

■ 論 文 ■

ITS를 이용한 대기오염 모니터링 시스템 개발

Development of Emission Monitoring System Using ITS

박 준 환

(서울대학교 환경대학원 박사과정)

이 준

(서울대학교 환경대학원 박사과정)

이 영 인

(서울대학교 환경대학원 부교수)

목 차

I. 서론

- 1. 연구의 배경
- 2. 연구의 목적 및 내용

II. 이론적 고찰

- 1. 교통류 시뮬레이션 알고리즘
- 2. 배출가스 배출량 추정 및 확산

III. 대기오염 모니터링 시스템 개발

1. 시스템 개요 및 구조

- 2. 교통류 시뮬레이션 알고리즘 구축
- 3. 배출가스 추정 및 확산 모형 구축

IV. 결론

- 1. 연구 결과
- 2. 향후 연구과제

참고문헌

Key Words : 대기오염, 배기가스 배출량, ITS, 교통류 시뮬레이션, 배출량 추정, 확산

요 약

대기오염 중 자동차에서 배출되는 오염물질이 차지하는 비중이 '92년 60.8%에서 '99년 85.2%로 점차 증가하고 있는 현실을 반영하여 자동차 배기가스로 인한 대기오염 문제는 최근 몇 년 동안 교통 및 환경분야에서 중요한 연구과제로 주목받고 있다.

본 연구에서는 ITS 검지정보를 입력하여 네트워크 상에서 개별 차량의 운행 패턴과 교통류 특성 변화를 모사하고 이러한 변화에 따라 도로에서 발생하는 자동차 배기가스 배출량을 추정하고 이를 시각적으로 표현할 수 있는 모니터링 시스템 개발을 목적으로 한다.

본 연구는 교통류 시뮬레이션 모형에 대한 고찰을 통해 국내·외 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램의 내부 알고리즘을 고찰하고, 모니터링 시스템에 탑재하기 위한 교통류 알고리즘을 구축하였다. 또한 배기가스 추정을 위해 배기가스 배출량 산정 및 확산에 관한 연구의 검토를 통해 기존 모형의 한계를 제시하면서 대안적 접근방향을 제시하였고 이러한 연구를 체계화하여 교통류 변화에 따른 대기오염 변화를 모니터링할 수 있는 시스템을 개발하였다.

I. 서론

1. 연구의 배경

대기오염 중 자동차에서 배출되는 오염물질이 차지하는 비중이 '92년 60.8%에서 '99년 85.2%로 점차 증가(환경부, 2001)하고 있는 현실을 반영하여 자동차 배기가스로 인한 대기오염 문제는 최근 몇 년 동안 교통 및 환경분야에서 중요한 연구과제로 주목받고 있다. 그러나 문제의 중요성에 반해 배기가스 배출량을 실시간 교통류 상황과 더불어 추정할 수 있는 모형에 대한 연구는 거의 없는 것이 사실이다.

ITS사업을 통해 실시간 교통상황을 인식할 수 있는 토대가 마련됨에 따라 보다 현실적인 배기가스 산출량 추정 모형을 마련하고, 이를 실제 네트워크 상의 교통류 상태와 결합시켜 배출량을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 시스템이 요구된다. 이러한 모니터링 시스템의 마련은 ITS의 새로운 활용방안이며 교통과 환경 분야의 중요한 기초를 제시할 것이다.

2. 연구의 목적 및 내용

본 연구에서는 ITS 검지정보를 입력하여 네트워크 상에서 개별 차량의 운행 패턴과 교통류 특성 변화를 모사하고 이러한 변화에 따라 도로에서 발생하는 자동차 배기가스 배출량을 추정하여 대상 지역의 대기오염을 모니터링하고 시각적으로 표현할 수 있는 모니터링 시스템 개발을 목적으로 한다.

본 연구는 교통류의 변화를 시뮬레이션하고, 배출량의 변화를 산출하여 표현하는 것을 목표로 하므로 3가지 세부 과제로 나누어 연구를 진행하였다.

1) 교통류 시뮬레이션

검지정보를 통해 교통류를 시뮬레이션하여 교통류 상태를 인식하고 이를 통해 배출가스 추정의 기초자료가 되는 속도 및 가속도 등을 산출한다.

2) 배기가스 발생량 추정 및 확산

교통류의 속성, 특히 개별 차량의 속도와 가속도를 바탕으로 배기가스 배출량 산정하고, 더불어 기후 및 기타 조건을 고려한 확산 결과를 산출한다.

3) 시스템 구조 설계 및 개발

세부 알고리즘을 체계화하고 프로그래밍하여 하나의 구조적인 시스템으로 구축한다.

II. 이론적 고찰

1. 교통류 시뮬레이션 알고리즘

미시적 시뮬레이터에서 교통의 흐름을 모사하는 중요한 요소는, 외부 자극에 대해서 개별 운전자들이 어떻게 반응하는지를 나타내는 개별 운전자 행태모사에 있다.(이영인 외, 2002) 이는 차량과 차량사이의 상호작용으로 표현되는데, 이에 중심이 되는 것은 차량발생 모형과 차량추종모형, 차로변경모형에 관한 이론이라고 할 수 있다. 이러한 이론 중에서 차량발생은 ITS의 검지정보로 대체하고, 차로변경은 기존의 모형 중 신뢰성과 적용가능성을 고려하여 선정하였다.

본 연구에서는 교통류 모형의 핵심이 되는 차량추종 모형에 대해서 기존 연구들의 특성과 한계를 파악하여 모니터링 시스템에 탑재할 차량추종모형의 파라미터 추정 및 모형구축을 시도하였다.

우선 후행차량이 안전거리를 유지하면서 선행차량을 따르는 규칙으로 후행차량의 속도가 10mph당 후행차량의 길이만큼씩 선행차량과의 최소간격을 유지하며 주행하는 것으로 가정하는 Pipes' 모형을 고려할 수 있다. Pipes' 모형은 모형의 단순함에 비해서 현장자료에 근사하다고 볼 수 있으며, Time Headway-Speed 관계 또한 실측치와 비교적 잘 맞으며, 최소 차두간격 추정에 유용하다. 그러나 속도가 매우 높거나 낮은 상황에서의 Dist. Headway-Speed 관계는 실제값과 다소 차이를 보인다.

Forbes' 모형은 후행차량이 감속의 필요성을 인지하고 브레이크를 작동하는데 필요한 반응시간을 고려하는 방식으로 접근하며, 이때 선행차량과 후행차량간의 gap은 항상 반응시간보다 커야한다는 전제사항이 있다. "최소차두시간 = 반응시간 + 선행차량이 차량의 길이만큼 주행하는데 필요한 시간"이라 정의한다. Pipes' 모형과 같이 현장자료와 유사하나 아주 낮은 속도와 높은 속도에서는 상당한 차이가 생기는 단점이 있다.(C.J. Messer, 1997)

앞서 모형들에서 보다 진보된 형태의 모형으로 GM

(General Motors) 모형(김창모, 2002)을 고려하였다. GM 모형은 "운전자의 반응은 민감도와 자극에 의해 결정된다"는 개념을 가지고 출발하여, 구조는 같으나 민감도 관점에서 서로 다른 5개의 모형을 단계별로 개발하였다.

GM 5번째 모형의 기본형을 살펴보면 식(1)과 같다.

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = a \frac{[v_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^n \quad (1)$$

여기서,

- $a_{n+1}(t + \Delta t)$: 반응시간 후 후행차 가속도
- Δt : 반응시간
- l, m, n, a : 모형 파라미터
- $v_n(t)$: 시간 t 에서 선행차량 속도
- $v_{n+1}(t)$: 시간 t 에서 후행차량 속도
- $v_{n+1}(t + \Delta t)$: 반응시간 후 후행차 속도
- $x_n(t) - x_{n+1}(t)$: 차두간격

PITT(The University of PITTsburgh) 모형이라고도 하는 FRESIM 모형은 NTRAS, TOWPAS 등의 모의실험모형에서 사용되었으며, 최근의 VISSIM에도 탑재된 모형으로, 후행차가 자신의 속도에 따라 선행차와 일정한 차간거리(Space Headway)를 유지한다는 Pipes의 가정에 기반 하여 차량의 가·감속을 결정하는 모형이다. 여기서, 선두차량이 새로운 위치에 도달하면 후미차량은 $h(t)$ space를 유지하기 위해 가·감속도 값을 계산하여 위치를 정하며, 차량들의 위치는 Time Step에 의해 연속적으로 갱신되는데, 반응시간은 이보다 작다.

FRESIM 추종모형은 가장 초기의 모의실험기인 Utcs, INTRAS가 개발되는 과정에서 그 신뢰성이 인정되었으나 혼잡 또는 비혼잡 상태에서 분석을 할 수 있으나, 혼잡과 비혼잡이 동시에 존재하는 경우는 분석이 불가능한 것으로 알려져 있다. (Murat F. Aycin and N. Mathews Ave., 2001)

2. 배출가스 배출량 추정 및 확산

선 오염원으로부터 배출되는 대기오염물질 배출량을 산출하는 방법은 국내문헌의 경우 거의 모두 집계(aggregation) 기법을 이용하고 있다. 즉 배출계수 산출식에 활동도를 곱하여 총배출량을 산출하고 합당한

<표 1> 기존 국내 배기가스 배출량 추정 방법

저자	방법	기본자료	오염원
최덕일 (94)	차속을고려한 1991 NIER 배출계수	주행거리와 차량수	자동차
홍대형 (91)	차속을 고려한 1995 NIER 배출계수	주행거리와 속도 및 교통량	자동차, 기차, 항공기
이종범 (94)	차속을 고려한 1995 NIER 배출계수	주행거리와 차량수	자동차
정일래 (95)	1995 NIER 배출계수	주행거리와 차량수	자동차, 기차, 항공기

할당기준을 세워 배출량을 시공간에 분할하는 방식을 채택하고 있고 이때 배출계수 회귀식은 평균통행속도를 이용하여 산출하며, 활동도는 주로 일일 평균주행거리(VKT)를 이용하고 있다.

국내의 연구는 주로 배출계수 회귀식을 도출하기 위해 통행특성과 배출특성 사이의 상관관계를 연구하거나 총배출량을 지역별로 할당하는 기준에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 이러한 접근은 개별차량의 교통류 특성에 따라 각기 달라지는 배출량의 차이를 규명하거나 교통정책의 개선에 따른 대기오염 변화를 추정·분석하기에는 한계가 있다.

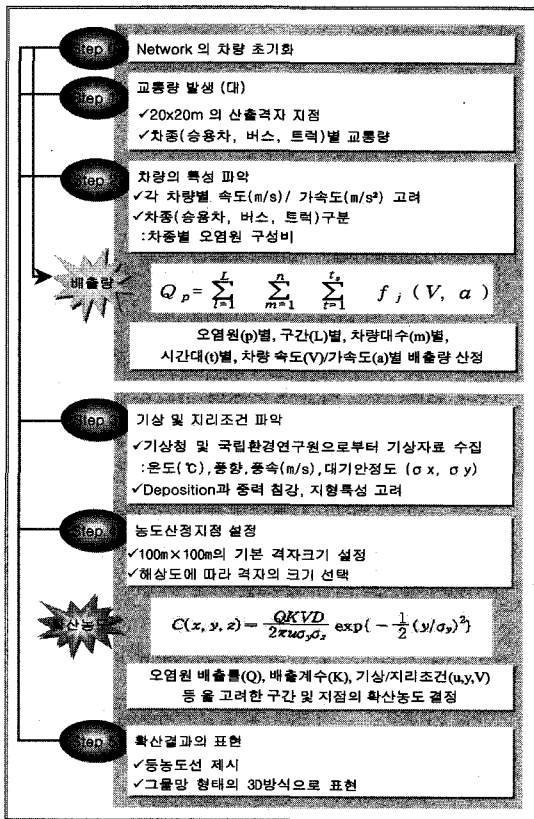
국내연구들과는 달리 국외문헌의 경우 평균통행속도에 크게 의존하는 현재 배출량 산출방법(예를 들어, MOBILE, EMPAC, 등)의 한계에 대해 인식하고, 실제 교통 네트워크 상에서 통행행태와 운행조건을 반영하기 위해 미시모형인 교통류 시뮬레이션 모형과 통합하려는 시도가 이루어지고 있다.

즉, 개별차량의 특성과 속도/가속도를 미시적으로 고려하여 배출량을 추정하는 모형을 제시하고 있다. 대표적 예로서 NCHRP 모형, EPA의 The Automotive Exhausted Emission Modal Model, VEHSIM, VEMISS 등의 모형이 제안(Barth, 1996)되고 있다.

III. 대기오염 모니터링 시스템 개발

1. 시스템 개요 및 구조

본 연구는 교통류의 실시간 변화를 인식하고, 대기오염의 변화를 산출하는 것을 기본 목표로 한다. 이를 위해 감지정보를 통해 교통류를 시뮬레이션하여 교통류 상태 인식과 배출가스 추정의 기초자료를 산출하는 단계를 거쳐 교통류 변화에 따른 배기가스 배출량을 산정하고 더불어 기후와 기타 조건을 고려한 배기가스의 확산 결과



〈그림 1〉 시스템의 구조 및 내용

를 산출한다. 이러한 구조를 시스템화하기 위해 교통류 및 배출가스와 관련된 세부 알고리즘을 개발 및 구축하고 프로그램화하여 하나의 구조적인 시스템으로 구축하였다. 이러한 구조 체계를 〈그림 1〉에 제시하였다.

2. 교통류 시뮬레이션 알고리즘 구축

1) 차량 추종 모형의 선정

실제 도로상에서 발생하는 복잡하고 다양한 교통현상을 논리적·체계적인 이론으로 표현하는 교통류 알고리즘은 실제 차량의 미시적 움직임을 묘사하는 시뮬레이터의 성능을 좌우한다고 할 수 있을만큼 매우 중요하다. 그 중에서도 핵심요소는, 차량추종모형과 차로변경모형 등 외부 자극에 대한 개별 운전자 행태를 묘사하는 이론이라고 할 수 있다.

여기서는 기존에 연구·개발되어 온 차량추종모형에 대한 앞서의 이론적 고찰을 통하여 각각의 이론에 대한 개념과 특성을 파악하고, 본 연구에서 사용될 모형을 결정하기 위하여 대안 설정 및 비교분석 수행과정을 거

쳐 모형을 평가·선정하였고, 국내 적용을 위한 파라미터 추정 과정을 거쳐 본 시스템에 적용할 알고리즘을 구축하였다.

본 연구에서는 신호교차로 미시적 시뮬레이션에 직접 적용이 가능한 차량추종모형을 정립하기 위하여 신호교차로에서 미시적 실측자료를 수집하고, 수집된 자료에서 통계적 기법을 통해서 모형 추정에 적합한 자료를 구축, 차량의 상황별(가속상황, 감속상황, 출발상황, 정지상황) 차량추종모형을 구축하였다.

또한, 기존의 모형에서 제시한 민감도와 자극부분을 새롭게 정의하여 각 상황별로 미시적 실측자료를 이용하여 모형을 추정하고, 이렇게 추정된 모형들 중에서 통계적 기법과 실측치와의 비교를 통해서 가장 적합한 모형을 선택하였다.

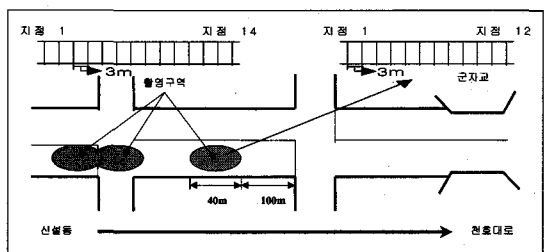
본 연구의 차량추종모형을 구성하기 위하여 GM 5번째 모형을 기본 모형으로 설정하고, 여기에 민감도 요소 중에서 속도부분을 시점 *t*와 시점 *t+Δt*로 구분하며, 자극은 먹지수 *n*이 1인 경우(선형)와 1이 아닌 경우(비선형)로 구분하여 개별적으로 모형을 도출하였다.

2) 모형의 구축

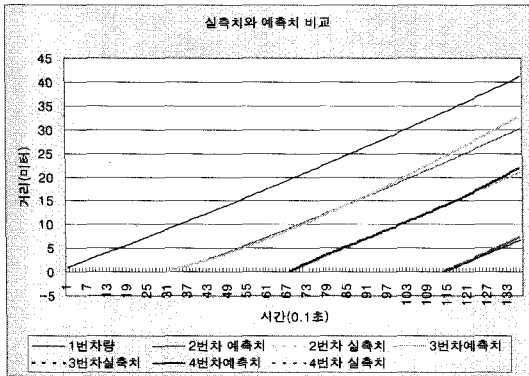
(1) 실측자료의 수집

본 연구에서는 추종모형의 구축을 위해 가속, 감속, 출발, 정지상황에서의 파라미터를 추정하였다.

우선 자료수집을 위해 〈그림 2〉과 같이 조사구간을 천호대로(답십리삼거리~장안평역사거리) 중 일부 구간으로 설정하였다. 그리고 차량의 각 상황(가속상황, 감속상황, 출발상황, 정지상황)에 대한 자료를 확보하기 위하여 조사는 총 3지역에 걸쳐서 링크중간, 정지선 하류, 정지선 상류의 40m 구간에서 조사하였다. 실측자료는 Video촬영을 통하여 수집하였으며, 이들 자료는 30 frame/초의 화면 capture가 가능한 Video 편집기를 통하여 개별차량의 지점통과시간을 1/30초 단위로 산출한다.



〈그림 2〉 현장조사지점



〈그림 3〉 차량 실측궤적과 추정궤적과의 비교 분석 예시 (선행 1대, 후행 3대)

〈그림 3〉은 실측차량 중 임의로 선두차량을 선정하고, 후행차량들을 제안된 차량추종모형을 통하여 진행시킨 후 후행차량들의 추정궤적(차량추종모형에 의하여 추정된 궤적)과 후행차량들의 실측궤적을 비교한 것임. 분석결과 모형을 통해서 계산된 예측궤적(실선)은 현장 조사를 통해서 얻은 실측궤적(점선)과 거의 일치하는 결과를 보인다.

이러한 과정을 통해 상행별 차량추종모형은 다음과 같이 정의하였다.

① 가속상황 :

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = 3.3112 \frac{V_{n+1}(t)^{0.1185}}{(X_n(t) - X_{n+1}(t))^{0.7579}} \times (V_n(t) - V_{n+1}(t))^{0.3095} + \epsilon_{n+1}(t) \quad (2)$$

- t : 시간(s)
- Δt : 운전자 n+1의 반응시간(s)
- V_{n+1}(t) : 시간 t에서 운전자 n+1의 속도
- V_n(t) : 시간 t에서 운전자 n의 속도
- V_n(t)-V_{n+1}(t) : 시간 t에서의 상대속도(m/s)
- X_n(t)-X_{n+1}(t) : 시간 t에서의 headway(m)
- ε_{n+1}(t) : N(0, 0.9162²)

② 감속상황 :

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = 0.9128 \frac{V_{n+1}(t)^{0.6540}}{(X_n(t) - X_{n+1}(t))^{0.4864}} \times (V_n(t) - V_{n+1}(t))^{0.3095} + \epsilon_{n+1}(t) \quad (3)$$

- t : 시간(s)
- Δt : 운전자 n+1의 반응시간(s)
- V_{n+1}(t) : 시간 t에서 운전자 n+1의 속도 (m/s)

V_n(t) : 시간 t에서 운전자 n의 속도 (m/s)

V_n(t)-V_{n+1}(t) : 시간 t에서의 상대속도(m/s)

X_n(t)-X_{n+1}(t) : 시간 t에서의 헤드웨이(m)

ε_{n+1}(t) : N(0, 1.1235²)

- ③ 출발상황: 가속상황모형을 통해서 가속도를 계산 하되 선행차량과의 헤드웨이가 6초 이상이면 가속 제약식과 조합하여 후행차량의 가속도를 계산함.

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \max \quad (4)$$

(가속상황 모형 II, 최대가속도)

- ④ 정지상황: 감속상황모형을 통해서 감속도를 계산하되 선행차량과의 헤드웨이가 0.5초 이하이면 가속 제약식과 조합하여 후행차량의 가속도를 계산함.

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \min \quad (5)$$

(감속상황 모형 I, 최대가속도)

3. 배출가스 추정 및 확산 모형 구축

1) 배출량 산정 방법

미국 EPA의 MOBILE과 CARB의 EMPAC 모형 및 우리나라의 기존 대기오염물질 배출량 산출방법은 거시적이고 집계적 방법을 적용해왔다. 그래서 교통류의 다양한 미시적 변화 속에서 대기오염물질 배출량을 분석하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 개선하기 위해 개별차량의 주행모드, 즉 공회전, 등속, 가속, 감속 등의 차량상태를 반영할 수 있는 NCHRP의 Development of a Modal Emission Model, EPA의 The Automotive Exhausted Emission Modal Model, VEHSIM, VEMISS 등의 모형을 적용하였다.

또한 배기가스 배출량은 속도와 가속도에 크게 의존(Cohen, 1997)하는 점에 착안하여, 교통류 시뮬레이션과 연계하여 이용할 수 있는 모형을 개발하였다. 즉 개별차량의 움직임과 속도를 초단위로 계산하여 매 초당 개별차량의 속도 및 가속도 자료를 획득하고 이를 바탕으로 배출가스 배출량을 산정할 수 있게 하였다.

2) 차종구분

본 연구에서는 실시간 검지기 자료를 이용하여 속도 및 가속도를 추정하고 교통량을 수집하게 되므로 차종은 검지기에서 구분되는 차종과 같이 승용차, 버스, 트럭으로 구분된다. 각 차종별로 적용되는 배출량 원단위가 다

르므로 검지단계에서의 정확한 차종구분이 요구된다.

3) 배출량 산출의 일반식 구현

앞서 제시한 차종구분 및 배출량 산출모형에 근거하여 대상 네트워크 전체의 차량이 배출하는 대기오염물질의 총량을 식(6)과 같이 산출할 수 있으며, 차종별 속도와 가속도에 따른 함수로 나타나는 오염원배출량을 매시간단위로 측정하여 모든 링크의 총 합으로 구한다.

$$Q_p = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^m \sum_{j=1}^j f_j (V, a) \quad (6)$$

여기서,

Q_p : 오염원별 시간대 별 총 배출량
($p=HC, CO, NO_x, SO_2$)

l : 링크 수

m : 차량대수 ($m=1,2,...n$)

t : 관측시간(sec) ($t=1,2,...t_j$)

j : 차종 (p :승용차, q :버스, r : 트럭)

f_j : 각 차종별 오염원 배출량 계수

V : 속도, a : 가속도

적용되는 배출 계수는 NCHRP의 Development of a Modal Emission Mode를 사용한다.

4) 확산 모형 구축

환경정책평가연구원에서는 확산 및 농도 산출을 위해 90년대 후반이후 ISC3ST, ISC3LT, CALINE4 모형을 사용하고, U.S EPA에서는 선 오염원에 대한 대기질 예측 모델로서 CALINE -3 모델을 추천하였다. 이 모형들의 기본 확산식은 가우시안 식을 사용하는데 이 모형은 장기적인 대기오염 예측에 사용이 용이하며, 현재 가장 널리 쓰이며 환경영향평가 시 많이 사용하고 있는 모델 중 하나이다.

본 연구에서는 확산 범위에 대한 3차원 가시화를 목표로 하고 있으므로 확산 모델은 가장 단순한 가우시안 모델을 통하여 그 가능성만을 보이고자 하였으며, 실제 적용을 위해서는 향후 보다 정확한 확산 모델의 적용이 요구된다. 가우시안 확산 모델의 형태는 식(7)과 같다.

$$C(x, y, z) = \frac{QKVD}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}(y/\sigma_y)^2\right\} \quad (7)$$

여기서,

Q : 오염물질 배출률(g/sec)

K : 단위 확산계수(단위는 $\mu g/m^3$)

V : deposition과 중력침강 및 지형특성

D : decay term으로 오염물질의 반감기 고려

y : 평균풍향방향에서의 거리(m)

u : 평균 풍속(m/s) = $u(z/z_0)^p$

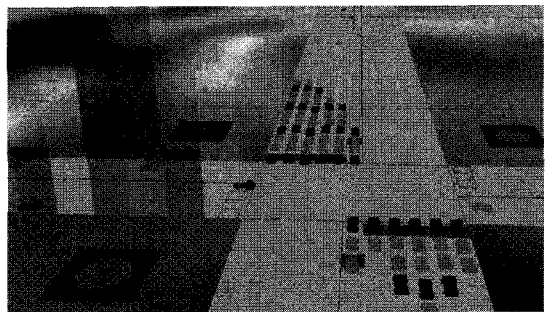
σ_y, σ_z : 수평/수직 확산계수

확산모형의 적용을 위해 각 지점별 시간대별 배기가스의 배출량 뿐만 아니라 지점별 좌표와 풍향, 풍속등의 기후 변수를 함께 고려하였다.

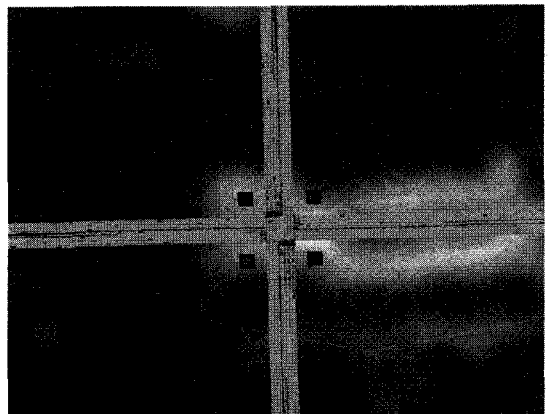
IV. 결론

1. 연구 결과

본 연구는 교통류 시뮬레이션 모형에 대한 고찰을 통해 국내·외 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램의 내부 알고리즘을 고찰하고, 모니터링 시스템에 탑재하



<그림 4> 교차로 주변의 배출량 표현



<그림 5> 등농도선으로 표현된 농도

기 위한 교통류 알고리즘을 구축하였다. 또한 배기가스 추정을 위해 배기가스 배출량 산정 및 확산에 관한 연구의 검토를 통해 기존 모형의 한계를 제시하면서 대안적 접근방향을 제시하였다.

더불어 이러한 연구를 바탕으로 ITS의 검지정보를 통해 교통류 변화를 시뮬레이션하여 속도/가속도에 따른 배출량 및 농도를 산출하여 비주요하게 표현하는 시스템을 구축하였다. 이러한 배출량 및 농도 산출 결과의 예시를 <그림 4>와 <그림 5>에 제시하였다. <그림 4>는 교차로 주변에서 각 지점별로 개별 차량의 배출량을 배기가스 물질별(CO, SO, NOx)로 구분하여 추정된 결과를 막대그래프 형태로 표현한 예시 화면이다. <그림 5>는 이렇게 산출된 배출가스가 주변 기후 및 기타조건에 따라 확산되었을 경우 각 지점별 농도를 계산하여, 같은 농도의 지점들을 이어 연결한 등농도선을 도출하여 표현한 화면의 예시이다.

본 연구를 통해 교통정보에 대한 보다 신뢰성있는 추정은 물론이고 대기오염의 변화를 추정할 수 있게 되어, ITS 활용방안의 다양화, 교통 및 대기의 통합관리, 대기오염을 고려한 교통사업 평가 등을 기대할 수 있다.

2. 향후 연구과제

지금까지의 연구를 바탕으로 보다 나은 시스템을 만들기 위해서는 우선 다양한 알고리즘에 대한 평가를 비롯한 전체적인 시스템 평가가 요구된다. 또한 본 시스템에서 산출하는 배출량 및 농도에 대한 신뢰성을 평가하고 개선하는 연구도 병행되어야 할 것이다. 더불어 배출가스 추정량과 실측자료와 비교하는 과정을 통해 시스템의 전체적 체계의 보완 및 완성이 필요하다.

참고문헌

1. 김창모 (2000), 『차량추종모형 시뮬레이션 프로그램 개발』, 한양대학교 석사학위 논문.
2. 김현구 (2002), 『면/이동오염원 배출량 공간 할당 방식에 대한 고찰』, 한국환경과학회지, vol.11(7), pp. 697~703.
3. 박성규·김신도·이영인 (2001), 『자동차 대기오염 물질 산정 방법론 설정에 관한 비교 연구』, 대한교통학회지, 제19권 제4호, 대한교통학회, pp.35~47.
4. 박창호 (1999), 『교통관리 효과분석을 위한 모의실

험모형 개발』, 서울대학교 공학연구소.

5. 서광석, 김종규 (1995), 『교통여건 변화에 따른 자동차 오염물질 배출에 관한 연구』, 한국환경관리 학회.
6. 이영인·김이래 (2002), 『교통대응 신호제어전략의 평가를 위한 미시적 시뮬레이터의 원형 개발』, 대한교통학회지, 제19권 제6호, 대한교통학회, pp.143~160.
7. 정성봉 (1998), 『차로별 속도차가 차로변경에 미치는 영향에 관한 연구』, 서울대학교 석사학위논문.
8. 정준하 (1999), 『도시 가로망 분석을 위한 미시적 모의실험기 개발』, 아주대학교 석사학위논문.
9. 조강래 (2001), 『자동차에서 배출되는 오염물질의 배출계수 산출과 예측』, 환경부 논문 학술 강연회.
10. 조규탁 (2002), 『자동차 대기오염물질 배출량의 공간해상도 개선을 위한 Nested Top Down Approach 개발』, 서울대학교 박사학위논문.
11. 최강식 (1998), 『미시적 모의실험을 위한 추종모형의 비교분석에 관한 연구』, 서울대학교 석사학위 논문.
12. 경기개발연구원 (2002), 『수도권 자동차 대기오염 물질 배출량 추정 및 대기오염 저감정책방안 연구』.
13. 환경부 (2001), 『대기환경연보』.
14. Barth, M., F. An, J. Norbeck, and M. Ross (1996), 『Modal Emissions Modeling: A Physical Approach』, Transportation Research Record 1520, pp.81~88.
15. C.J. Messer (1997), 『Traffic flow theory』, TRB special report 165.
16. Cohen, S. L. (1997), 『Use of Traffic Simulation in Analysis of Carbon Monoxide Pollution』, Transportation Research Record 648, pp.74~76
17. Murat F. Aycin and N. Mathews Ave. (2001), 『Stability and Performance of Car-Following Models in Congested Traffic』, Journal of Transportation Engineering, Vol.127, No.1, January/February.

✉ 주 작 성 자 : 박준환
 ✉ 논문투고일 : 2004. 10. 13
 논문심사일 : 2004. 10. 29 (1차)
 심사판정일 : 2004. 10. 29
 ✉ 반론접수기한 : 2005. 4. 30