

연구논문

고속도로 환경영향평가를 위한 대기확산모델링 연구

구윤서 · 하용선 · 김아름 · 전의찬* · 이성호* · 김성태** · 강혜진***

안양대학교 환경공학과, 세종대학교 지구환경과학과*,

(주)에니텍**, 한국도로공사 도로교통기술원***

(2005년 3월 7일 접수, 2005년 12월 16일 승인)

A Study of Air Dispersion Modeling in Highway Environmental Impact Assessment

Youn-Seo Koo · Yong-Sun Ha · A-Leum Kim · Eui-Chan Jeon*
· Seong-Ho Lee* · Sung-Tae Kim** · Hye-Jin Kang***

Department of Environmental Engineering, Anyang University

Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University*

Department of Research, Enitech**

Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation***

(Manuscript received 7 March 2005; accepted 16 December 2005)

Abstract

In order to choose proper dispersion model and emission factors suitable in Korea in evaluating the effect of pollutants emitted by the vehicles in highway on nearby area, various road dispersion models and vehicle emission factors were reviewed.

With theoretical inter-comparisons of the exiting models for line source, CALINE 3 and CALINE 4 models which were suggested by US EPA were selected as the road dispersion models for further evaluation with the measurement. The emission factors suggested by Korean Ministry of Environment was turned out to be appropriate since the classification of vehicle kinds was simple and easy to apply in Korea.

The comparisons of predicted concentrations by CALINE 3 and 4 models with the measurements in flat, fill and bridge road types showed that CO and PM-10 were in good agreements with experiments and the differences between CALINE 3 and 4 models are negligible. The model concentrations of NO₂ by CALINE 4 were also in good agreement with

the measurement but those by CALINE 3 were over-predicted. The discrepancies in CALINE 3 model were due to rapid decay reaction of NO_2 near the highway, which was not included in CALINE 3 model. For the road type with one & two side cutting grounds, the similar patterns as the flat & fill road type for CO, PM10, & NO_2 were observed but the number of data for comparison in these cases were not enough to draw the conclusion.

These results lead to the conclusion that CALINE4 model is proper in road environmental impact assessment near the highway in flat, fill and bridge road types.

Keyword : Highway, CALINE, Air dispersion model, Modeling, Environmental Impact Assessment

1. 서론

우리나라의 고속도로는 1968년 서울과 인천을 잇는 경인고속도로 29.5km가 처음으로 건설되었으며, 1970년 서울과 부산을 잇는 경부고속도로 428km가 개통되면서 전국이 일일생활권이 되었고, 현재 고속도로는 우리나라 일일생활권의 중추적인 역할을 담당하고 있다. 또한, 한반국도의 경우 전국을 종횡으로 연결하고 있으며, 지속적으로 도로의 보수 및 새로운 도로를 건설하고 있으며, 현재 환경영향평가가 이루어지고 있는 영향평가 전 사업 중에 도로사업에 대한 환경영향평가가 많은 부분을 차지하고 있다. 또한 국가적으로 배출되는 대기오염물질 중에서 도로상의 주행 중인 차량에서 배출되는 오염물질은 지역에 따라서 차이는 있으나 최대 70%까지 이르고 있다. 따라서 도로에 주행 중인 차량에서 발생하는 대기오염물질이 주변지역에 미치는 영향을 평가하여 환경친화적으로 도로를 유지하고, 건설하는 것이 국민 건강 보호에 매우 중요한 의미를 갖는다. 도로에 의한 영향을 파악하기 위해서 도로 주변에서 현지 측정에 의한 정량적 평가에는 많은 시간과 비용이 소요되어 현실적으로 불가능하므로 도로 대기확산 모델을 이용한 예측 평가를 주로 수행하고 있다(구윤서·전의찬, 2004).

현재 국내에서 주로 사용하고 있는 도로 대기확산 모델은 U. S. EPA(United States Environmental Protection Agency)에서 제공하는 여러 형태의 확산모

델이다. U. S. EPA에서 추천하는 Regulatory 모델인 도로대기확산모델로는 CALINE3(California LINE source model 3, Benson, 1979)가 있고, CALINE3 모델에 NO_2 의 반응성을 고려하여 보완된 모델인 CALINE4(California LINE source model 4, Benson, 1989)가 있다. 또한 교차로 부근에서 지체 및 정체 현상을 반영할 수 있는 CAL3QHC(California Line source model 3 Queue Highway Capacity)과 CAL3QHCR(California Line source model 3 Queue Highway Capacity Revised) 등이 있다(Eckhoff and Braverman, 1995). 국내 고속 도로 환경영향평가에서는 CALINE3 모델이 주로 사용되고 있다. CALINE3 모델의 경우 1시간 기상자료인 단일기상자료를 사용하고 있기 때문에 시간에 따라서 다양하게 전개되는 기상상태를 종합적으로 반영하는데 한계가 있고, 도로상에 배출되는 주 오염물질인 NO_2 의 예측이 부정확한 단점이 있다(Benson, 1992). 또한 국외 및 국내의 배출계수, 교통량 등급 및 주변지형이 판이하게 다름에도 불구하고 기존 CALINE3 모델을 그대로 도로환경영향평가에 적용하고 있는 실정이다(김아름, 2004).

본 연구에서는 국내 실정에 맞는 도로 환경영향평가 방법을 정립하고자 한다. 먼저 다양한 차종에 따른 배출계수를 검토 비교하여 국내 차종 및 교통량 통계 체계에 적합한 도로 배출량 산정 방법을 제시하며, 국내외에서 사용되고 있는 도로 확산모델을 이론적으로 검토하여 국내에 적용 가능한 모델들을 선정하고 한다. 모델 평가를 위해서 실제 여러 형태의 도

로에 대해서 기상, 교통량 및 오염물질 농도를 측정하여 모델 예측치와 측정치를 비교 검토함으로써 최적의 모델을 선정하고자 한다. 본 연구에서 대상으로 하는 오염물질은 CO, NO₂, PM10이며, 도로 형태는 평탄, 성토, 교각, 측면 절토 및 양면 절토이다. 각각의 도로 형태별로 2일씩 측정하여 모델 적합성을 검토하였다.

II. 도로확산모델

대기오염 확산 모델에 대한 유용성이 증가함에 따라 US EPA에서는 NTIS(National Technical Information Service)에서 여러 대기오염 모델을 선정하여 추천하고 있다. 이 중 도로확산모델로는 CALINE3 모델은 권장 모델(perferred model)이고, HIWAY, PAL2는 선택모델(alternative model)로 분류되어 있다. 본 연구에서는 US EPA에서 제시하는 확산 모델, 호주 및 유럽 확산모델에 대해서 각각 특징을 비교검토 하였다.

1. 도로확산모델의 분류

1) BLP (Buoyant Line and Point source dispersion Model)

알루미늄 환원공장이나 연기 상승과 Downwash 효과가 중요한 기타 공장 등의 Line 및 Point Source와 관련된 문제를 다루는 Gaussian plume 확산 모델이다. 적용 지역은 시골 지역으로만 제한되어 있고, 지형 또한 단순한 지형만을 고려한다. 모델링 대상 오염물질로는 1차 오염물질로서 이산화황(SO₂), 먼지, NO_x, 일산화탄소(CO)이다. 이 모델의 경우 주로 공장을 대상으로 line source에 적용되므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

2) PAL2 (Point, Area, Line Source Algorithm-2)

정상상태의 Gaussian Plume을 가정하여 단기간 확산 현상을 해석하는데 이용되는 모델이다. 각 99

개의 Point, Area, Line Source과 99개의 수용점에서 1시간부터 24시간(단기)의 시간 단위로 반응성이 없는 오염물질의 농도를 계산한다. 적용지역은 평탄한 지형이며, 오염 물질은 1차 오염물질을 대상으로 하며 Output으로는 시간별 농도 및 24시간까지의 평균 농도를 계산한다. 이 모델 역시 도로영향평가에 부적합하여 제외하였다.

3) HIWAY2(HIGHWAY - 2)

비교적 복잡하지 않은 지형에 위치한 Highway 교통에서 비롯되는 반응성이 없는 오염물질의 농도를 결정하기 위한 정상상태의 Gaussian 모델이다. 수평방향의 바람이 지배적인 상황을 대상으로 개발되었으며, 복잡한 지형이나 대형 빌딩, 큰 나무에 의한 바람의 변화 등은 고려할 수 없다. 도시 및 시골 지역 모두 고려가능하고, 오염물질은 1차 오염물질을 대상으로 한다. HIWAY모델이 발전·개정되어 CALINE3 및 CALINE4 모델로 전환되었기 때문에 본 연구에서는 제외한다.

4) Ausplume

Ausplume Model은 호주EPA에서 1980년부터 개발하여 사용되고 있는 모델로 점오염원, 면오염원, 선오염원 등의 모델을 수행할 수 있는 모델이다. Ausplume 모델 역시 도시 대기환경영향평가에 적용되지만, 도로상에서 차량에 의한 혼합효과 등을 반영할 수 없기 때문에 상세한 도로확산모델링에는 부적합하다.

5) ADMS

ADMS Model은 영국에서 개발된 모델로 도심지역에서 도로의 영향까지 고려하여 종합적으로 도시 대기질을 예측할 수 있는 모델로 빌딩의 영향 및 복잡지형에서의 난류장을 고려하여 농도를 계산할 수 있다. 또한 해안에서의 해륙풍 및 열경계층의 영향을 확산현상에 반영할 수 있는 장점이 있다. 또는 도로상에서 확산모델링을 자세히 수행할 수 있는 것으로 알려져 있으나, 일반에게 공개된 모델이 아니기 때문

에 본 연구에서 제외하였다.

6) CALINE3/CALINE4(California LINE source model 3/California LINE source model 4)

CALINE은 캘리포니아 교통국(California Department of transportation, Caltrans)에 의해 개발된 대기질 모델로서 이 모델은 Gaussian 확산식에 근거하였고 도로상의 오염 확산을 예측하기 위하여 혼합층 개념을 채택하였다. 이 모델은 미 시규모의 지역에서 인근 교통시설로 인한 대기질 영향을 평가하기 위한 모델로 배출강도, 기상 조건, 지형 조건 등의 입력 자료를 이용하여 도로로부터 약 500m이내의 수용점에 대해 신뢰성 있는 오염농도를 예측할 수 있으며, CO나 입자상 물질과 같은 비반응성 오염물질을 예측할 수 있다. CALINE 모델 series는 CALINE1 모델, CALINE2 모델, CALINE3 모델, CALINE4 모델로 현재 개발되었고, CALINE3 모델의 기본 로직을 바탕으로 교차로의 지체구간에 대한 영향평가 기능을 강화하여 수정된 모델인 CAL3-QHC 모델, CAL3QHCR 모델이 있다. CALINE3 모델은 CALINE2 모델에 비해 몇 가지 입력 자료가 추가로 필요하나 적용의 편의성이 뛰어난 모델이며, 입력 자료를 최소화하기 위해 Gaussian식을 유지하였고, 고속도로를 점오염원의 연속으로 간주한 CALINE2 모델에 비해서 CALINE3 모델은 풍향에 수직방향으로 일정길이를 갖는 여러 선오염원 나누어 모델링을 적용하도록 개선되었다. 또한 CALINE2 모델에서는 수직확산곡선을 10분이하의 평균시간(Average Time)과 부드러운 지형에 기초한 변형된 Turner곡선을 사용하였으나, CO농도를 과다하게 산출함에 따라 Pasquill의 확산곡선으로 대체하였다. 이는 고속도로 근접부의 수직 확산은 풍속과 반비례함에 근거하여 선정하였다.

CALINE4 모델은 CALINE3 모델의 확장된 버전이다. 이 모델은 수직과 수평 확산곡선이 수정되었고, 도로상에서 배출되는 주 오염물질인 NO₂의 반응을 고려할 수 있는 Discrete Parcel Method를 적용

하여 NO₂의 농도를 계산하는 발전된 모델이다.

7) CAL3QHC/CAL3QHCR (California Line source 3 Queue Highway Capacity/California Line source 3 Queue Highway Capacity Revised)

CAL3QHC 및 CAL3QHCR 모델은 CALINE 3과 같은 알고리즘을 가지고 도로 상의 지체되는 구간을 고려할 수 있도록 만들어진 모델이다. 또한 이 두 모델에는 모두 입력 자료로서 기상자료를 입력하게 되는데 CAL3QHC 모델은 기상 자료를 1시간만 입력되어 계산하게 되고, CAL3QHCR 모델의 경우 1시간 간격의 1년 기상자료로 입력 가능하여 그에 따른 1시간 평균 및 1시간 최대, 8시간 평균 농도 등의 계산이 가능하다. 또한 이 두 모델은 요일별, 시간대별의 교통량의 변화에 민감하게 반응하여 교통 상황이 복잡하고 지체구간이 많은 도로에 적용하는 것이 적절하다.

2. 도로확산모델의 선정

고속도로 상에서 차량의 주행 중에 주로 배출되는 대기오염물질은 CO, PM₁₀, NO₂로서, 도로 영향 평가에 적용되는 주요 항목이다. 그러므로 3가지 주 오염물질을 모두 고려할 수 있으며, 또한 국내와 같이 도로의 형태가 일정하지 않고 성토, 평탄, 교각, 절토(측면절토, 양면절토), 등의 다양한 형태를 고려할 수 있는 모델인 CALINE3 및 CALINE4 모델이 도로 환경 영향 평가 시에 적합하다고 사료되었다.

III. 현장측정

고속 도로상에서 배출되는 오염물질을 현장 측정 실험에 의해 측정된 측정농도를 비교분석하고 풍속에 따라 각 오염물질이 주변 지형에 미치는 영향을 파악한다. 이를 위해 현장측정을 실시하고, 기상 및 교통량 측정 분석, 실측 농도 결과를 분석한다.

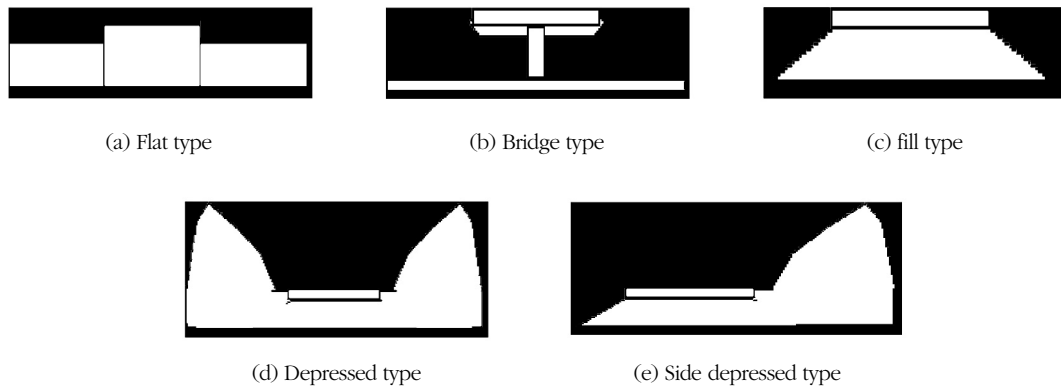


Fig. 1. The highway types for the field experiment.

1. 현장측정개요

본 측정은 고속 도로상에서 발생하는 오염물질이 주변 지형에 미치는 영향을 실측하여, 예측 모형을 통한 결과 값과 비교 분석하기 위한 것으로, 실측하는 오염물질은 CO, NO₂, PM10의 세 가지 물질이며 실측 당시의 교통량을 측정하여 배출량을 산정하고 오염물질의 농도를 예측하였다. 측정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 성토지형, 평탄지형과 교각, 측면절토 및 양면절토지형에서 대해서 수행하였고, 도로 형태별 측정 장소 및 일시는 Table 1에 정리하였다. 측정방법은 풍하방향으로 4지점(50m, 100m, 150m, 250m)과 풍상방향의 1지점(250m)으로 총 5지점에서 오염물질을 측정하였다. 풍상방향은 도로에서 배출되는 오염물질이 주변 지역에 미치는 영향이 적다고 가정하여 배경농도로 간주하였다.

2. 교통량 측정 및 분석

교통량 측정 시간은 오염물질 실측 시간과 동일한

시간대에 맞추어 비디오 촬영하여 교통량을 분석하여 시간별 및 차종별 차량 대수를 산정하여 전체 교통량을 산정하는 방식으로 하였다. 차종은 승용차, 승합차, 소형버스, 대형버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭으로 구분하여 산정하였다. 건설교통부에서는 승합차의 구분이 되어 있지 않으나 고속도로 상에서 승합차의 분포를 파악하기 위하여 승용차와 승합차를 구분하여 교통량을 조사하였다.

3. 기상 측정

오염물질 측정 기간과 동일한 성토지형, 평탄지형, 교각지형, 절토지형의 각 측정 기간동안 자동기상측정장비(Automatic Weather System, AWS)를 이용하여 부지 기상을 측정하였다. 측정항목은 온도, 습도, 풍향, 풍속, 기압으로 10분 간격으로 자료를 받았다. 관측한 기상자료를 활용하여 모델링에 필요한 기상요소인 안정도, 혼합고, 풍향 및 풍속 등을 계산하였다.

Table 1. The detailed locations and periods for the field experiment.

Road type	Location	Time
Fill	Kyungbu highway near Kiheung IC	Sept. 15 2003 21:00~Sept. 18 2003 24:00
Flat	Kyungbu highway near Anseong IC	Dec. 11 2003 12:00~Dec. 13 2003 11:00
Bridge	Namhan river bridge of Yeongdong highway	June 21 2004 18:00~June 23 2004 18:00
Depressed and side depressed types	Yeongdong highway near Wonju IC	Aug. 23 2004 15:00~Aug. 27 2004 16:00

IV. 배출계수

배출량 산정을 위해서는 배출계수(Emission factor)를 계산하게 되는데 최근 국내에서는 자동차 공해연구소에서 차종별 배출계수를 개발하였고, 이를 2000년도부터 환경부에서 개발되고 있는 대기보전 정책수립 지원시스템(CAPSS : Clean Air Policy Support System, 환경부, 2002)에서 국가 배출량 산정에 사용되고 있다. 또한 유럽에서는 CORINAIR에서 제시하고 있는 배출계수를 이용 CORPERTⅢ(European Environment Agency, 1999)를 이용하여 배출량을 산정하고, 미국A에서는 Mobile6 모델(US EPA, 2002)을 이용하여 배출량을 산정하고 있다. 본 연구에서는 국내 대기보전 정책수립 지원시스템에서 사용하고 있는 배출계수와 해외 배출계수를 비교 검토한 결과 국내 실정에 맞게 수정된 CAPSS에서 인용하고 있는 배출계수를 사용하기로 결정하였다.

2000년도부터 환경부에서는 대기보전정책지원시스템 구축사업을 시행하여 5개년 계획으로 배출량 산정연구가 집중적으로 이루어지고 있다. 이에 따르면 도로 부분의 배출량 산정을 위해 배출계수 산출식이 제시되고 있는데, 이 배출량 및 배출계수가 차량의 연식, 차종에 따라 각각 계산된다.

한편 건설교통부에서는 매년 도로 교통량 통계연보를 통해 각 지방도, 국도, 고속도로에서의 교통량을 산출한다. 여기에 적용된 고속도로를 대상으로 한 차종분류는 승용차(승합차 포함), 소형버스, 보통버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭, 세미 트레일러, 풀 트레일러로 구분하여 교통량을 측정하고 분석한다(건설교통부, 2004). 그러나 CAPSS에서 차종구분이 더 세분화 되어있어 건설교통부에서 정한 차종을 적용하여 배출계수를 산정하는 데에 어려움이 있다. 따라서 건설교통부에서 분류하는 차종구분을 CAPSS 차종 구분에 적용하여 배출계수를 산정하였다.

위에서 언급한 바와 같이 CAPSS에서 구분하는 차종 분류와 건설교통부에서 구분하는 차종 분류가 상이하므로 본 연구에서는 배출량 산정을 위해 건설

교통부의 차종 구분에 의해 배출계수를 산정하였다. CAPSS 차종구분에 의하면, 승용차의 경우 경차(800cc), 소형(1500cc이하) 및 중대형(1500cc이상)으로 세분화 되어 있고, 연료 또한 휘발유와 LPG로 각각 구분되어 있다. 또한 RV(Recreational Vehicle) 차량에 대해 연료별로 소형(8인 이하) 및 중형(9인 이상)으로 나뉘고, 승합차는 소형(15인 이하), 중형(25인 이하), 시내 및 대형버스로 구분되며 화물차의 경우 소형, 중형, 대형으로 구분되어 있다. 그러나 건설교통부에서 교통량 측정 시 구분하는 차종은 승용차, 소형버스, 대형버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭, 세미 트레일러, 풀 트레일러이므로 이를 CAPSS 차종 구분시 주의가 요구되며, 다음의 기준으로 분류하였다. CAPSS의 승용차(소형, 휘발유)를 건설교통부의 승용차로 구분하고, 소형 승합차(소형, 경유, 98~02년)를 소형버스로, 대형버스(00~03년)를 대형버스로, 화물차는 소형화물차(경유, 98~03년)는 소형트럭, 중형화물차(경유, 00~03년)는 중형트럭, 대형화물차(경유, 00~03년)는 대형트럭 및 세미 트레일러와 풀 트레일러로 각각 구분하여 배출량을 산정하였다. 또한 연식별로 구분되어 있는 CAPSS의 차종구분에 따라 본 연구에서는 최근 연식을 적용하여 배출계수를 산정하였다. 각각의 차종별로 적용되고 있는 오염물질별 배출계수의 실제 배출량 계산에 적용된 배출계수 식은 Table 2에 나타났다.

V. 결과 및 논의

측정된 교통량과 차량 주행속도를 근거로 CAPSS 배출계수를 이용하여 산정된 배출량과 실측한 기상요소를 가공하여 작성된 기상자료, 및 주변지형 고도자료 등을 모델의 입력 자료로 하여 모델링을 수행하였다. 측정농도와 마찬가지로 풍하방향에 따른 농도의 변화를 CALINE3 모델과 CALINE4 모델을 수행하고 이들의 결과 값을 현장 측정농도와 비교 분석하였다. 비교 분석은 평탄지형인 평탄 및 성토 지형 도로와 교각 지형 도로, 그리고 복잡지형인 양면 및 측

Table 2. The emission factors used in this study.

(unit: g/km-veh)

	CO	NOx	PM10
Passenger car	$22.478V^{-1.0085}$	$3.1404V^{-0.7864}$	
Coach	$4.1776V^{-0.6257}$	$-0.00008V^2+0.0079V-0.0331$	$0.3228V^{-0.342}$
Small bus	$4.1118V^{-0.4776}$	$0.0000667V^2-0.0063007V+0.617839$	$0.289393V^{-0.3596}$
Bus	$23.734V^{-0.4984}$	$45.056V^{-0.3805}$	$2.282V^{-0.4494}$
Small truck	$4.0896V^{-0.6083}$	$-0.00008V^2+0.0186V-0.4139$	$0.4838V^{-0.5357}$
Medium truck	$24.463V^{-0.643}$	$29.293V^{-0.5838}$	$1.4444V^{-0.4824}$
Large truck	$23.734V^{-0.4984}$	$45.056V^{-0.3805}$	$2.282V^{-0.4494}$

면 절토 지형의 도로를 대상으로 각각 수행하였다.

1. 평탄 지형 비교

평탄지형인 평탄 및 성토 지형 도로 측정실험에서의 측정농도와 각각의 모델과 정합도를 판단하기 위하여 측정농도와 모델농도를 비교하였다. Fig. 2와 3은 측정 기간동안의 일산화탄소의 측정 농도값과 CALINE3 및 CALINE4 모델로 예측된 농도값과 각각 비교한 것이다.

비반응성 물질인 일산화탄소의 경우에는 CALINE3 모델과 CALINE4 모델의 결과값이 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 위 그림에서 실선은 측정농도와 모델농도의 1:1 정합도를 나타낸 것

이고, 점선은 0.5배와 2배의 오차범위를 나타낸 것이다. 일산화탄소의 경우 위의 2배수의 오차범위 안에 측정농도가 거의 포함되어있는 것을 볼 수 있다.

측정농도와 모델농도의 정량적인 비교를 위하여 Bias와 NMSE(Normal Mean Square Error)를 구하여 Table 3에 나타내었다. Bias는 편향이라고도 하며 평균값에서 농도가 벗어난 값을 말하며 0에 가까울수록 정합도가 우수한 것이고, 양의 값은 모델예측이 과대평가를, 음의 값은 모델예측이 과소평가됨을 각각 나타내는 지표이다. 한편 NMSE의 경우도 0에 가까울수록 정합도가 우수한 것을 의미한다. 일산화탄소의 경우 측정농도와 모델농도의 차이가 Bias의 경우 CALINE3는 0.0893, CALINE4는 0.0912

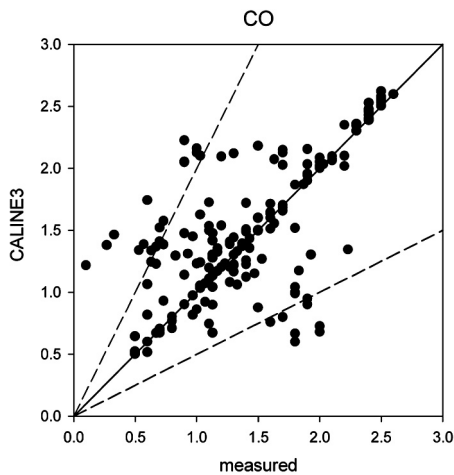


Fig. 2. Comparison of measured CO concentrations with the predicted ones by CALINE3 in flat terrain.

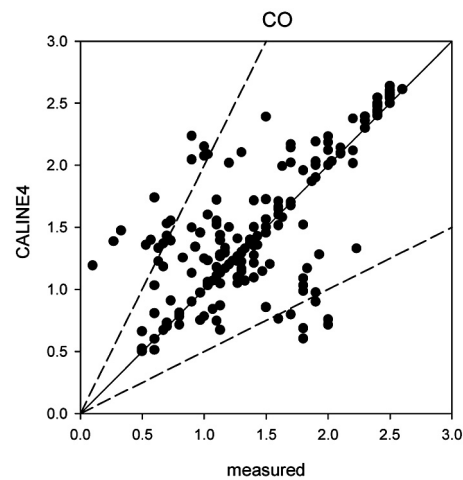


Fig. 3. Comparison of measured CO concentrations with the predicted ones by CALINE4 in flat terrain.

Table 3. Statistics of model validity of CO in flat terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	0.0893	0.0912
NMSE	0.1950	0.1915

Table 4. Statistics of model validity of NO₂ in flat terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	1.0075	0.1130
NMSE	1.0225	0.4360

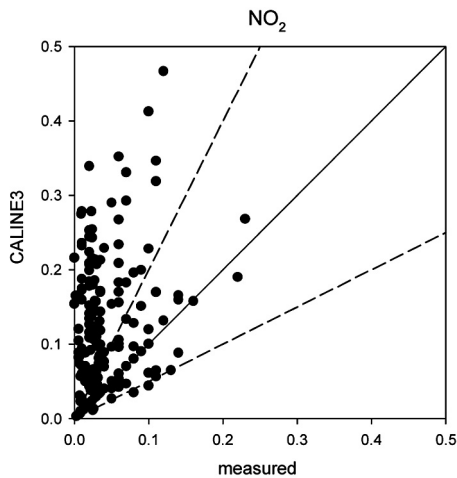


Fig. 4. Comparison of measured NO₂ concentrations with the predicted ones by CALINE3 in flat terrain.

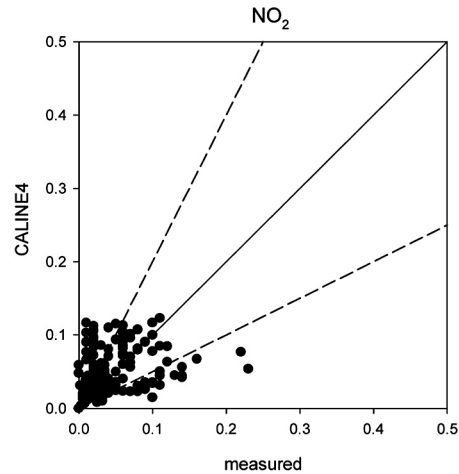


Fig. 5. Comparison of measured NO₂ concentrations with the predicted ones by CALINE4 in flat terrain.

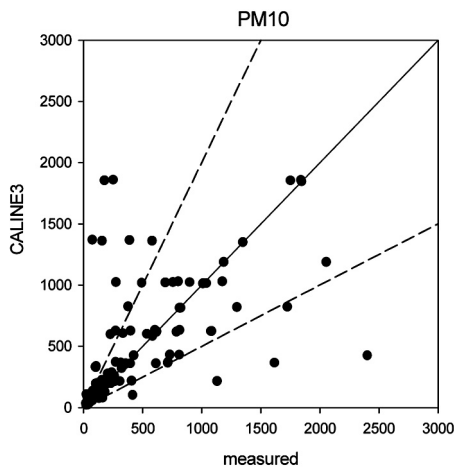


Fig. 6. Comparison of measured PM10 concentrations with the predicted ones by CALINE3 in flat terrain.

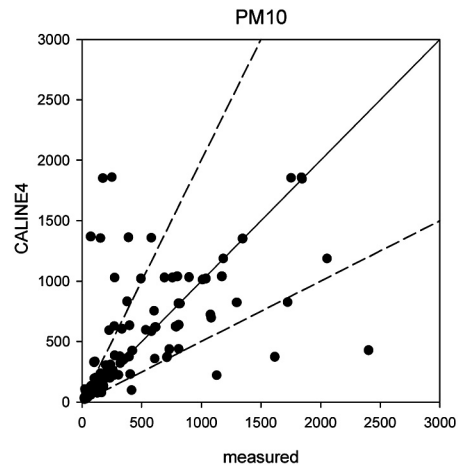


Fig. 7. Comparison of measured PM10 concentrations with the predicted ones by CALINE4 in flat terrain.

정도 나타나는 것을 알 수 있고, NMSE의 경우 CALINE3는 0.1950, CALINE4는 0.1915를 각각 나타내며, CALINE3와 CALINE4 모델의 값이 거의

유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 두 모델 모두 예측치와 차이를 보이고 있는 것은 모델식이 정상상태 모델로 Gaussian 확산식을 적용하고 있기 때문에

Table 5. Statistics of model validity of PM10 in flat terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	0.1425	-0.0020
NMSE	3.4245	3.3895

난류유동에 의해서 급격히 변하는 기상상태를 모델식에 정확히 반영하는데 한계가 있기 때문이다.

Fig. 4와 5는 이산화질소(NO₂)의 측정 전체 기간 동안의 측정농도와 모델결과 농도를 비교한 것이고, 정량적인 평가를 위해 Table 4에 Bias와 NMSE의 값을 정리하여 나타냈다.

위 그림에서 보면 NO₂의 경우 CALINE3 모델이 측정농도보다 높게 예측되는 경향을 알 수 있으며 Bias의 값도 CALINE3 모델의 값이 1.0075 로 0.1130 인 CALINE4 모델보다 오차가 크게 나타났다. 이산화질소인 경우에는 CALINE3 모델에서는 비반응성 물질로 취급하나, CALINE4에서는 이산화질소가 오존과 반응하여 산화되는 반응을 모델에서 반영하였기 때문에 CALINE4 계산치가 CALINE3 값보다 낮게 예측되며, 측정치와 유사한 경향을 보이는 것이다.

Fig. 6과 7은 미세먼지의 측정농도와 모델농도를 비교한 것이고, Table 5에 Bias 및 NMSE 값을 모델

별로 나타냈다.

위 그림에서 보는 바와 같이 CALINE3 및 CALINE4 모델은 서로 유사한 경향을 보이며, Bias의 값은 CALINE 4 모델이 -0.0020 으로 0.1425인 CALINE 3 모델보다 오차가 더 적은 것을 알 수 있으나, 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.

2. 교각 지형 비교

교각 지역에서의 측정농도와 각각의 모델과의 적합도를 판단하기 위하여 다음과 같이 측정농도와 모델농도를 비교하였다. Fig. 8과 9는 측정 기간 동안의 일산화탄소의 측정농도값과 CALINE3 및 CALINE4 모델로 예측된 농도값과 각각 비교한 것이다. Table 6에는 적합도를 평가할 수 있는 Bias 및 NMSE 값을 계산하였다.

일산화탄소의 경우 측정농도와 모델농도의 차이가 Bias의 경우 CALINE3 는 0.0191, CALINE4 는 0.0632 정도 나타나는 것을 알 수 있고, NMSE의 경우 CALINE3 는 0.0036, CALINE4는 0.0038 나타나며, CALINE3 와 CALINE4 모델의 값이 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10 및 11는 이산화질소(NO₂)의 측정 전체 기

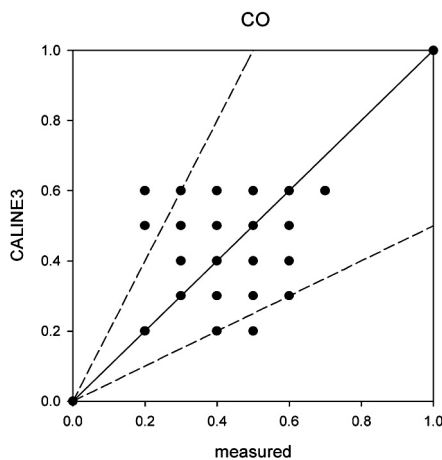


Fig. 8. Comparison of measured CO concentrations with the predicted ones by CALINE3 in bridge terrain.

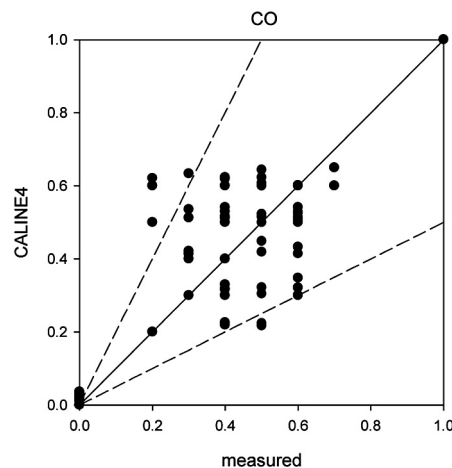


Fig. 9. Comparison of measured CO concentrations with the predicted ones by CALINE4 in bridge terrain.

Table 6. Statistics of model validity of CO in bridge terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	0.0191	0.0632
NMSE	0.0036	0.0038

Table 7. Statistics of model validity of NO₂ in bridge terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	0.8018	-0.1802
NMSE	0.3568	0.3960

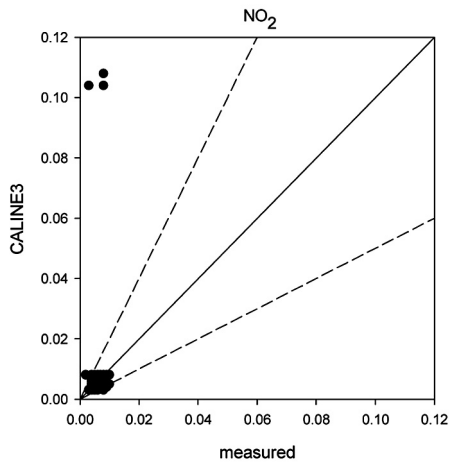


Fig. 10. Comparison of measured NO₂ concentrations with the predicted ones by CALINE3 in bridge terrain.

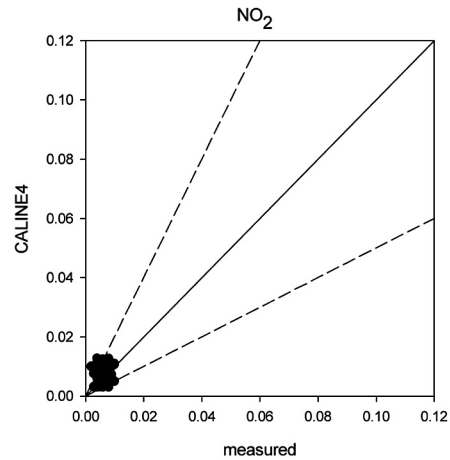


Fig. 11. Comparison of measured NO₂ concentrations with the predicted ones by CALINE4 in bridge terrain.

간동안의 측정농도와 모델결과 농도를 비교한 것이고, 정량적인 평가를 위해 Table 7에 Bias와 NMSE의 값을 정리하여 나타냈다.

위의 그림에서 보면 NO₂의 경우 CALINE3 모델이 측정농도보다 높게 예측되는 경향이 있는 것을 볼 수 있으며 Bias의 값도 CALINE3 모델의 값이 0.8018

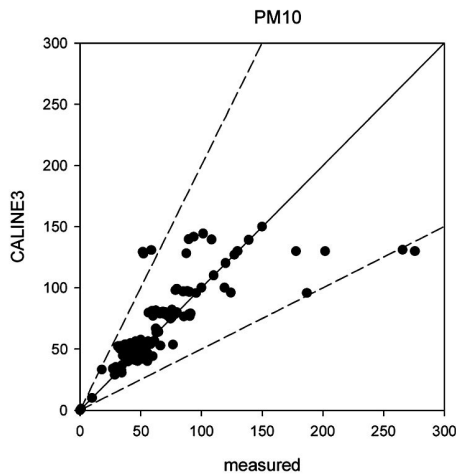


Fig. 12. Comparison of measured PM10 concentrations with the predicted ones by CALINE3 in bridge terrain.

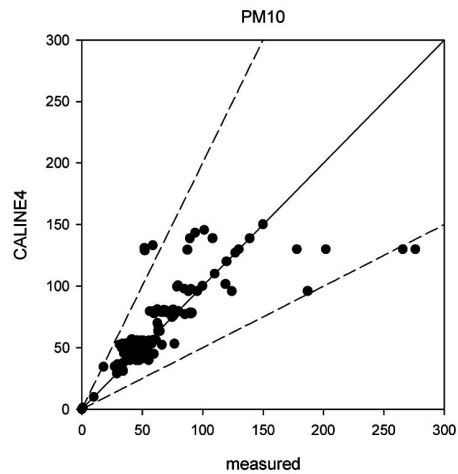


Fig. 13. Comparison of measured PM10 concentrations with the predicted ones by CALINE4 in bridge terrain.

Table 8. Statistics of model validity of PM10 in flat terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	0.0327	0.0397
NMSE	0.0010	0.0015

Table 9. Statistics of model validity of CO in complex terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	- 0.1866	0.2359
NMSE	0.0435	0.1451

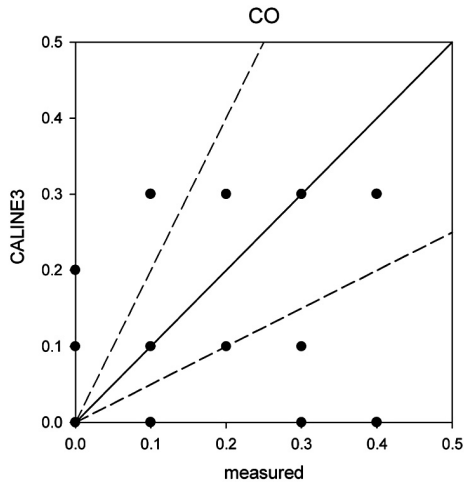


Fig. 14. Comparison of measured CO concentrations with the predicted ones by CALINE3 in complex terrain.

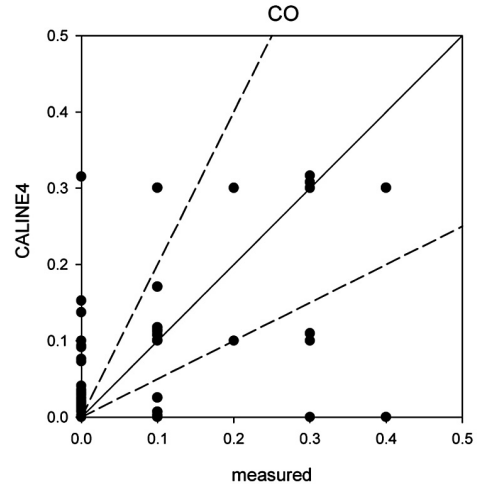


Fig. 15. Comparison of measured CO concentrations with the predicted ones by CALINE4 in complex terrain.

로 -0.1802 인 CALINE4 모델보다 오차가 더 크게 나타났다. 이도 CALINE4에서 오존과 이산화질소와의 반응을 고려한 것에 기인한다고 판단된다.

Fig. 12과 13은 미세먼지의 측정농도와 모델농도를 비교한 것이고, Table 8에 Bias 및 NMSE 값을 모델별로 나타냈다.

위의 그림에서 보는 바와 같이 CALINE3 및 CALINE4 모델은 서로 유사한 경향을 보이며, Bias값이 CALINE3 와 CALINE4 가 0.0327과 0.0397로 모델 농도와 측정 농도가 거의 유사한 것을 알 수 있다.

3. 복잡지형 비교

복잡지형인 양면 및 측면 절토 지역에 위치한 도로를 대상으로 측정치와 모델치의 정합도를 평가하였다. Fig. 14와 15에는 일산화탄소의 경우 측정농도와 CALINE3 및 CALINE4 모델 농도 값을 비교하여 나타낸 것이다. 또한 Table 9에는 Bias와 NMSE값

을 계산하여 나타냈다.

분석 결과를 보면, Bias의 값이 CALINE3 모델은 측정값보다 과소평가되었고, 오차범위가 CALINE 4 모델보다 적은 것으로 나타났다. 이는 절토지형인 관계로 풍속에 따라 모델 값이 0으로 나타나는 횟수가 많아서 정확하다고 볼 수 없다.

Fig. 16과 17에는 NO₂의 측정농도와 모델농도의 농도 분포를 나타냈고, Table 10에는 정합도를 평가할 수 있는 Bias 및 NMSE 값을 계산하였다.

위의 측정농도와 모델농도의 농도 분포를 보면 CALINE3 모델과 CALINE4 모델 모두 측정값에 비해 과대평가되었다. Bias 값은 CALINE3 모델은

Table 10. Statistics of model validity of NO₂ in complex terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	1.2476	1.1544
NMSE	1.0523	0.3356

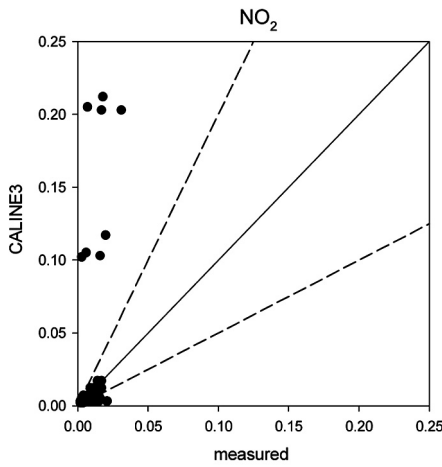


Fig. 16. Comparison of measured NO₂ concentrations with the predicted ones by CALINE3 in complex terrain.

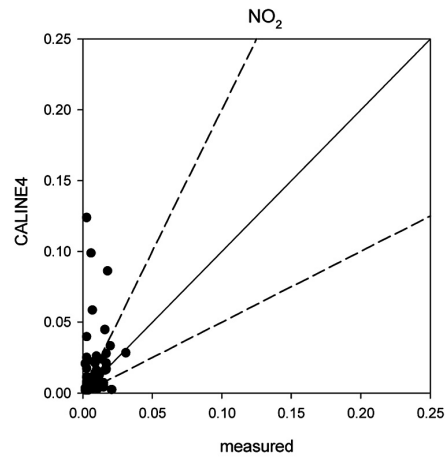


Fig. 17. Comparison of measured NO₂ concentrations with the predicted ones by CALINE4 in complex terrain.

1.2476, CALINE4 모델은 1.1544로 CALINE4 모델의 경우가 0에 더 가까운 값을 나타내고 있다. NMSE에서도 CALINE4가 CALINE3 보다 0에 더 가까운 값을 나타내고 있다.

Fig. 18과 19에는 미세먼지의 측정농도와 모델농도의 농도 분포를 나타냈고, Table 11에는 정합도를 평가할 수 있는 Bias 및 NMSE 값을 계산하였다.

미세먼지의 경우는 Fig. 18, 19에서처럼 CALINE3와 CALINE4 모델 유사한 경향을 보이고 있다. 다른 물질의 경우처럼 CALINE4 모델이 CALINE3 모델보다 오차가 적음을 알 수 있다.

복잡지형인 측면 및 양면 절토인 경우에도 비반응성 물질인 CO와 PM10은 CALINE3 모델과 CALINE4 모델의 예측치가 동일하고, NO₂인 경우

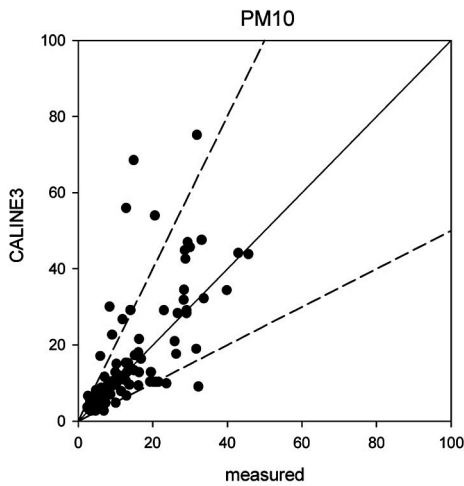


Fig. 18. Comparison of measured PM10 concentrations with the predicted ones by CALINE3 in complex terrain.

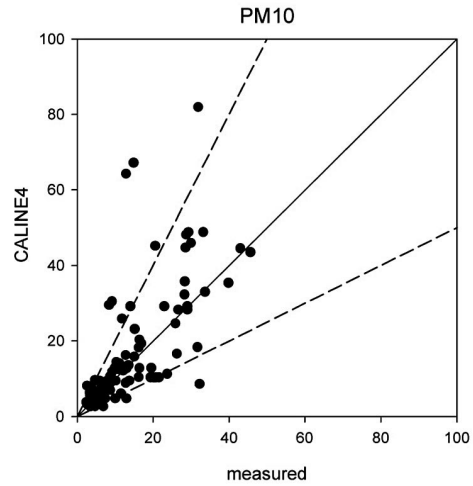


Fig. 19. Comparison of measured PM10 concentrations with the predicted ones by CALINE4 in complex terrain.

Table 11. Statistics of model validity of PM10 in complex terrain.

	CALINE3	CALINE4
Bias	- 0.1906	0.1259
NMSE	0.3285	0.0510

에 CALINE3 모델의 농도가 CALINE4의 모델값에 비해서 높게 예측되는 경향은 단순지형과 동일하게 나타났다. 그러나 절토 지역 측정시 풍속이 0.5 m/s 이하인 저풍속의 비율이 총 측정 시간 중 80%로 매우 높게 나타나 측정치와 모델치의 정합도 분석에 자료가 부족하였기 때문에 적절한 모델을 선정하기에 무리가 있었다. 따라서 복잡지형을 대상으로 보다 정밀한 평가를 위해서 향후 추가 연구가 요구된다.

VI. 고속도로환경영향평가 지침

본 연구결과를 토대로 고속도로환경영향평가시에 적용되는 배출계수 산정 방법과 기상 및 모델 적용에 있어서의 평가지침과 이에 따른 개선방안을 제시한다.

1. 도로영향평가 지침

고속도로 환경영향평가시 배출계수 산정방법과 기상 및 모델의 적용 방법을 제시한다.

1) 배출량 산정

도로에서 발생하는 오염물질 CO, NO₂, PM10을 모델에 적용하기 위한 배출계수를 산정하는 방법을 다음처럼 제시한다.

Fig. 20에서처럼 건설교통부의 통계자료를 이용하거나 현장실측자료를 이용하여 차종을 7차종(승용차, 승합차, 소형버스, 일반버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭)으로 구분하여 차량 통행량을 구한다. 이를 국내 대기보전정책수립지원시스템의 배출계수식을 이용하여 배출계수를 산출하고 차종별 비율(%)을 곱한다. 그리고 각각 구해진 차종별 배출계수를 합하여 총배출량을 산출한다.

2) 기상

고속도로 환경영향평가시 모델에 사용될 기상(풍향, 풍속, 안정도, 혼합층의 높이, 온도)의 적용에 있어서 다음과 같이 제시한다.

- (1) 고속도로환경영향평가 지역의 현지기상 실측 자료 사용한다.
- (2) 현지기상 측정이 곤란할 때나, 실측자료의 적용이 곤란할 때는 평가대상지역에서 가장 인근에 있는 기상대 자료를 사용한다.

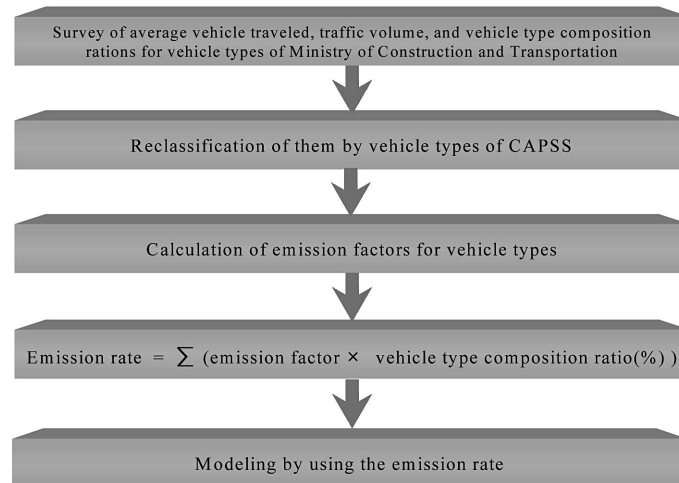


Fig. 20. The procedure for estimating the emission factors.

3) 모델의 적용

고속도로환경영향평가를 실시할 때 각각의 지형에 도로확산모델을 다음과 같이 적용함을 권장한다.

- (1) 성토, 평탄, 교각 등과 같은 비교적 단순한 지형에 있어서는 CALINE4 모델을 사용한다.
- (2) 절토 등과 같은 복잡한 지형에 있어서는 CALINE4 모델을 사용하는 것을 원칙으로 하고, 모델 결과가 환경기준을 초과할 시에는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic, CFD) 모델 등과 같은 보다 정밀한 모델을 이용하여 상세 계산을 수행하여 평가한다.

2. 개선방안

본 연구에서 선정된 CALINE4 모델은 미국의 지형을 대상으로 만들어졌기에, 이러한 모델을 국내 지형에 적용하기 위해서는 개선되어야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 예측점 및 예측구간이 20개로 제한되어 있어서 곡선구간이 많은 국내 고속도로에 적용하기 위해서는 많은 구간으로 나누어져야 하므로 예측점 및 예측구간의 수가 확장되어야 한다.
- (2) CALINE4 모델에서는 오염원 높이를 지반고나 기준선 위·아래의 수직거리로 $\pm 10\text{m}$ 로 제한되어 있지만 국내 교각 및 절토 지형은 대부분이 10m 이상으로 이루어져 있으므로 모델에 적용하기 위해서는 오염원 높이에 대한 수정 및 보완이 필요하다.
- (3) CALINE4 모델에서는 저풍속일 때 큰 수직 확산의 결과를 초래하기 때문에 오차가 발생하여 0.5m/s 이상의 풍속으로 제한을 두고 있다. 그러나 국내에서는 지역에 따라서 저풍속의 비율이 높아지므로 저풍속일 때 모델의 적용에 있어서 신중해야 한다.

VII. 결론

국내 배출량 중에서 도로에서 배출되는 오염물질

이 차지하는 비중이 지역에 따라서 최대 70%에 까지 이르고 있고, 도로를 대상으로 한 환경영향평가에서 총 평가 대상 중에서 많은 부분을 차지하고 있다. 국내에서는 주로 U.S. EPA에서 추천하는 모델인 CALINE3 모델을 사용하고 있으나, CALINE3 모델의 경우 1시간 기상자료인 단일기상자료를 사용하고 있기 때문에 시간에 따라서 다양하게 전개되는 기상 상태를 종합적으로 반영하는데 한계가 있고, 도로상에 배출되는 주 오염물질인 NO_2 의 예측이 부정확한 단점이 있다. 또한 국외 및 국내의 배출계수, 교통량 등급 및 주변지형이 판이하게 다름에도 불구하고 기존 CALINE3 모델을 그대로 도로환경영향평가에 적용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 다양한 차종에 따른 배출량 산출 방법을 정립하고, 국내외에서 사용되고 있는 도로 확산 모델을 실제 5가지 형태의 도로를 대상으로 측정실험을 통해서 비교 평가하여 국내 실정에 적합한 도로 환경영향평가 방법을 정립하였다.

도로 차종별 배출계수에 대해서 국내 환경부 주관으로 진행되는 대기보전정책지원시스템(CAPSS) 구축사업에서 제시된 배출계수의 적용이 적절한 것으로 나타났다. 단지 건설교통부의 고속도로 교통량 통계에서 사용하는 차량 구분보다 CAPSS에서 차량구분이 세분화되어 있기 때문에 건설교통부 통계로 배출량 산정시에 건설교통부 차종 분류에 의한 차종별 통행량 및 등록 차종의 분포를 이용하여 CAPSS 배출 계수에 의한 차종으로 분배하여 계산해야 한다.

한편 미국, 유럽 및 호주에서 사용되고 있는 도로 확산모델을 공개 여부, 사용자 편의성, 및 이론적 접근 방법 등을 중심으로 분석한 결과 U.S EPA의 CALINE3 및 CALINE4 모델이 고속도로를 대상으로 하는 환경영향평가에 적합한 것으로 나타났다.

이와 같이 선정된 CALINE 3 및 CALINE 4 모델의 정합도를 분석하기 위해서 경부 및 영동 고속도로에서 5개 형태의 도로(평탄, 성토, 교각, 측면 절토 및 양면절토)에 대해서 기상, 교통량 및 농도를 측정

하였다. 측정 대상 오염물질은 CO, NO₂, PM10이었고, 각각의 도로 형태에 대해서 2일간씩 2시간 간격으로 측정하고, 측정 지점은 도로를 중심으로 배경농도를 위한 풍상지역 1개 지점과 풍하지역 4개 지점을 선정하여 측정하여 모델 예측치와 비교 분석하였다.

단순지형인 평탄, 성토 및 교각을 대상으로 모델 예측치와 측정농도를 비교한 결과, 비반응성 물질인 CO 및 PM10은 CALINE3과 CALINE4 모델간의 차이가 없고, 두 모델 모두 측정치와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 그러나 NO₂인 경우에는 CALINE4 모델이 측정치보다 높게 예측된 반면에 CALINE3은 측정치와 비교적 잘 일치하였다. 따라서 NO₂를 평가할 경우에는 오존과 NO₂의 1차 감쇄반응을 고려하여 계산하는 CALINE 4 모델을 사용하는 것이 타당하다.

복잡지형인 측면 및 양면 절토인 경우에도 비반응성 물질인 CO와 PM10은 CALINE3 모델과 CALINE4 모델의 예측치가 동일하고, NO₂인 경우에 CALINE3 모델의 농도가 CALINE4의 모델치에 비해서 높게 예측되는 경향은 단순지형과 동일하게 나타났으나, 모델의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 복잡지형에 대해서 CALINE 3 및 4 모델을 적용시에 세심한 주의가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원의 지원한 “환경영향평가시 대기확산모델의 적합성 및 개선방안 연구”로 진행된 결과이며, 연구를 지원해준 도로교통기술원에 감사드립니다.

참고문헌

구운서, 전의찬, 2004, 환경영향평가시 대기확산모델의 적합성 개선 및 개선방안 연구(최종보고서), 안양대학교.

건설교통부, 2004, 도로 교통량 통계연보.
 김아름, 2004, 도로환경영향평가시 대기확산모델의 적합성 연구, 안양대학교 대학원 환경공학과 석사학위 논문.
 환경부, 2002, 대기보전 정책수립 지원시스템 구축사업(2차년) 최종보고서(배출량 검증 보고서).
 European Environment Agency, Road transport, 1999, EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook-3rd edition, technical report No 30.
 Paul Benson, P.E., 1979, CALINE3-A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets. U.S. EPA.
 Paul Benson, P.E., 1989, CALINE4-A Dispersion Model for Concentrations Near Roadways, California Department of Transportation.
 Peter A. Eckhoff and Thomas N Braverman, 1995, User's guide to CAL3QHC version 2.0, California Department of Transportation.
 Paul E. Benson, 1992, A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models, California Department of Transportation, Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere, 26(3), 379-390.
 United States Environmental Protection Agency, 2002, User's guide to mobile6.1 and mobile6.2 : mobile source emission factor model.