

# 실시간 교통량을 이용한 고속도로 요금소 대기오염도 예측 및 공조관리 시스템 개발

## Air Pollution Prediction and Air Conditioning System at Highway Tollgate by Using Real Time Traffic Volume

박 성 규, 김 신 도, 이 영 인, 강 혜 진

(서울시립대학교 환경공학과 박사과정)

(서울시립대학교 환경공학과 교수)

(서울시립대학교 건축도시조경학부 교수)

(한국도로공사 도로연구소 연구원)

### 목 차

- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| I. 서론            | IV. 시스템의 구성 및 체계 |
| II. 연구방법 및 내용    | 1. 시스템의 개요       |
| III. 대기오염 예측     | 2. 시스템의 정의 및 구성  |
| 1. 대기오염 예측모델의 개요 | 3. 시스템의 기능과 주요화면 |
| 2. 배출량 산정        | V. 기대효과 및 활용방안   |
| 3. 예측모델의 정합도 평가  |                  |
| 4. 부스별 대기오염도 예측  |                  |

#### I. 서론

자동차는 인간에게 중요하고 필요한 수단이지만, 자동차로부터 배출되는 대기오염물질은 인간의 건강에 악영향을 미치고 있고, 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 우리 나라도 생활수준이 향상되면서 1997년 자동차 등록 대수는 1,000만대를 넘어섰고, 자동차 이용의 증가로 인한 대기오염이 날로 심화되고 있다. 1999년 6월 제 3차 환경-건강 장관회의에서 '최근 유럽에서는 자동차의 배출가스로 인한 장기적인 대기오염으로 매년 호흡기 질환 또는 심장질환 관련 초과 사망자수가 동 국가에서의 교통사고 사망자수 보다 많다'는 연구 결과가 발표되었다(WHO, 1999). 이와 같이 교통에 의한 대기오염 문제가 현안으로 대두되고 있으며, 원활한 교통과 환경에 관한 새로운 방향의 대처 방안에 대한 연구가 필요한 실정이다.

한편, 고속도로 이용차량의 증가로 인하여 고속도로 주변과 요금소에서의 대기환경은 악화되어 가고 있으며, 고속도로를 이용하는 자동차도 하루 약 230만대 이상을 기

록하고 있다. 경부고속도로의 서울 관문인 궁내동 서울영업소는 국내 최대의 고속도로 요금소로서, 해마다 20% 이상 증가하는 교통량으로 인하여 요금소와 그 주변 지역의 대기오염이 심화되고 있다. 현재 고속도로에는 139개소의 통행료 징수 요금소가 운영되고 있는데, 요금소 주변은 일반 고속도로 구간과는 달리 자동차의 공회전, 급격한 가속 등으로 인한 대기오염물질의 증가가 가중되는 곳이다. 특히, 최근에는 자동차 배기가스 중에 많이 포함되어 있는 중금속, 다환방향족 탄화수소류(PAHs; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) 등이 건강에 큰 피해를 줄 수 있는 것으로 보고되고 있어서 이에 대한 주의가 요구된다. 이러한 대기환경은 좁은 공간 내에서 직접적으로 대기오염물질에 노출되는 고속도로 요금소의 부스 근무자의 건강에 큰 영향을 미칠 것으로 추정된다. 그러나, 아직까지 일반 근로자와는 달리 이들의 근무환경 특성에 따른 작업환경과 건강영향에 대한 연구가 미비한 실정이며, 특히 외부의 자동차 배기가스가 부스 내부로 유입될 경우 근무자의 인체에 심각한 영향을 초래할 우려가 있어, 요금소에서 자동차 배출가스에 대한 오염 방지대책 수립이 요구된다.

본 연구에서는 요금소 부스 근무자의 보다 나은 근무 환경 개선방안을 제시하기 위하여, 실시간 교통량을 이용하여 고속도로 요금소의 대기오염도를 예측하고, 부스 내부의 공기오염도를 저감 할 수 있는 공조관리 시스템 개발을 개발하였다. 고속도로 요금소에서 교통량에 따른 '대기오염도 예측 및 공조관리 시스템'을 개발하여 교통량과 교통흐름에 따른 대기오염도의 예측을 체계화하고, 근무자의 근무환경관리의 자동화를 구현함으로써 관리방안의 신속성, 정확성 및 근무효율 증대를 도모하고자 하였다.

## II. 연구방법 및 내용

대상으로 한 한국도로공사 서울영업소는 성남시 궁내동에 위치하고 있고, 국내 고속도로 요금소 중 가장 규모가 큰 요금소로서 상·하행선 포함하여 총 32개 차선, 40개 부스가 설치되어 있다. 요금소 및 그 주변지역의 대기환경의 측정 결과를 분석하여 현재 가장 문제시되고 있고, 자동차에 의한 대기오염물질의 정도를 가장 잘 반영하고 있는 오염물질을 채택하여 관리 시스템에 반영하였다. 요금소 주변의 대기오염도 측정결과, 이산화질소(NO<sub>2</sub>)와 총부유먼지(TSP)가 문제시되는 자동차 오염물질로 분석되었다<sup>1)</sup>. 따라서, 서울 영업소를 대상으로 교통량에 따른 NO<sub>2</sub>와 TSP의 배출량을 산정하고, 대기오염확산모델을 이용하여 요금소 주변지역의 NO<sub>2</sub>와 TSP의 농도를 예측하고, 요금소 부스 내·외부의 전체적인 대기오염상태를 예측하였다. 이로써 서울영업소의 실시간 교통흐름 특성과 기상 등의 주변상황을 고려하여 전체 교통량에 따른 대기오염도의 예측이 관리기준치 이상이 되었을 때, 이를 공조시스템과 연결하여 오염도를 낮출 수 있는 공조관리 시스템(APACS : Air-pollution Prediction and Air-Conditioning System of highway tollgate booth)을 개발하였다.

## III. 대기오염 예측

### 1. 대기오염 예측모델의 개요

본 시스템 개발에서는 UNAMAP(User's Network for Applied Modelling of Air Pollution)에서 제공하고 있는 모델 중에서 선오염원에 의한

확산을 예측하기 위하여 이용되고 있는 CALINE3 개념을 위주로 하고, 부분적으로 현장조사 실측치와 비교·평가하여, 우리 나라 여건에 맞는 고속도로 주변지역에서의 영향을 평가하는 모델을 수정·개발하였다.

CALINE3는 가우시안 확산식(gaussian diffusion equation)에 근거하고, 도로상의 오염확산을 예측하기 위해 혼합층(mixing zone) 개념을 채택하여 좁은 미시규모지역(micro-scale region)에서 교통시설로 인한 대기오염물질이 인근 지역에 미치는 영향을 평가하는 모델이다<sup>4)</sup>. 모델에 사용되는 입력자료 형태는 크게 교통량, 배출계수, 오염원 높이 등의 배출강도(source strength), 풍향, 풍속, 대기안정도, 혼합고 등의 기상(meteorology) 부분, 기타 도로형태(평탄, 성토, 교량, 절토), 지형특성(site characteristics)에 따른 표면거칠기(roughness) 등의 자료를 이용하여 주로 좁은 미시규모지역에서 인근의 교통시설로 인한 대기질 영향을 예측한다.

## 2. 배출량 산정

### 1) 교통량 산정

교통량은 배출량을 계산하는 기본자료로서 시간대별·차종별 교통량을 파악하여 자동차에 의한 대기오염물질의 배출량을 계산하는데 사용된다. 따라서, 배출량을 산정하기 위해서는 교통량을 실측해야 한다. 실제 모델의 운영시에는 통행차량의 수를 차량카드 리더기에서 산입 하도록 되어 있으나, 모델을 개발에서는 기존의 자료를 이용하여 교통량을 산정 하였다. 한국도로공사 고속도로 교통량조사(1987~1996년) 자료 중 1992년 경부고속도로 8차선 확장 이후 최근 4년간의 '시간대별 교통량 변화(매년 10월 중순 목, 금)', '구간별·요일별 월평균 교통량(A.D.T)의 변화'의 자료를 이용하였다. 모델에서 필요로 하는 차종의 분류(7종)와 현재 한국도로공사에서 분류하는 차종(5종)의 집계방식의 차이로 인하여, 1997년 10월(목)의 시간대별·차종별 일교통량을 추정된 후, 연평균 일교통량(Annual Average Daily Traffic ; A.A.D.T.)을 식(1)과 같이 산정 한다<sup>5,6)</sup>.

$$A.A.D.T. = \frac{\text{Oct. (Thu.) Traffic}}{(\text{Thu. Daily factor} \times \text{Oct. Monthly factor})} \quad [v/hr(1)]$$

측정 해당월·요일의 가중치를 적용하여 식(2)와 같이 측정 당일의 일교통량(Average Daily

Traffic ; A.D.T.)을 산정 한다.

$$A.D.T. = A.A.D.T. \times D \cdot F \times M \cdot F \quad [v/hr] \quad (2)$$

여기서,  $D \cdot F$  : Daily factor

$M \cdot F$  : Monthly factor

차종별 일교통량이 산정 되면, 차종비를 계산하여 실제 집계되는 총교통량에서 차종별 교통량을 산정 한다.

### 2) 배출량 산정

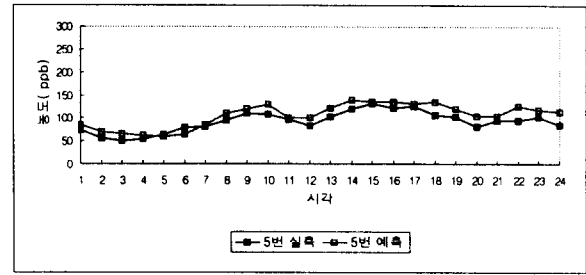
자동차로부터 배출되는 오염물질 양은 자동차의 종류, 사용연료, 누적주행거리, 주행속도 등에 좌우된다. 그러므로 자동차로부터 배출되는 오염물질 배출량을 산출하기 위한 원단위 오염물질 배출계수는 차종에 따라 사용연료, 규제기준 등을 고려하여 산정 하여야 한다.

본 연구에서는 국립환경연구원 자동차공해연구소의 자료를 이용하여 NOx의 배출량을 산정 하였다. 요금소 주변에서는 속도가 저감되므로, 1990년 서울시 평균 주행속도인 21.9 km/hr에 대한 값을 이용하였다<sup>2),3)</sup>. 또한, 산정한 NOx 배출량 중에서 NO<sub>2</sub> 배출량은 고속도로 요금소에서 자동측정기로 실측한 자료를 이용하여, NOx의 38.4 %로 하여 계산하였다.

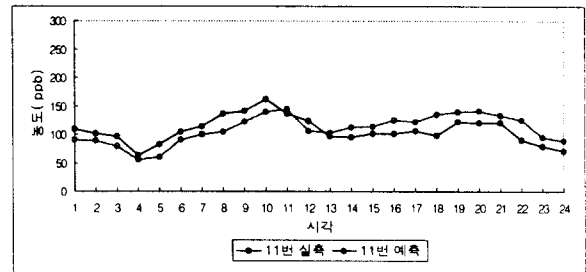
차종의 구분은 승용차, 버스(소형:12인승 이하, 보통:17인승 이상), 트럭(소형:1톤 이하, 중형:1~8톤, 대형:8톤 이상)으로 구분 하였으며, 승용차의 경우 모두 무연휘발유를 사용하는 1989년 이후 모델로 가정하였다. 또한, 버스 내부 TSP 농도는 4계절의 NO<sub>2</sub>와 TSP 농도 자료를 이용하여 상관식을 이용하여 계산하였다. 대형차량이 통과하는 버스의 경우는  $Y_{TSP} = 9.11 \cdot X_{NO_2}$ , 중·소형 차량이 통과하는 버스의 경우는  $Y_{TSP} = 4.20 \cdot X_{NO_2}$ 로 계산하였다.

### 3. 예측모델의 정합도 평가

개발한 APACS를 통한 예측모델의 NO<sub>2</sub> 농도의 정합도를 평가하기 위하여 1997년의 사례에 적용하여 예측 성능을 검증하였다. '대기오염 측정자료'와 '교통량 자료', '기상자료'를 이용하여 개발한 모델을 기초로 4월 24일과 11월 6일의 5번과 11번 버스의 외부 NO<sub>2</sub> 농도 모델 출력결과를 비교하였

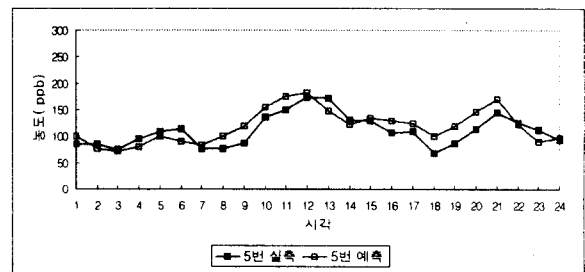


(a) 5번 버스

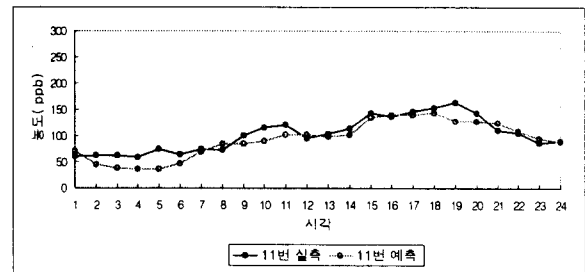


(b) 11번 버스

<Fig. 3> 모델 예측치와 실측치의 시간대별 농도변화(1997. 4. 24.)



(a) 5번 버스

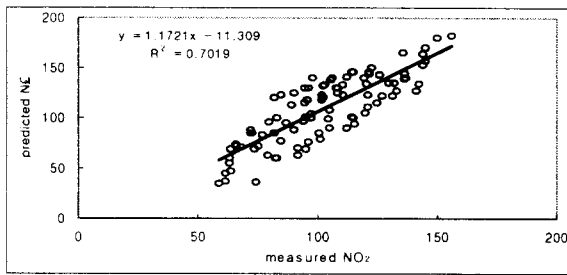


(b) 11번 버스

<Fig. 4> 모델 예측치와 실측치의 시간대별 농도변화(1997. 11. 6.)

다. <Fig. 3> ~ <Fig. 4>는 이러한 방식으로 출력된 결과로서 실측치를 함께 나타낸 것이다. 출력결과를 살펴보면 예측치는 실측치와 아주 유사하게 하루 중 교통량의 변화에 따라 NO<sub>2</sub> 농도가 변화함을 알 수 있었다. 또한, 모델의 예측능력을 평가하기 위하여 x축을 예측치, y축을 실측치로 하여

상호 관계를 <Fig. 5>에 나타내었다. 상관계수  $R^2 = 0.7019$ 로 양호한 상관관계를 나타내고 있다.



<Fig. 5> 실측치와 예측치와의 비교

#### 4. 부스별 대기오염도 예측

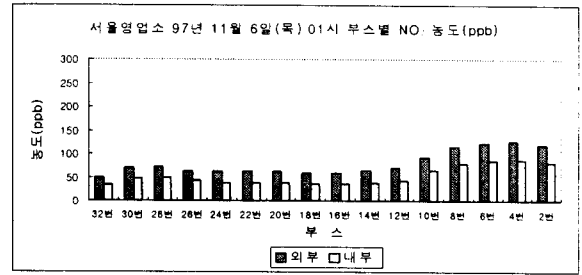
개발된 모델을 이용하여 1997년 11월 6일의 각 부스별, 시간대별 부스의 외부 대기오염도를 예측하였다. 부스의 내부 농도는 1년 동안의 부스 내부와 외부의 실측자료의 98% 유의자료를 이용하여 산정하였다. 부스 내부농도는 소형차량인 경우 외부농도의 약 60.8%, 대형차량인 경우 약 68.7% 수준으로 나타났다. 시간대별 농도변화를 살펴보면, 아침 출근시간대는 하행선 부스에서 오염도가 높게 나타났으며, 퇴근시간대는 상행선의 부스에서 오염도가 높게 나타났다. 이는 교통량에 따른 오염도의 변화를 잘 반영하고 있다고 사료된다.

또한, 교통량이 증가하는 시간대에는 자동차에서 배출되는 오염물질의 절대적인 증가로 인하여 부스 외부 오염도가 높게 나타남에 따라 부스 내부 농도도 증가함을 알 수 있다. 따라서, 기존의 부스 내에서의 공조시스템은 오염물질의 유입을 저감하기 위한 장치가 장착되어 있지만, 근무자의 건강보호와 쾌적한 근무환경을 위한 최고 80ppb(일반 대기환경 연평균 기준)을 만족하기 위해서는 추가의 보완 장치가 필요하다고 사료된다.

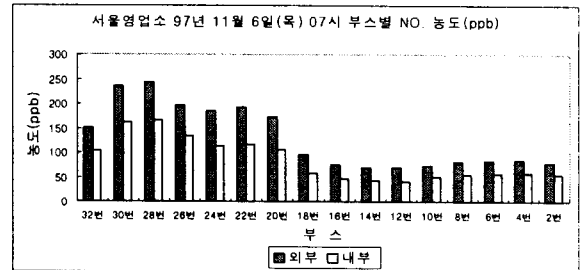
### IV. 시스템의 구성 및 체계

#### 1. 시스템의 개요

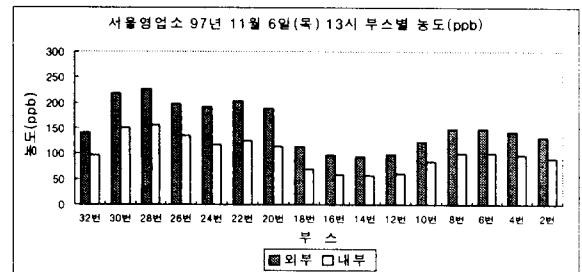
APACS는 교통량 자료 및 기상자료와 기타 근무현황에 필요한 자료를 입력받아 이를 처리하고 저장한다. 또한 실시간으로 자료를 입력받아 현재의 대기오염농도와 공조관리 시스템이 자동으로 운영되고, 관리자의 근무현황을 일괄적으로 파악할 수 있도록 구성되어 있다.



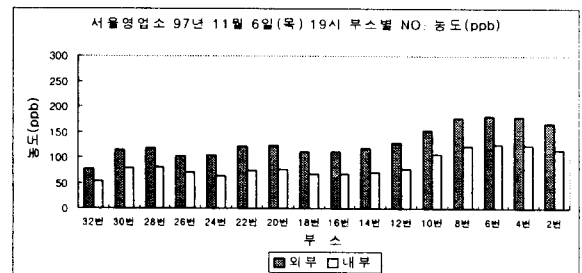
(a) 01:00



(b) 06:00



(c) 13:00



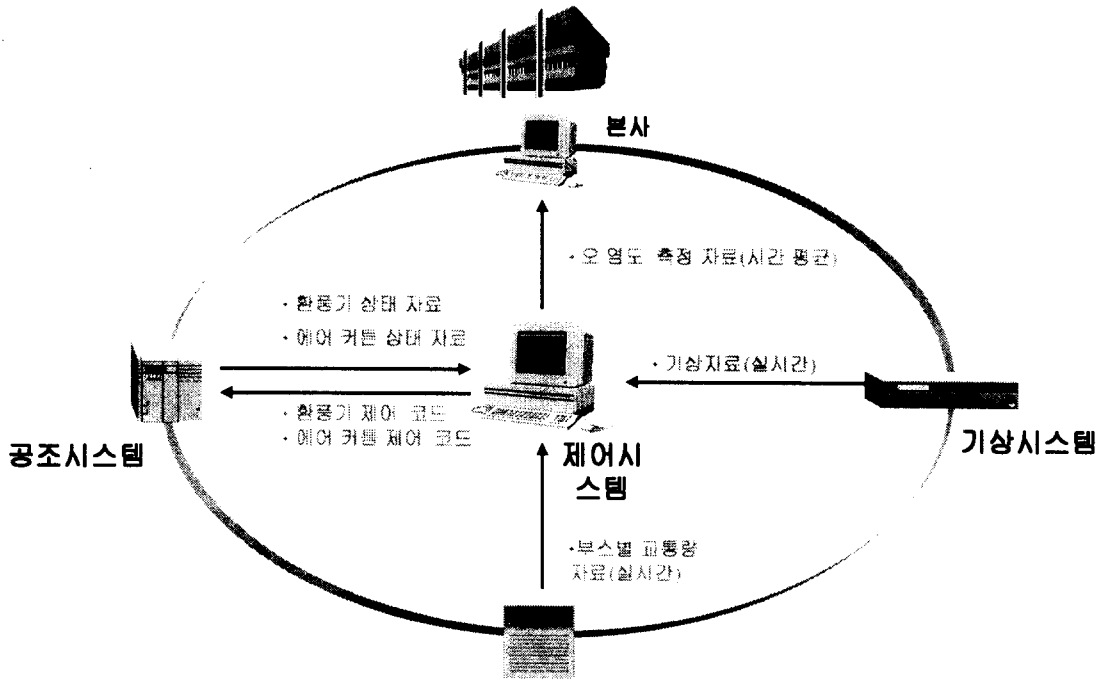
(d) 19:00

<Fig. 6> 각 부스별 시간대별 부스 내부, 외부 농도

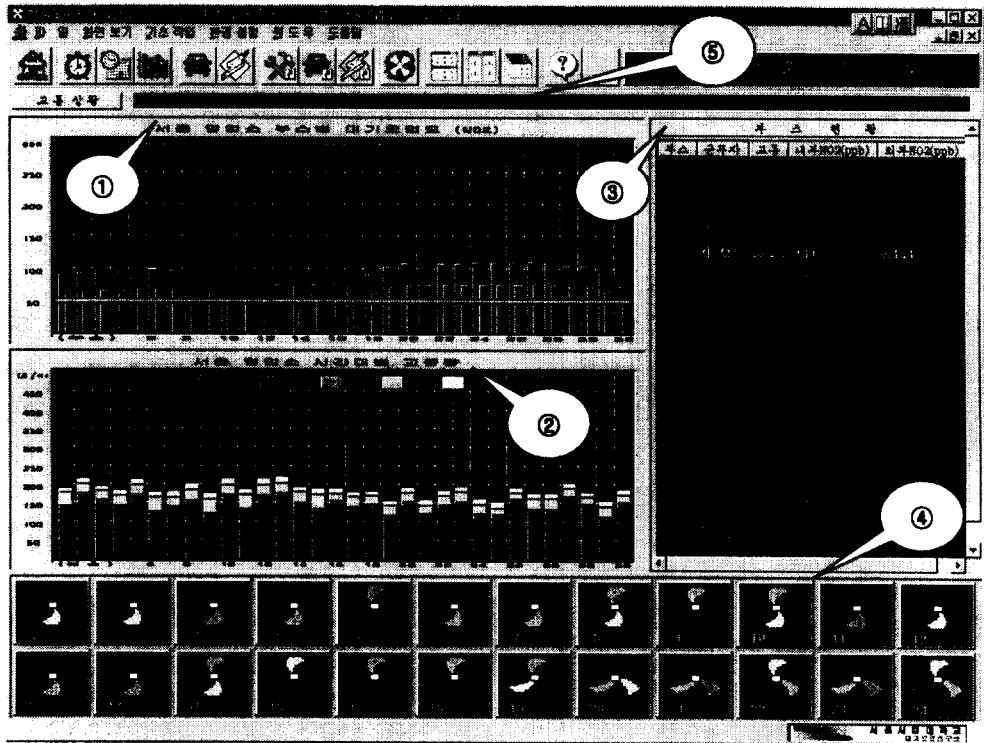
#### 2. 시스템의 정의 및 구성

APACS 각 시스템은 다음과 같이 크게 4개의 부분으로 정의 및 구성된다.

① 교통량 처리 시스템 ; 서울영업소의 온라인으로 집계(RS-232방식)되고 있는 현재의 시스템으로부터 교통량을 인터페이스(interface)하여 집계방식대로 교통량을 집계하고 그래픽화하여 전체적인 교통량을 정확히 파악하도록 한다. 또한 현재의 교통량을 이용하여 자동차 배출오염물질의 배출량을



<Fig. 7> 시스템의 구성 및 자료의 흐름도



<Fig. 8> APACS(Air-pollution Prediction and Air-Conditioning System of highway tollgate booth)의 주화면

산정하여 모델의 교통량에 따른 오염물질 배출량으로 전환해 준다.

② 기상자료 처리 시스템 ; 대기오염도와 밀접한 기상자료를 외부의 기상장비의 각 센서로부터 자

료를 전송받아 기상현황(풍향, 풍속, 온도, 습도, 기압, 일사량, 대기안정도)을 제공하고, 모델의 기상자료 입력 data를 제공한다.

③ 모델의 실행 및 부스별 오염도 예측 ; 교통

량, 기상자료, 기타 도로형태와 지형적인 자료를 입력 받아 모델의 input data file을 생성하고, 모델을 실행한다. 또한, output data file을 읽고 각 부스별 오염농도를 출력하고, 그래픽화한다.

④ 공조관리 시스템의 운영 ; 각 부스별 내부와 외부농도가 산정되면 오염정도에 따라 내부의 대기 오염도를 감소 시키기 위한 공조시스템을 운영한다. 또한, 현재의 오염정도와 교통량에 따라 환기 시스템의 가동 지속 시간을 결정하여 운영한다.

⑤ 기타 근무현황 관리 시스템 ; 부스 운영여부 및 근무자의 근무 현황과 운영자료를 축적하며, 이를 자료로 입·출력할 수 있다.

### 3. 시스템의 기능과 주요화면

APACS의 자료 획득 프로그램은 사용자의 편의성을 고려하여 윈도우 환경에서 개발하였다. 이 프로그램은 Microsoft사의 Visual Basic(Ver 5.0)을 이용하였다.

APACS의 주화면으로 교통량에 따른 대기오염도를 예측하고, 공조시스템의 가동을 보여주는 화면이다. 현재시간의 부스별 대기오염도 Graph화면(①)에서는 부스별 내부와 외부의 예측치를 실시간으로 나타낸다. 교통량 Graph화면(②)은 차량카드 리더기에서 읽어들이는 교통량을 실시간으로 나타낸다. 부스현황은 Graph상(③)으로 나타낸 값을 수치로서 나타내고, 현재 각 부스의 개폐 유무와 근무자를 나타낸다. 공조기 제어화면(④)은 부스 내부의 대기오염도에 따른 공조기가 자동으로 제어되는 상태를 보여주며, 바람개비의 개수는 공조기에 공급되는 환기량의 정도를 나타내는 것으로 공조기가 가동되면 부스 내부의 대기오염도가 감소된다. 교통상황(⑤)은 한국도로공사 교통종합상황실에서 제공하는 교통정보 전광판의 내용이 나타난다.

## V. 기대효과 및 활용방안

APACS(Air-pollution Prediction and Air-Conditioning System of highway tollgate

booth)를 서울영업소에 적용하기 위해서는 대기오염을 예측하는 필요한 부수적인 장비의 설치가 부수적으로 뒤따라야 하며, 또한, 공조시스템의 개선 및 공조기의 제어판을 추가로 설치할 필요가 있다. 이러한 제반 사항이 서울영업소에서 이루어지고 APACS가 적용된다면 요금소 주변과 부스 내부, 외부에서의 교통량에 따른 대기오염도 예측 및 공조관리를 효율적으로 운영관리 할 수 있다고 사료된다.

따라서 교통량에 따른 '대기오염도 예측 및 공조관리 시스템'을 개발·적용함으로써 교통량과 기상 변화에 따른 대기오염도의 예측을 체계화, 근무자의 근무환경관리의 자동화 및 정보 공유, 관리방안의 신속성, 정확성 및 근무효율 증대, 요금소 근무자의 건강을 보호하고, 쾌적한 근무환경 조성 등의 효과가 기대된다.

### 참고문헌

1. 김신도, 박성규, 김종호, 강혜진, 이의상(1999), "고속도로 요금소 주변의 대기오염 현황에 관한 연구", 공기조화·냉동공학, 제 11 권 제 3 호, p.359~368.
2. 조강래 등(1989), "도시지역 대기질 개선에 관한 연구(I)", 국립환경연구원보, vol 11, p.53~64.
3. 조강래 등(1993), "자동차에 의한 오염물질 배출 계수 및 배출량 산출에 관한 연구", 한국대기보전학회지, 제 9 권 제 1 호, p.69~77.
4. State of California Department of Transportation Division of Construction Transportation Laboratory(1979), "CALINE3 : A versatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highway and arterial streets", California.
5. Adolf D. May(1997), "Traffic flow fundamentals", Prentice Hall, p.54~82.
6. William R., Mc Shane and R.P. Roess(1997), "Traffic Engineering", Prentice Hall, p.48~69.