각 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 20ppm을 연간 3회 이상 초과할 수 없다). 그러나 대상 풍하거리의 배경농도 및 제 2오염원을 고려한다면 예측농도는 본 연구에서 산출된 수치보다 높게 평가될 것이다. 실제로 서울 톨게이트 주변 10m 이내에 편도 3차선의 국도가 있는데 이 국도에 대한 기본적인 입력자료가 불완전 했기 때문에 본 연구에서는 고려치 않았다.

야간교통량이 일교통량의 5%을 차지할 경우와 10%을 차지할 경우에 대한 풍하방향 5m, 10m 지점의 8시간 평균 CO 및 24시간 평균 TSP의 농도는 표 2와 표 3에 나타나 있다. 표에서 보여주듯이 야간교통량의 점유율을 변화하였을 경우 각 시간대의 풍하농도는 다소 차이가 있었지만 8시간 평균 CO 및 24시간 평균 TSP의 최대농도 및 3번째 높은 농도에 대한 영향은 거의 없었다. 이러한 결과는 TSP의 경우 24시간 non-overlapping average이고, CO의 경우는 8시간 running average로 이 중 중복되지 않는 8시간 평균농도에서 최대농도를 구하였고 따라서, 야간교통량을 변화하였을 경우 각 시간대별 농도의 증감차이가 24시간 및 8시간으로 평균되면서 상쇄되었기 때문인 것으로 사료된다.

각 풍하거리에서 오염농도는 고속도로 정체지역인 서울 톨게이트의 경우 차량 주행(평균차속 85km/h) 구간보다 CO는 4-5배, TSP는 2배 이상 높은 수치를 나타냈다.

4. 결 론

대상기간동안 기상 및 교통량 평가를 통해 HIWAY-2에 의한 고속도로변 단기 대기오염을 평가한 결과, 톨게이트 정체시 선정된 풍하거리에서 오염물농도는 고속주행시의 농도보다 CO는 4-5배, TSP는 2배 정도 높았지만, 단일 선오염원(경부고속도로)에 의한 CO 및 TSP의 풍하농도는 모두 단기 대기환경기준을 초과하지 않았다. 그러나 만약 대상 풍하거리의 배경농도 및 제 2오염원을 고려한다면 예측농도는 본 연구에서 산출된 수치보다 높

Table 2. Maximum and 3rd highest concentration in the case of nighttime traffic assumed to be five percent of daily traffic.

CO : ppm, TSP : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

		Downwind	Westward		Eastward	
			5m	10m	5m	10m
CO	Tollgate	Maximum	14.491	13.392	15.192	14.054
		2nd highest	8.379	7.986	6.930	6.050
		3rd highest	7.039	6.592	6.523	5.549
	Highway	Maximum	3.178	2.935	3.350	3.099
		2nd highest	1.825	1.521	1.503	1.311
		3rd highest	1.740	1.422	1.422	1.211
TSP	Tollgate	Maximum	155.0	142.0	211.0	194.0
		2nd highest	145.0	128.0	147.0	129.0
		3rd highest	143.0	124.0	129.0	114.0
	Highway	Maximum	83.0	76.0	111.0	102.0
		2nd highest	73.0	65.0	64.0	59.0
		3rd highest	72.0	63.0	64.0	57.0

Table 3. Maximum and 3rd highest concentration in the case of nighttime traffic assumed to be ten percent of daily traffic.

CO : ppm, TSP : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

		Downwind	Westward		Eastward	
			5m	10m	5m	10m
CO	Tollgate	Maximum	14.793	13.655	14.894	13.785
		2nd highest	8.383	7.978	6.643	5.796
		3rd highest	7.288	6.804	6.235	5.305
	Highway	Maximum	3.240	2.989	3.279	3.033
		2nd highest	1.824	1.736	1.440	1.255
		3rd highest	1.574	1.467	1.360	1.158
TSP	Tollgate	Maximum	154.0	141.0	204.0	187.0
		2nd highest	146.0	129.0	147.0	129.0
		3rd highest	146.0	127.0	130.0	113.0
	Highway	Maximum	83.0	76.0	107.0	99.0
		2nd highest	74.0	65.0	78.0	69.0
		3rd highest	74.0	64.0	66.0	57.0

게 평가될 것이다. 또한 도로공사 서울영업소의 도로이용권 판매 및 회수기록 조사결과, 92년 경부고속도로 8차선확장과 함께 주행차량은 월평균 천여 대이상의 증가추이를 보이고 있기 때문에 당분간 주행차량에 의한 고속도로변 오염도는 계속해서 증가할 것으로 보인다.

모델에 의한 단기 대기오염도 평가는 서론에서 언급했듯이 적지 않은 문제점과 제약이 있지만 현재로서는 가능한 유일한 수단이라 할 수 있다. 그러나 입력자료의 경우 자동차 배출계수는 기존의 산

출식(도심지의 예측 평균 차량속도(50km/h 이하)와 배출량 분석결과에 의한 산출식)을 이용하여 85km/h의 고속주행 시에 대해 확장해석 하였고 따라서, 이에 대한 오차가 발생할 것이다. 또한 중·대형 버스 및 트럭에 대해서는 소형의 버스 및 트럭에 있어 주행속도에 따른 배출계수의 상승 및 저감을 고려하여 비슷한 수준으로 가정하여 배출계수를 산출한 것이므로 차종별 및 차속별 배출계수를 충분히 고려하였다고 볼 수 없다. 교통량 자료 역시 실제의 도로공사 일교통량 기록에 근거하여 차량형

태 및 하루의 시간대별 교통량의 변화추이 모형을 설정하여 추정하였다.

그러므로 차속의 확장평가에 따른 오차 및 차종별, 시간대별 교통량 변화추이 모형은 추후 검증되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 조강래 외(1993) 자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 69-77.
- 조강래 외(1991) 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(Ⅲ) -이동배출원의 오염물질 배출 부하량 산정을 중심으로-, 국립환경연구원보, 13, 129-139.
- 환경처(1982) 한강유역 조사단 최종보고서.
- Holzworth, G. C.(1967) Mixing Depths, Wind Speed and Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States, J. of Applied Meteorology, 6, 1039-1044.
- Petersen, W. B.(1980) User's Guide for HIWAY2-A Highway Air Pollution Model, EPA-600/8-80-018, U. S. Environmental Protection Agency.
- Rao, S. T. et al.(1980) An Evaluation of Some Commonly Used Highway Dispersion Models, J. of the Air Pollution Control Association, 30(3), 239-246.
- Sistla, G. et al.(1979) A Study of Pollutant Dispersion Near Highways, Atmospheric Environment, 13, 669-683.
- U. S. EPA(1977) User's Manual for Single-Source (CRSTER) Model, EPA-450/2-77-013, U. S. Environmental Protection Agency.
- Wackter, D. J. and Foster, J. A.(1986) Industrial Source Complex Dispersion Model: User's Guide, EPA-450/4-86-005a, U. S. Environmental Protection Agency.