

## 자동차 대기오염물질이 고속도로 인접지역에 미치는 농도 예측에 관한 연구

### A Study of Concentration Prediction of Automobile Air Pollutant Near the Highway

박 성 규 · 김 신 도 · 김 종 호<sup>1)</sup>

서울시립대학교 환경공학과

<sup>1)</sup>한서대학교 환경공학과

(1998년 8월 3일 접수, 1998년 10월 12일 채택)

Seong-Kyu Park, Shin-Do Kim and Jong-Ho Kim<sup>1)</sup>

*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

(Received 3 August 1998; accepted 12 October 1998)

#### Abstract

The influence of transportation on air quality has been elevating in urban area. Air pollutants from automobiles cause primary and secondary air pollution, and need to be tightly controlled.

In this study, the effect of automobile air pollutants on highway vicinity area was evaluated by the comparison of field measurement, and target was for modeling using CALINE3, NO<sub>2</sub> was the target for this work. It was found that the concentration predicted by CALINE3 is overestimated at low wind speed and input data of wind speed requires correction. Based on the measured data, the wind speed was modified by effective wind speed equation [ $U_e = U + 0.24 \cdot \text{EXP}(-p \times U)$ ], and there after the accuracy of CALINE3 calculation was improved neighborhood area of highway. It was also observed that weather conditions and traffic volume affect the concentration of air pollution. Finally, the NO<sub>2</sub> effect of automobile air pollutants on the vicinity area of highway proved to be up to 400~600 m from the highway.

**Key words** : automobile source, CALINE3, effective wind speed

#### 1. 서 론

우리 나라 자동차 등록대수는 1985년 100만대를 넘어선 이후 1997년 7월 1,000만대로 급증하고 있다. 또한, 지금까지 기존의 도로 및 교통계획은 원활한 교통소통을 우선시하여 주변지역의 대기환경적

인 영향을 저감시킬 수 있는 고려가 부족하였다. 자동차로부터 배출되는 대기오염물질은 1차 오염 뿐만 아니라 대기 중에서 광화학 반응을 통하여 스모그 현상 등의 2차 오염을 유발하고 있으므로 이에 대한 철저한 관리가 요구된다(김신도 등, 1996). 최근 대도시의 대기오염은 자동차에 의한 선오염원이 차지하는 비중이 전체 오염원 중에서 상대적으로

크게 증가하고 있다. 이 선오염원에 대한 오염도 평가시 대상 지역의 오염원이 독립적이기보다는 복합적인 현상이기 때문에 선오염원에 의한 영향만을 별도로 실측하기가 어려운 실정이다. 그러므로, 선오염원에 대한 오염도 분석에는 모델에 의한 방법이 많이 이용된다(김정옥 등, 1989).

현재, 대기 확산 모델은 주로 환경영향평가, 대기 오염 피해지역의 파악, 유해물질 누출사고 대책 등에 이용되고 있다. 특히, 대도시권의 오염경보제 운영에 있어서 대형 고정오염원은 조업시간이나 연료 사용량과 관련한 배출량 규제를 통하여 통제가 용이하나, 선오염원의 경우에는 오염원의 이동성으로 인하여 신속하고 정확한 예측이 어려울 뿐 아니라 통제도 쉽지 않다. 전체 대기오염도의 평가시 선오염원에 대한 정확한 평가와 이에 따른 규제가 매우 중요한 역할을 한다(조강래 등, 1991). 그러나, 이러한 모델은 현실적 제약과 여러 가지 가정 상태에서 복잡한 현상을 단순화한 것이기 때문에 실제 대기 오염관리에 적용하는데 있어서 많은 문제점과 한계점을 가지고 있는 것도 사실이다. 이에 대기확산모델을 실제 적용하기 위해서는 현실적 상황에 맞게 모델을 보정하고 검증하는 것이 필요하다. 특히, 현재 환경영향평가 등에서 주로 이용되고 있는 선오염원 예측 모델이 실측조사와의 비교·검토 없이 이용되고 있는 바, 이에 대한 검토를 통한 대기오염 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 기법이 절실히 필요한 실정이다.

본 연구에서는 고속도로 인접지역에서 자동차 대기오염물질인 NO<sub>2</sub>농도의 영향을 실측하고, 현재 선오염원을 대상으로 개발된 CALINE3 모델의 예측치와 현장조사 실측치를 비교·평가하여, 모델 적용시 문제점을 파악하여 적절하게 보정한 후 모델의 농도 예측력을 향상시키고, 자동차에서 배출된 대기오염물질로 인한 인접지역의 대기질 농도변화를 파악하고자 하였다.

## 2. 연구방법 및 내용

### 2.1 현장조사

실제 고속도로 주변의 지형, 교통 및 기상 조건에서 자동차에 의한 대기오염의 영향 및 확산 형태를 검토하기 위하여 연구목적에 적합하다고 판단되는

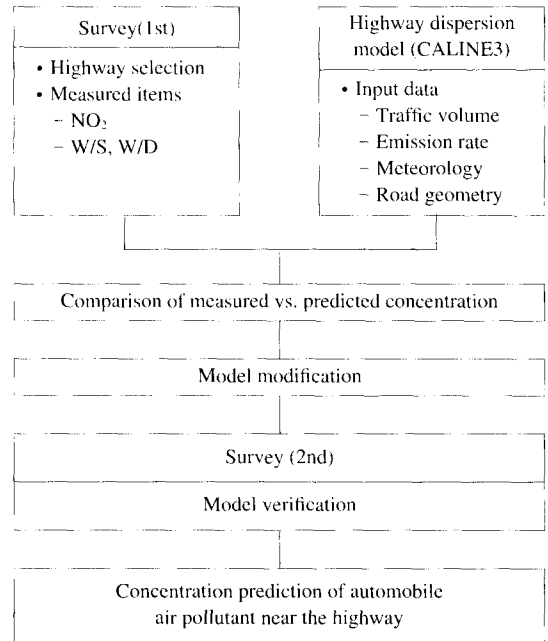


Fig. 1. Flowchart of the study.

고속도로 일부구간을 선정하여 대표적인 자동차 대기오염물질인 NO<sub>2</sub>농도 및 기상인자를 실측하였다. NO<sub>2</sub>는 자동차에서 배출되는 가스상 오염물질 중 VOC의 전구물질로 현재 가장 주목이 되고 있는 대기오염물질이기에 주대상대기오염물질로 선정하였다. 측정 위치는 그림 2와 같으며, 경부고속도로 안성-천안의 일부 구간(안성 틀게이트에서 천안 방향으로 약 2.5 km 지점)인 경기도 안성군 공도면 불당리(고속도로 동쪽)와 용정리(고속도로 서쪽)로 하였으며, 측정 지점은 고속도로를 중심으로 양방향으로 교차하는 농로를 따라 고속도로변에서 약 200 m 떨어진 지점(그림 2)까지 하였다. 측정 지역 주변에는 측정 지점에서 북·서·남쪽으로 약 2.5 km 떨어진 곳에 각각 평택-안성, 평택-천안, 천안-안성간 지방도로가 위치하고 있으며, 반경 약 500 m 내에는 5가구의 가옥이 있을 뿐 대상 고속도로 주변지역의 반경 약 2.5 km내에는 고속도로의 자동차에 의한 오염원외에는 기타의 오염 발생원이 전무한 곳으로 판단하여 선정하였다. 대상 고속도로 구간의 차선 수는 양방향 8차선, 도로 폭은 총 38 m (각 차선 폭 3.6 m, 중앙분리대 3 m, 갓길 3.1 m)이며,

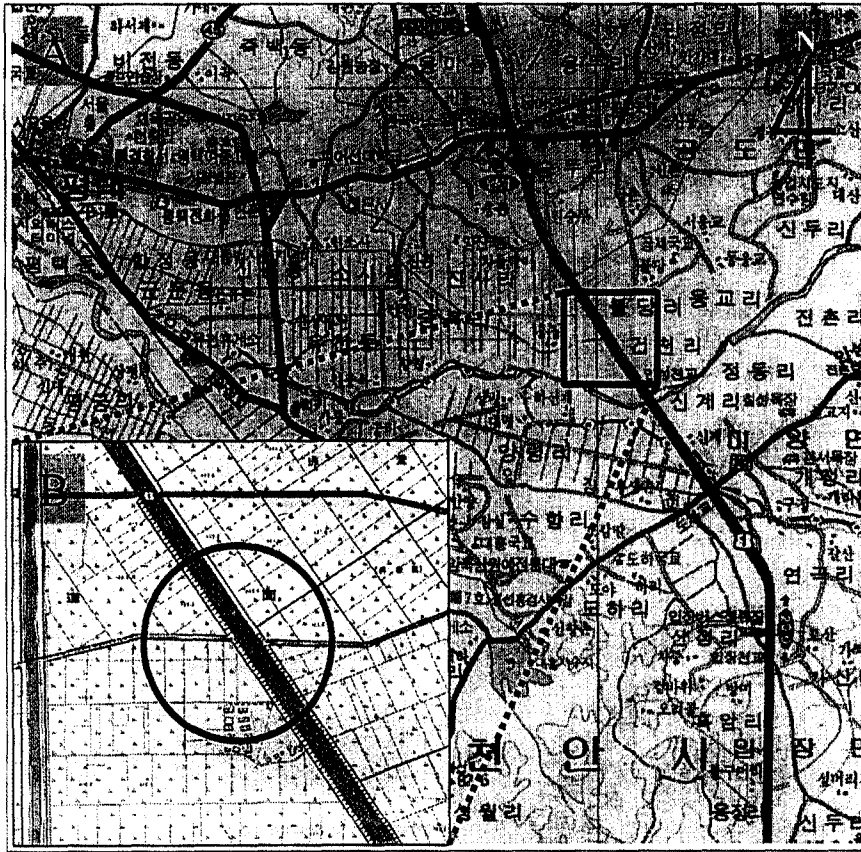


Fig. 2. Sampling site and Ansong-Cheonan Kyongbu highway (A scale: 10 km × 10 km, B scale: 500 m × 500 m).

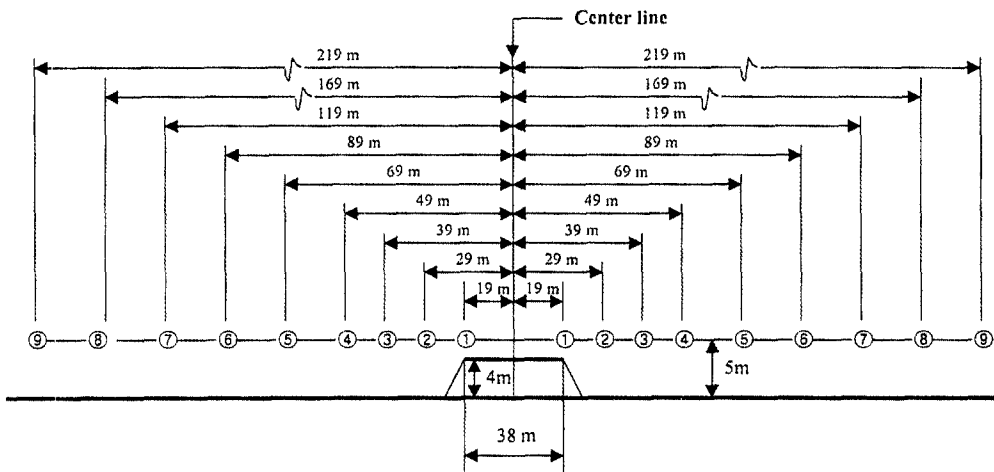


Fig. 3. sampling site (not to scale).

Table 1. NO<sub>2</sub> sampling site.

site NO.	distance from center line (m)
1	19
2	29
3	39
4	49
5	69
6	89
7	119
8	169
9	219

도로 형태는 지면을 기준으로 약 4m 높이로 성토(fill)된 형태이다. 주변의 토지 이용 형태는 농경지이며, 측정당시 벼가 약 85~90cm 정도로 자라고 있었다. 측정 일시는 1997년 8월 23일(토) 13:00부터 8월 25일(월) 12:00까지[약 48시간] 하였다.

오염물질의 수평 이동을 파악하기 위하여 고속도로 변에서 농로를 따라 양방향(동-서)으로 약 200m 까지 일정 거리별로 각각 8개의 측정 지점을 선정하였으며, 측정점의 높이는 지면을 기준으로 약 5m 높이(도로면에서 1m 높이)에 줄을 설치하여 일정하게 유지하였다(그림 3, 표 1). 측정은 공간분포 농도를 동시에 다점으로 측정하기 편리한 NO<sub>2</sub> Passive sampler(Filter Badge NO<sub>2</sub>, ADVANTEC TOYO, JAPAN)를 각 지점마다 3개씩 설치하고, 약 48시간 정도 노출시킨 후 실험실에서 분석하였다. 기상은 Weather monitor II(Davis Co., USA)를 이용하여 풍향, 풍속, 온도, 습도를 측정하였다. 측정 위치는 주변의 영향을 최소화할 수 있도록 도로변에서 약 36m 떨어진 지점 이었으며, 높이는 지면에서 약 5m로 하였다.

## 2.2 CALINE3의 적용 및 입력자료

미국 EPA는 UNAMAP에 수록된 대기오염모델들 중에서 대기오염 규제에 이용할 수 있는 대기오염모델을 선정하여 우선적인 사용을 추천하고 있다. 선오염원 예측모델 중 CALINE3는 규정모델(regulatory model)이고, HIWAY2, PAL2는 권장모델(revised model)로 구분되어 있으며, 본 연구에서는 CALINE3를 채택하여 적용하였다. CALINE3는 가우시안 확산식에 근거하고, 도로상의 오염확산을 예측하기 위해 혼합층(mixing zone) 개념을 채택하여

좁은 미시규모지역(microscale region)에서 대기질을 평가하는 모델이다. 입력자료는 크게 교통량, 배출계수, 오염원 높이 등의 배출원에 관한 부분, 풍향, 풍속, 대기안정도, 혼합고 등의 기상 부분, 기타 지형조건(site geometry), 지형특성(site characteristics) 등이다.

교통량은 배출량을 계산하는 기본자료로서 시간대별·차종별 교통량을 파악하여 자동차에 의해 배출되는 대기오염물질의 배출량을 계산하는데 사용된다. 따라서, 배출량을 산정하기 위해서는 교통량을 실측하여야 하지만, 현장 조사의 어려움으로 인하여 한국도로공사 고속도로 교통량조사(1987~1996년) 자료 중 1992년 경부고속도로 8차선 확장 이후 최근 4년간의 '시간대별 교통량 변화(안성-천안)', '구간별·요일별 월평균 교통량(A.D.T)의 변화(수원-대전)'의 자료와 측정기간 중에 요금소 통과 차량수를 이용하였다. 최근 4년간의 자료를 이용하여 회귀식으로 시간대별·차종별 일교통량을 추정한 후, 연평균 일교통량(A.A.D.T.; Annual Average Daily Traffic)을 식(2.1)과 같이 산정하였다(McShane *et al.*, 1984; May, 1990).

$$A.A.D.T. = \frac{TV}{MF \times DF} \quad [\text{Vehicles/hr}] \quad (2.1)$$

where, A.A.D.T. : Annual Average Daily Traffic

TV : Traffic Volume

MF : Monthly Factor

DF : Daily Factor

A.A.D.T.를 구한 다음 수원-대전간의 월별 가중치(표 2)와 요일별 가중치(표 3)를 적용하여 측정 해당 월·요일의 1일 교통량(Average Daily Traffic; A.D.T.)을 식(2.2)과 같이 산정하였다.

$$A.D.T. = A.A.D.T. \times MF \times DF \quad [\text{Vehicles/hr}] \quad (2.2)$$

where, DF : Daily Factor

MF : Monthly Factor

이와 같은 방법으로 구한 측정 기간중의 시간대별·차종별 교통량은 그림 4와 같다. 일교통량은 약 125,000 vehicles/day였으며, 차종비는 승용차가 약 70%, 버스 15%, 트럭 15%를 차지하였다. 시간대별

Table 2. Monthly factor average variation of A.D.T. according to kind of vehicle on the Suwon-Taejeon Kyongbu highway 1993~1996. (unit : %)

kind of vehicle	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
passenger-car	94.40	92.15	87.88	95.10	94.38	94.45	98.90	121.38	109.68	106.68	105.60	99.35
buses	90.03	87.25	94.50	103.25	103.05	95.38	93.23	102.33	108.23	118.45	105.63	98.60
trucks	78.68	90.93	97.23	99.40	98.23	106.30	104.75	98.50	106.88	103.60	107.25	108.13

\* Source : Traffic counting data, Korea highway corporation.

Table 3. Hourly factor average variation of A.D.T. according to kind of vehicle on the Suwon-Taejeon Kyongbu highway 1993~1996. (unit : %)

kind of vehicle	SUN	MON	TUE	WED	THU	FRI	SAT
passenger-car	137.30	112.63	85.43	84.00	86.35	90.80	113.90
buses	117.00	102.85	95.15	92.65	97.78	99.50	96.15
trucks	54.50	89.63	115.35	113.70	114.33	115.43	96.98

\* Source : Traffic counting data, Korea highway corporation.

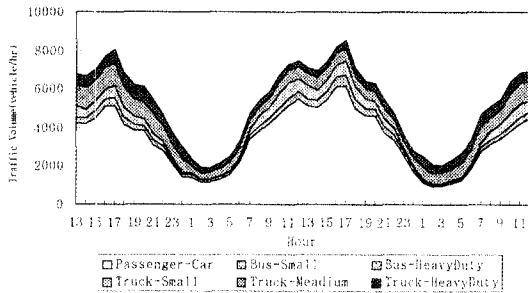


Fig. 4. Traffic volume during 1st sampling period (13 : 00, 1997. 8. 23 (SAT) ~ 12 : 00, 8. 25 (MON)) at Ansung-Cheonan Kyongbu highway.

교통량은 01~05시까지는 약 2,000 vehicles/hr를 유지하다가 06시 이후 증가하여 17시경에 최대 약 8,500 veh.cles/hr를 나타내다 감소하는 경향을 나타내었다.

자동차로부터 배출되는 오염물질 양은 자동차의 종류, 사용연료, 누적주행거리, 주행속도 등에 좌우된다. 그러므로 자동차로부터 배출되는 오염물질 배출량을 산출하기 위한 원단위 오염물질 배출계수는 차종에 따라 사용연료, 규제기준 등을 고려하여 산정하여야 한다(조강래 등, 1993). 그러나 현재 국립환경연구원 자동차공해연구소에서 제공하고 있는 차속에 따른 배출계수에 관한 일반식은 47.2 km/hr

이하에만 적용하도록 제한 되어있다. 따라서 차종에 따른 NOx 배출량은 1990년 서울시 평균 주행속도인 21.9 km/hr에 대한 값(조강래 등, 1993)을 이용하여, 이보다 고속인 경우에 대해서는 그 값을 기초로 배출계수가 속도에 반비례하는 단순 산술식(김신도 등, 1996)으로 계산(표 4)하였다. 또한, 산정한 NOx 배출량 중에서 NO<sub>2</sub> 배출량은 고속도로 요금소에서 자동측정기로 실측한 자료(김신도 등, 1998, 그림 5)를 이용하여, NO<sub>2</sub>는 NOx의 약 35.4%로 계산하였다. 고속도로 차량의 운행특성을 나타내는 서비스 수준은 A~F까지 여섯 단계로 구분하는데, 설계속도 100 km/h인 고속도로 기본 구간의 각 서비스 수준별 운행특성은 표 5와 같다. 측정 당시의 차속을 측정할 수가 없었으므로 자동차 오염물질 배출량 산정시 차속의 결정은 서비스 수준 C의 통행속도 값으로 가정하여 82 km/hr를 대입하였다.

차종의 구분은 승용차, 버스(소형: 12인승 이하, 보통: 12인승 이상), 트럭(소형: 1톤 이하, 중형: 1~8톤, 대형: 8톤 이상)으로 구분하였으며, 승용차의 경우 모두 무연휘발유를 사용하는 1989년 이후 모델로 하였다(조강래 등, 1993). 차종에 따른 배출계수를 적용하여 계산한 NO<sub>2</sub> 배출량은 그림 5와 같다. 교통량 대수로는 승용차가 차지하는 비중이 크지만, 배출량은 버스와 대형 트럭이 차지하는 비중과 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. CALINE3는 오염

Table 4. NOx emission factors by driving speed of vehicles. (unit : g/km · hr)

Kind of vehicle		Equation (a · b/V)	
		a	b
Passenger-car		0.48	21.9
Bus	Small	1.40	21.9
	Ordinary	15.53	21.9
Truck	Small	1.48	21.9
	Medium	1.92	21.9
	Heavy-duty	15.29	21.9

Table 5. Design criteria of highway according to service level.

Service level	Traffic velocity (km/h)	Headway (m)	Maximum density (passenger/km/lane)
A	95	125	8
B	90	77	13
C	82	53	19
D	70	37	27
E	50	23	-

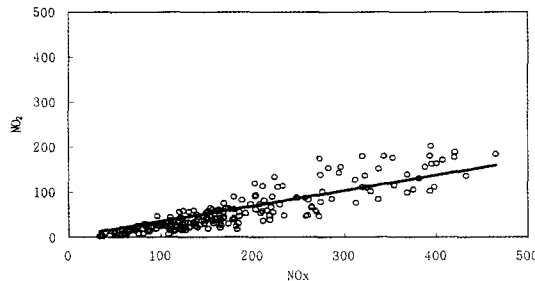


Fig. 5. Regression of NOx and NO2 automobile emission which was measured data at highway tollgate booth, NO2 was calculated 35.4 % NOx.

물질 배출량을 도로상에서 일정하게 단위시간과 단위길이에 배출되는 질량으로 계산하기 위해 도로의 차량대수(vehicles/hr)와 배출계수(g/mile · vehicle)를 이용하여 배출량을 계산하였다.

기상 자료 중 풍향과 풍속은 측정 기간중의 실측값을 이용하였다. 대기안정도는 Turner method를 바탕으로 계산하였으며, 이때 입력되는 자료 중에 현장에서 측정하지 못한 것은 측정 지점에서 가장 가까운 수원 기상대의 동일 시간대별 일사량, 운량, 운

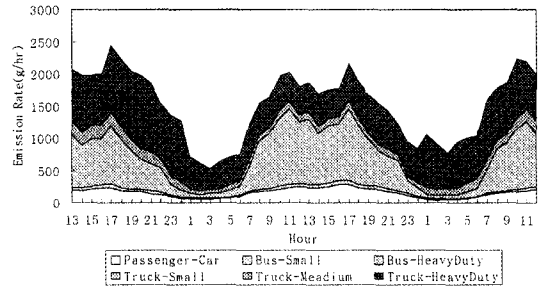


Fig. 6. NO2 emission rate 1st during 1st sampling period (13:00, 1997. 8. 23 (SAT) ~ 12:00, 8. 25 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

형의 기상자료를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 1차 현장조사 결과

고속도로 주변에서 거리별로 NO2의 2일(48시간) 평균농도는 표 6과 같다. 기상 측정자료로부터 풍하측은 도로를 기준으로 동쪽으로 나타났다. 풍하측의 최고농도는 40.7 ppb, 풍상측의 최고농도는 30.0 ppb로 나타났으며, 도로에서 거리가 멀어질수록 농도는 점차 감소하여 200 m 떨어진 지점에서는 각각 21.5 ppb, 14.8 ppb를 나타내어 고속도로변에서 거리에 따른 뚜렷한 농도 감소를 보여준다. 고속도로변에서 200 m 떨어진 풍상측의 최저농도인 약 14.8 ppb를 배경농도라고 했을 때, 이보다 높은 농도는 고속도로의 자동차에 의한 영향이라고 할 수 있다. 따라서, 측정 대상 고속도로 주변에서 자동차에 의한 NO2의 영향권은 풍상측은 약 150 m, 풍하측은 200 m 정도로 나타났다.

측정기간 중 풍속, 온도, 습도의 변화는 그림 7과 같다. 측정 당시 평균 풍속은 약 0.7 m/s 정도였으며, 온도의 변화는 19~35°C, 습도의 변화는 30~80% 정도였다. 측정기간 중 주풍 방향(그림 8) 주로 남서풍 계열이 우세하였다.

#### 3.2 실측치와 예측치의 비교

CALINE3에 측정 기간중의 시간대별 교통량에 따른 NO2 배출량, 실제 기상자료와 기타 지형조건 등을 입력하여 모델을 수행하였다. 수용점은 실측한

Table 6. NO<sub>2</sub> concentration near the highway by 1st measurement (13:00, 1997. 8. 23 (SAT) ~ 12:00, 8. 25 (MON)). (unit: ppb)

Sampling site NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eastward concentration	40.7	31.8	31.3	29.7	27.6	25.8	24.8	23.7	21.5
Westward concentration	30.0	20.7	19.6	18.7	17.3	17.1	16.4	16.7	14.8

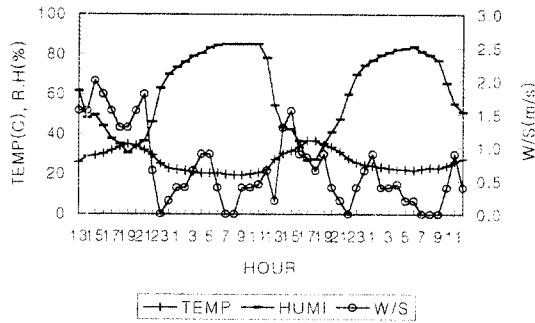


Fig. 7. Variation of wind speed, temperature, relative humidity during 1st sampling period (13:00, 1997. 8. 23 (SAT) ~ 12:00, 8. 25 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

지점과 동일하게 하였으며, 모델에서 수행한 각각의 1시간 평균농도를 현장조사 기간인 48시간 평균 농도로 계산한 모델 예측치와 현장조사 실측치의 비교는 그림 9와 같다. 현장조사 실측치와 CALINE3 예측치를 비교해 보면, 풍상측과 풍하측에서 100m 이상 떨어진 지점에서는 실측치와의 오차가 약 2~3 ppb 정도를 나타내는 반면, 풍하측에서 도로변에 가까운 약 100m까지는 약 5~12 ppb 정도 과대평가 됨을 알 수 있었다. 따라서, CALINE3을 이용하여 도로변에 인접한 미시규모지역(microscale region)의 오염농도를 예측할 때 예측치가 실측치보다 과대 평가되고 있으므로, 이에 대한 수정이 필요한 것으로 판단된다.

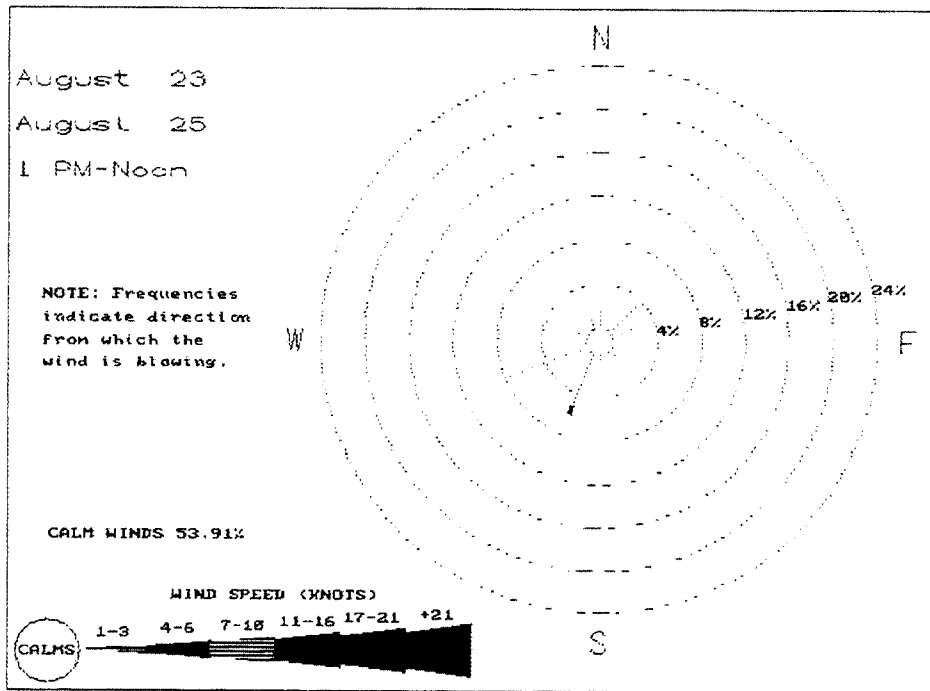


Fig. 8. Wind rose during 1st sampling period (13:00, 1997. 8. 23 (SAT) ~ 12:00, 8. 25 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

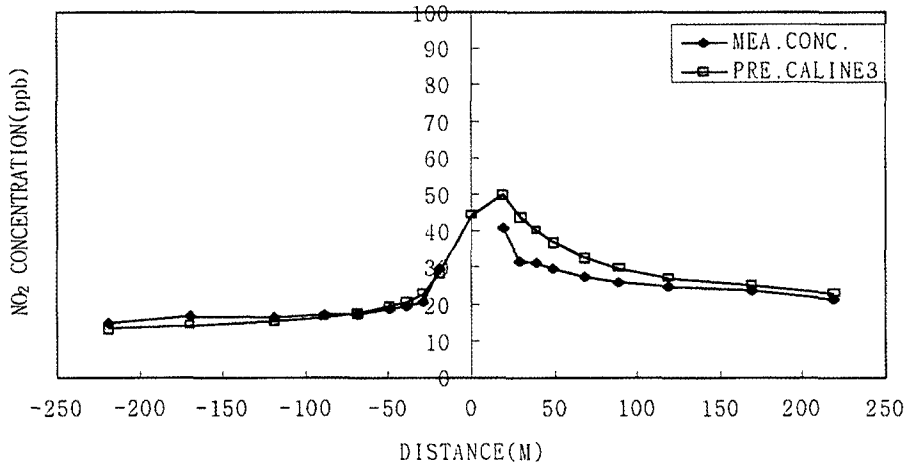


Fig. 9. Comparison of NO<sub>2</sub> concentration measured and predicted using CALINE3 during 1st sampling period (13:00, 1997. 8. 23 (SAT)~12:00, 8. 25 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

3.3 CALINE3의 풍속항 보정

플룸(plume) 모델은 가우시안 확산식을 기본으로 하여 풍하측의 오염농도를 계산하는데, 이는 복잡한 현실적 상황을 단순하게 가정하여 수학적으로 계산하는 과정에서 현실 상황을 제대로 반영하지 못하는 부분이 있을 수 있다. 특히, 농도 계산에 영향을 줄 수 있는 수평·수직 확산계수와 풍향·풍속 등 여러 기상인자 중 풍속에 대한 가정에서 저풍속인 경우에는 정확한 평가가 이루어지지 않는다는 문제점을 가지고 있다. 즉, 오염물질의 농도는 풍속에 반비례하기 때문에 풍속이 0m/s에 접근함에 따라 농도는 무한히 증가하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 선오염원 예측 모델에서 농도와 풍속의 반비례 선형관계는 상대적으로 고풍속인 경우에만 유효하기 때문에 저풍속인 경우에는 측정치를 바탕으로 농도는 풍속에 따른 적절한 계수 값으로 보정해야 한다(Rao et al., 1980). CALINE3 역시 가우시안 확산식에 근거하여 풍하측의 오염농도를 계산하고, 농도는 풍속에 선형적으로 반비례함을 가정하고 있는데, 이는 상대적으로 고풍속인 경우에는 유효하지만, 풍속이 0m/s에 가까운 경우에는 다소 문제점이 있으며(Benson, 1992), 저풍속인 경우 CALINE3 뿐만 아니라 기타의 다른 선오염원 예측 모델에서도 도로변에서 가까운 지역에서의 평가에 대한 문제점이 지적되고 있다. 실제적으로는 풍속이 0m/s일지

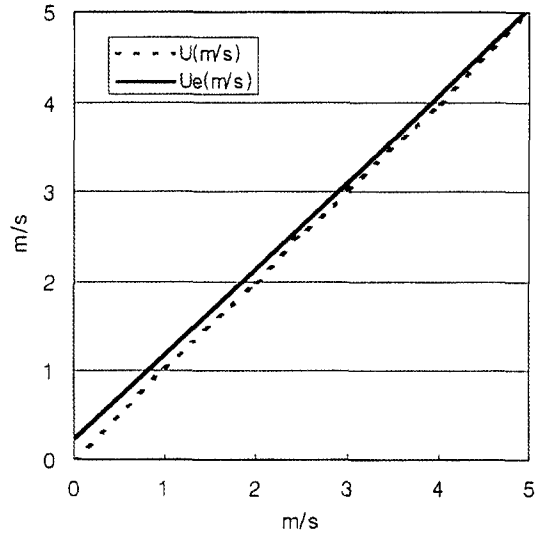


Fig. 10. Comparison of wind speed and effective wind speed ( $U_e = U + 0.24 \cdot \text{EXP}(-0.297 \times U)$ ).

라도 도로변에서 인접한 지역에서는 자동차 주행의 기계적인 난류 등으로 인하여 약간의 풍속을 감지할 수 있으며, 특히 본 측정결과에서도 측정 당시의 평균 풍속이 0.7 m/s이었음을 고려하여 볼 때 저풍속에 대한 보정이 필요하다고 판단하였다.

따라서, 측정된 풍속을 그대로 이용하지 않고 식



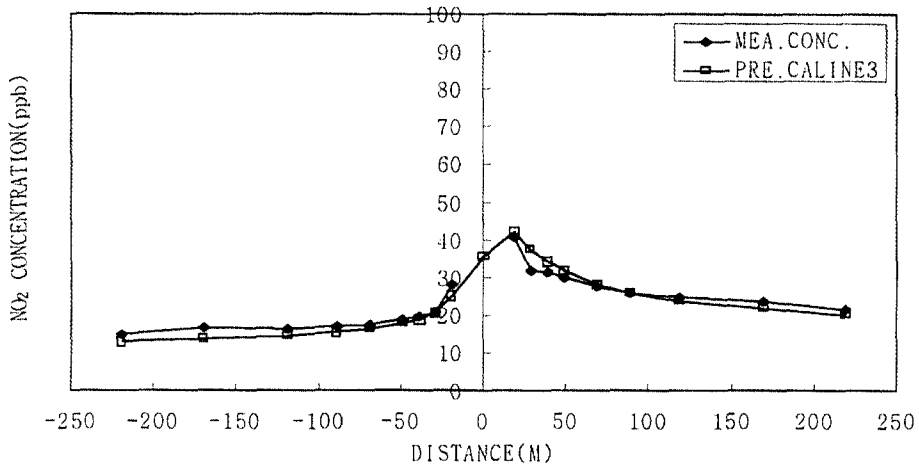


Fig. 11. Comparison of NO<sub>2</sub> concentration measured and predicted using CALINE3 after modification during 1st sampling period (13:00, 1997. 8. 23 (SAT) ~ 12:00, 8. 25 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

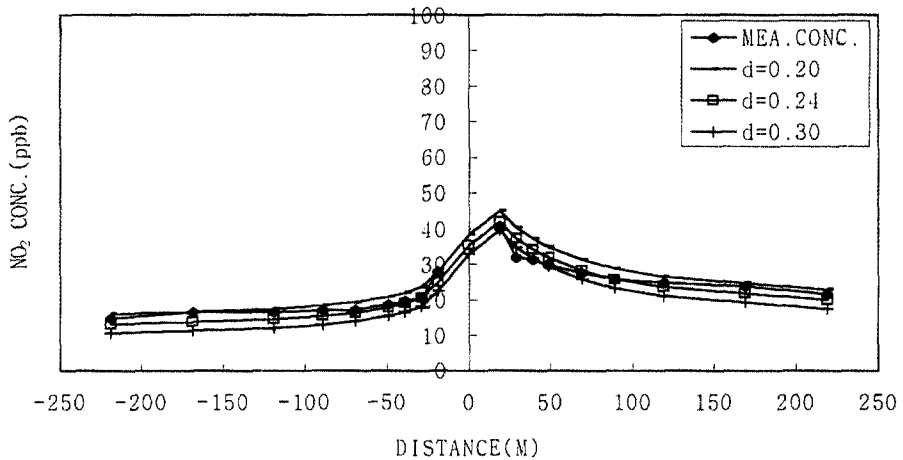


Fig. 12. Comparison of NO<sub>2</sub> concentration measured and predicted using CALINE3 as correction factor d.

(3.1)과 같은 유효풍속(effective wind speed)식으로 보정하였는데, 1 m/s 이하의 저풍속인 경우는 풍속을 보상하고, 2 m/s 이상인 경우는 측정 풍속과 거의 일치하게 하는 지수함수식으로 표현하였다. 실제 풍속과 유효풍속의 비교는 그림 10과 같다. 실제 풍속이 0 m/s일 때 유효풍속식으로 보정한 0.24 m/s로 하여 농도계산을 하므로 저풍속일 때 급격한 고농도 값으로 인한 오차를 줄일 수 있다.

$$U_c = U + d \cdot \text{EXP}(-p \times U) \tag{3.1}$$

where, U<sub>c</sub> : effective wind speed (m/s)

U : wind speed (m/s)

d : correction factor (0.24)

p : average value (0.297) of power law index (rural)

이 유효풍속 식으로 풍속항을 보정한 모델 예측

치와 실측치의 비교는 그림 11과 같다. 풍상측 뿐만 아니라 풍하측에서 도로변에 인접한 지점에서 실측치와 예측치의 오차는 약 2~3 ppb 정도로 감소하였으며, 따라서 전체적으로 CALINE3의 예측력을 상당히 높일 수 있었다. 여기서, 보정계수값 d를 0.20~0.30까지 변화시키면서 모델을 수행한 결과 d값이 0.24로 한 모델 예측치가 실측치와 비교하였을 때 가장 상관성( $R^2=0.9576$ )이 높은 것으로 나타났다(그림 12). 또한, 풍속지수 p 값은 측정시간대의 대기안정도에 따른 시골지역(rural)의 평균값 0.297로 하였다.

### 3.4 2차 현장조사 및 모델 풍속 보정항의 검증

고속도로로 주변에서 자동차에 의한 NO<sub>2</sub> 영향 범위를 실측하고, 풍속항을 보정한 모델을 검증하기 위하여 2차 현장조사를 실시하였다. 측정 방법은 1차 현장조사와 동일한 지점에서 동일한 방법으로 NO<sub>2</sub>농도를 실측하였으며, 측정 일시는 1997년 9월 22일(월) 13:00부터 9월 24일(수) 12:00까지[약 48시간] 하였다.

고속도로변에서 거리별로 NO<sub>2</sub>의 2일 평균농도는 표 7과 같다. 측정 결과 풍하측은 도로를 기준으로 서쪽으로 나타났으며, 풍하측과 풍상측의 최고농도는 중앙선에서 19m 지점(도로가 끝나는 지점)에서 각각 43.9 ppb, 16.30 ppb로 나타났고, 도로에서 거리가 멀어질수록 농도는 점차 감소하여 200m 떨어진 지점에서는 각각 24.9 ppb, 8.4 ppb를 나타내어 1차 측정때와 같은 추이를 나타내었다. 고속도로변에서 200m 떨어진 풍상측의 최저농도 인 약 8.4 ppb를 배경농도라고 했을 때, 이 보다 높은 농도는 고속도로의 자동차에 의한 영향이라고 할 수 있다. 따라서, 측정 대상 고속도로 주변에서 자동차에 의한 NO<sub>2</sub>의 영향권은 풍상측은 약 30m 정도, 풍하측은 약 200m 이상으로 나타났다. 2차의 경우 풍하측이

도로의 서쪽으로 나타났으며, NO<sub>2</sub>농도는 1차의 경우보다 약 3 ppb 정도 높게 나타났고, 훨씬 먼 지역 에까지 영향이 나타났다. 측정기간 중 풍속, 온도, 습도의 변화는 그림 13과 같으며, 평균 풍속은 약간 증가하여 1.0 m/s, 온도 변화는 17~24°C, 습도 변화는 30~90% 정도였다. 주풍 방향(그림 14)은 주로 북북서풍과 북동풍이 우세하였다.

모델의 입력 2차 자료 중 도로 및 수용점은 1차와 동일하게 하였으며, 기상자료는 실측한 자료를 이용하였으며, 시간대별 교통량과 NO<sub>2</sub> 배출량도 역시 1차와 동일한 방법으로 계산하였다. 2차 현장조사 실측치와 예측치의 비교는 그림 15과 같으며, 현장조사 실측치와 CALINE3 예측치를 비교해 보면, 1차와 마찬가지로 풍상측과 풍하측에서 100m 이상 떨어진 지점에서는 실측치와의 오차가 약 2~3 ppb 정도를 나타내는 반면, 풍하측에서 도로변에 가까운 약 100m까지는 약 5~11 ppb 정도 과대평가됨을 알 수 있었다.

실측치(2차)와 유효풍속식으로 풍속항을 보정한 제안 모델 예측치의 비교는 그림 16과 같다. 풍상측과 풍하측에서 도로변에 인접한 지점에서 실측치와

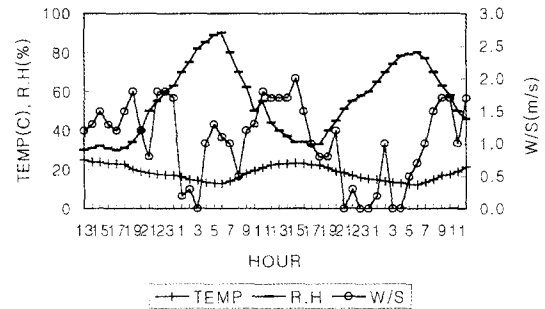


Fig. 13. Variation of wind speed, temperature, relative humidity during 2nd sampling period (13:00, 1997. 9. 22.(SAT)~12:00, 9. 24 (MON)) at Ansung-Cheonan Kyongbu highway.

Table 7. NO<sub>2</sub> concentration near the highway by 2nd measurement (13:00, 1997. 9. 22 (MON)~12:00, 9. 24 (WED)). (unit : ppb)

Sampling site NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eastward concentraion	16.3	10.0	9.9	9.3	8.8	8.7	8.9	8.7	8.4
Westward concentration	43.9	39.7	36.9	35.2	32.9	31.0	29.0	26.9	24.9

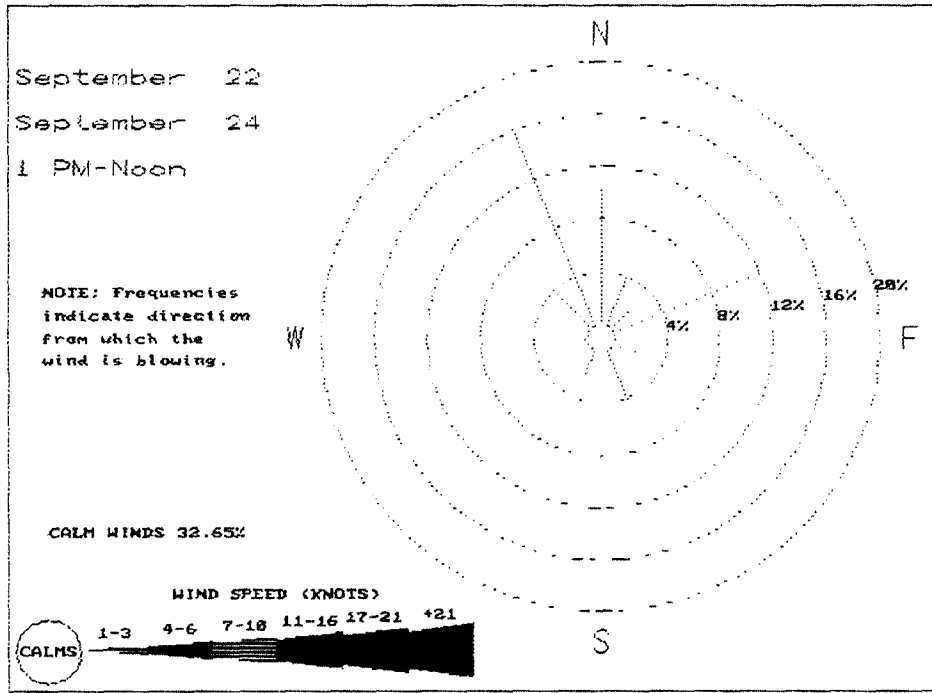


Fig. 14. Wind rose during 2nd sampling period (13:00, 1997. 9. 22 (SAT)~12:00, 9. 24 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

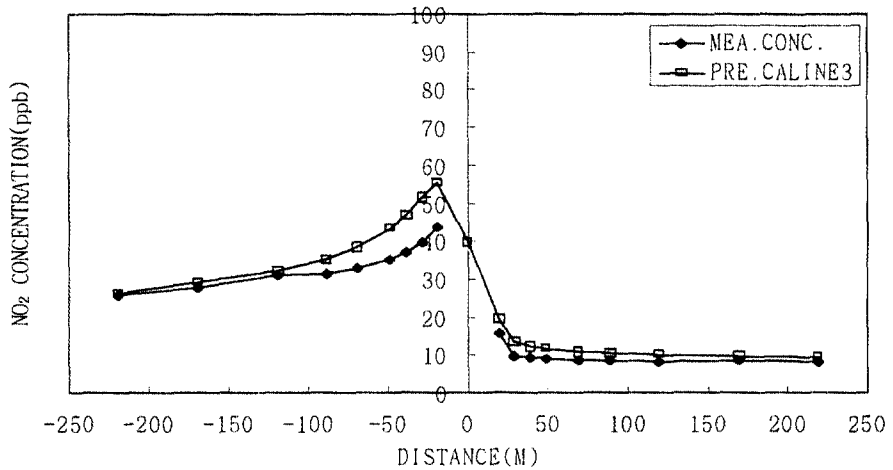


Fig. 15. Comparison of measured and predicted NO<sub>2</sub> concentration using CALINE3 during 2nd sampling period (13:00, 1997. 9. 22 (SAT)~12:00, 9. 24 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

예측치의 오차는 약 2~3 ppb 정도로 감소하였다. 정한 CALINE3의 예측력이 상당히 높음을 확인할 수 있었다. 따라서 저풍속인 경우 풍속항을 보정하였을 때 수

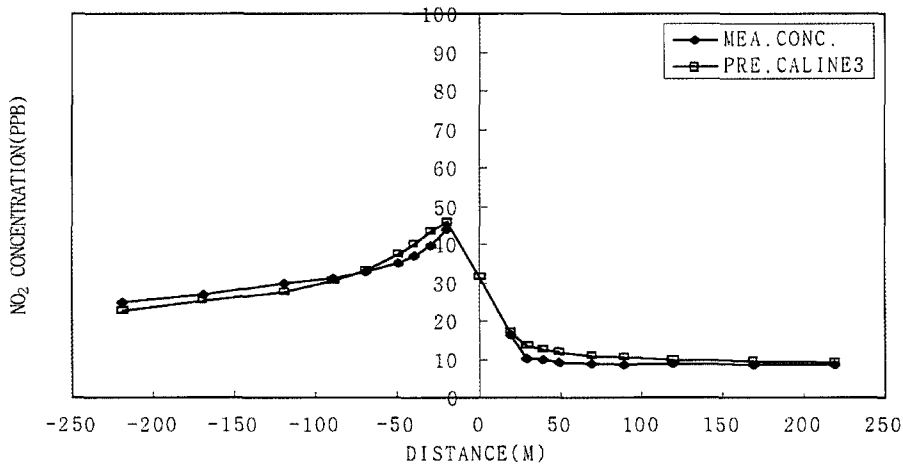


Fig. 16. Comparison of measured and predicted using NO<sub>2</sub> concentration CALINE3 after modification during 2nd sampling period (13:00, 1997. 9. 22 (SAT) ~12:00, 9. 24 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway.

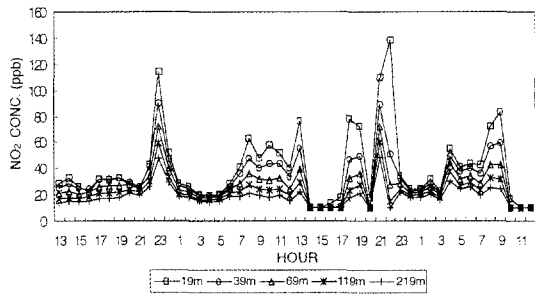


Fig. 17. Variation of hourly NO<sub>2</sub> concentration using CALINE3 during 1st sampling period (13:00, 1997. 8. 23 (SAT) ~12:00, 8. 25 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway. m is horizontal distance from center line of highway at up-wind (eastward).

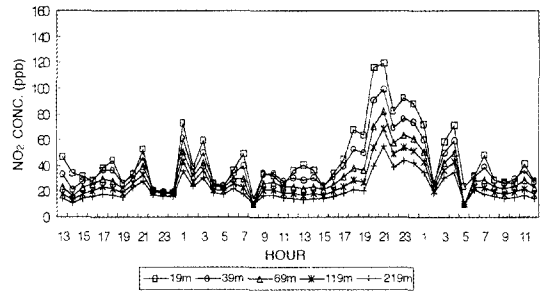


Fig. 18. Variation of hourly NO<sub>2</sub> concentration using CALINE3 during 2nd sampling period (13:00, 1997. 9. 22 (SAT) ~12:00, 9. 24 (MON)) at Ansong-Cheonan Kyongbu highway. m is horizontal distance from center line of highway at up-wind (westward).

### 3.5 모델의 활용

보정한 CALINE3를 이용하여 현장조사시 실제 기상자료와 교통량에 따른 NO<sub>2</sub> 배출량을 고려한 고속도로 주변에서 시간대별 농도 변화는 그림 17, 그림 18과 같으며, 각각 풍상측에서의 도로변에서 거리별 농도변화를 나타냈다. 시간대별 농도 변화는 풍향·풍속의 변화에 따라 매시간별로 상당히 다른 양상을 보여준다. 특히, 야간 시간대의 대기가 안정하고 무풍인 경우에는 도로상 뿐만 아니라 도로에

서 약 200m 떨어진 지점까지 고농도의 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 1차의 경우, 도로변에서 상대적으로 고농도가 발생한 시간대는 야간의 22시에서 24시로 이때 기상조건은 대기가 극히 안정하고, 무풍상태였다. 2차의 경우, 도로변에서 고농도가 발생한 시간대는 역시 야간의 대기가 안정하고, 무풍일 때와 이른 아침 대기는 안정하고 교통량이 급격히 증가하는 시간대로 나타났다.

따라서, CALINE3의 입력자료중 풍속항을 보정하

여 실제 기상자료와 교통량에 따른 도로변에서 자동차에 의한 대기오염도의 일변화는 하루 중 무풍이고 대기가 안정한 야간과 이른 아침에 최고 농도를 나타냈으며, 교통량이 많은 낮 시간대에는 상대적으로 강한 풍속과 불안정한 대기로 인하여 낮은 오염도를 나타내었다.

#### 4. 결 론

자동차에 의한 대기오염물질이 고속도로 인접지역에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 대표적인 자동차 대기오염물질인 NO<sub>2</sub>농도의 현장조사 실측치와 CALINE3을 이용한 모델 예측치를 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

NO<sub>2</sub> Passive sampler를 이용하여 측정한 NO<sub>2</sub> 농도의 현장조사 실측치와 UNAMAP에서 제공하는 CALINE3 예측치의 비교·검토 결과 도로변에 인접한 지역에서 저풍속(0.7 m/s)인 경우 예측치가 실제보다 과대평가(5~12 ppb)됨을 확인하였다. 실측치를 바탕으로 CALINE3 입력자료 중 풍속항에 대하여 저풍속인 경우는 풍속을 보상하고, 상대적으로 고풍속인 경우는 실제 풍속과 거의 일치하는 유효 풍속식  $[U_e = U + 0.24 \cdot \text{EXP}(-p \times U)]$ 으로 보정하였을 때, 고속도로와 인접한 지역에서 모델의 예측력을 향상시킬 수 있었다.

CALINE3 입력자료 중 풍속항을 보정하고 현장조건을 입력하여 모델을 수행한 결과 고속도로변에서 자동차에 의한 대기오염도의 일변화는 하루 중 무풍이고, 대기가 안정한 야간 시간대와 이른 아침에 최고 농도를 나타냈으며, 교통량이 많은 낮 시간대에는 상대적으로 강한 풍속과 불안정한 대기상태로 인하여 낮은 오염도를 나타내었다. 또한, 고속도로 주변지역에서 교통량의 증가에 따른 NO<sub>2</sub>의 영향은 차량 대수와 비례하여 고속도로 주변에서 영향은 크고, 도로변에서 떨어진 지역에서는 영향이 적은 것을 알 수 있었다.

측정대상 고속도로 주변에서 자동차로 인한 NO<sub>2</sub> 영향권은 1차의 경우 배경농도(15 ppb)를 고려하였을 때, 풍하측(eastward)으로 약 400 m 정도, 풍상측은 약 150 m 정도였으며, 이때 주풍 방향은 남서풍 계열이 우세하였고, 평균 풍속은 약 0.7 m/s였다. 2차의 경우 배경농도(9 ppb)를 고려하였을 때 풍하측

(westward)으로 약 600 m 정도, 풍상측은 약 30 m 정도였으며, 이때 주풍 방향은 동풍과 북풍계열이 우세하였고, 평균 풍속은 약 1.0 m/s이었다. 따라서, 우리 나라 평균 풍속이 약 2 m/s 이상으로 정도라고 한다면, 자동차에 의한 대기오염물질은 도로변에서 가까운 지역에서의 농도는 낮더라도 훨씬 더 먼 지역까지 영향을 미칠 수 있다고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

김신도, 이정주, 도연지(1996) HIWAY-II 모형을 이용한 대기오염 확산모델에서 공간적 변동특성, 한국환경위생학회지, 22(4), 122-128.

김정수, 최덕일, 최기덕, 박일수(1996) 대기안정도 분류방법의 평가 및 실용화에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(4), 369-376.

김정옥, 김선태, 김병태(1989) 이동오염원에 대한 대기확산모형의 감응도 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(1), 1-10.

대한토목학회(1991) 도로의 구조·시설기준에 관한 규정 해설 및 지침, 31-40.

장미숙, 이진홍(1989) 차량 배출물로 인한 고속도로변 CO 및 TSP의 단기 오염 농도의 평가, 한국대기보전학회지, 10(3), 197-202.

장영기, 송동용(1995) 국내 대기오염모델링의 현황과 과제, 한국대기보전학회지, 11(1), 1-14.

조강래, 엄명도, 김종춘, 홍유덕, 박용희, 김종규, 류정호, 김연호, 한종주(1991) 도시지역 대기질 개선에 관한 연구(III), 국립환경연구원보, 12, 129-139.

조강래, 엄명도, 김종춘, 홍유덕, 김종규, 한영출(1993) 자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 69-77.

이종범, 강인구(1989) 단일배출원 대기오염 단기모델에 관한 연구(Trace gas에 의한 확산실험), 한국대기보전학회지, 5(2), 84-96.

이종범, 김용국(1992) 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향 변동특의 특성, 한국대기보전학회지, 8(1), 138-145.

이종범, 김용국(1990) Pasquill 안정도계급의 평가와 안정도 Parameter 산정방법의 개발, 한국대기보전학회지, 6(2), 168-175.

한국도로공사(1993~1996) 고속도로 교통량 조사.

환경부(1997) 자동차 1,000만대 시대를 대비하는 자동차 공해관리 종합대책, 자동차 배출가스 저감정책에 관한 전문가 토론회.

May, A.D. (1990) Traffic flow fundamentals, Prentice Hall,

54-82.

Benson, P.E. (1992) A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models, Atmospheric Environment, 26B(3), 379-390.

Rao, S.T. and M.T. Keenan (1980) Suggestions for improvement of the EPA-HIWAY model, Journal of the air pollution control association, 30, 247-256.

State of California Department of Transportation Division of

Construction Office of Transportation Laboratory (1979) CALINE3 : A versatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highways and arterial streets, California.

Stern, A.C., R.W. Boubel, D.L. Fox (1984) Fundamentals of air pollution. Academic press, 51-52, 283-287.

McShane, W.R. and R.P. Roess (1984) Traffic Engineering, Prentice Hall, 48-69.