

## 차량터널 오염물질 농도 예측 시뮬레이션 모델 연구

이 창 우, 양 원 철, 이 송 회

동아대학교 공과대학 자원공학과

### 1. 서 론

최근 급격히 장대화하고 있는 차량 터널의 효율적 건설 및 운영을 위하여 관련 기본 요소 기술중 특히 국내 기술 수준이 낙후한 분야 중의 하나인 환기 시스템 설계 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 외국의 경우에 비하여 상대적으로 늦긴 했으나 1990년 환경처가 지하 공간 환경 기준 권고치를 설정 발표함으로써 보사부의 공중 위생법, 건설부의 도로법, 노동부 고시 등에 의한 관리 대상이던 터널 내 오염 물질도 직접적인 규제 대상이 되었다.

현재까지의 국내 장대 터널 환기 시스템 설계는 기상 조건, 교통 특성, 규제농도등이 다른 외국의 특히 PIARC (국제 상설 도로 협회, Permanent International Road Congress)과 일본의 도로 협회 및 도로 공단 설계 지침에 따라 시행되어 왔으며 극히 일부나마 환기 시뮬레이션 모델을 적용하기도 하였다. 따라서 국내 상황에 적합한 환기 시스템 결정에는 경제적 및 기술적인 많은 문제점이 제기되었으며 이의 해결을 위하여 최근 관련 학회 및 업계에서 연구의 필요성을 인식하고 연구가 시작된 초기 단계에 있다.

본 논문에서는 차량 터널 환기 시스템의 최적 설계 및 운영을 위하여 터널 내에서 규제 대상이 되고 있는 차량 배출 물질의 오염 농도를 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 연구함을 목적으로 한다.

### 2. 기존 환기 시뮬레이션 모델 분석

Table 1에 정리한 바와 같이 차량 터널 환기 시스템 시뮬레이션 관련 기존 모델들은 주로 화재 확산 예측을 통한 비상 대처 방안의 강구 또는 환기 시스템의 최적화를 위한 차량 배기 물질 오염 농도 분포의 예측을 목적으로 하고 있다. 기존의 모델 중 주요 터널 설계에 적용 사례가 있는 미국 연방 도로공사 모델, 벨기에 Louvain대 모델, 이태리 Torino 공대 모델의 주요 개요를 정리하면 Table 2와 같다. 이들 3개 모델 중 국내에 적용된 적이 있는 미국의 소위 TUNVEN 모델을 제외하고는 환기량 계산 방법으로 network 분석 기법을 사용하므로써 터널 각 구간의 환기특성값 특히 환기 저항계수, 충격 손실계수 등에 대한 사전 지식이 필요하며 터널 전구간을 network 형태로 해석할 수 있어야만 하는 문제점을 안고 있다. 따라서 이들 모델은 특정 터널 즉 벨기에 Leopold II 터널과 이태리 Fresno 터널 환기 시스템 설계를 위하여 개발 사용됨으로써 범용화가 어려운 실정이다.

TUNVEN 모델의 경우 1-D 운동 방정식과 이류 확산식을 유한차분법으로 해석하여 준 정상 상태 (quasi steady state)에서의 풍속, CO, NOx, THC의 농도를 예측하는 모델이다. 자연환기, 종류식, 반횡류식, 횡류식등 모든 환기 방법에 적용 가능하나 종류식 이외의 방식에 적용할 경우 모델의 프로그램 자체에 대한 이해와 입력 자료의 구조 변경 없이는 실행이 곤란하다. 더불어 이와 같은 실행상의 문제점 이외에 다음과 같은 문제점도 지적할 수 있다.

- 환기 시설이 있는 구간의 설정 방법에 따라 환기 속도의 추정에 차이가 클 가능성.
- 차종 구성비의 차이에 따른 저항계수 및 등가저항 면적의 변화 무시.

- 터널 내 공기 정체 구간이 존재할 경우 유한 차분법에 의한 환기 속도의 수렴이 이루어지지 않을 가능성.  
 특히 자동차 배출 계수가 1979년도의 TUNVEN 모델 작성시의 수치이며 이 또한 프로그램 내에 data block으로 입력되어져 있으며 국내 차량 배출계수와는 상당한 차이를 보인다.

결론적으로 기존 시뮬레이션 모델의 국내 현장에의 적용은 첫째, 각종 환기 시스템의 특성을 고려할 수 없는 범용화에 문제점이 있으며 둘째, 국내 차량 및 교통 특성을 전혀 고려하지 않은 문제점, 셋째, 터널의 물리적인 특성 특히 자연 환기압에 영향을 미칠 수 있는 변수 처리상의 문제점이 지적된다. 따라서 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 유용한 설계 도구로서의 환기 시스템 시뮬레이션 모델 개발이 필요하다. 특히 터널 환기 관련 변수들에 대한 활발한 기초 연구가 해외에서 추진되고 있으므로 모델의 개량 작업이 지속적으로 요구된다고 할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 모델링

터널 건설 계획 단계에서의 환기 시스템 결정을 위한 모델의 궁극적인 목표는 최적 환기량의 추정이다. 최적 환기량을 터널 내 유해 물질 농도를 규제 농도 이하로 유지 할 수 있는 가장 경제적인 환기량으로 정의할 경우 터널 내에서의 차량 배기물질농도 예측은 필수적인 과제임을 알 수 있다. 최적 환기량 확보를 위한 환기 시스템 선택 목적의 유용한 설계 도구로서의 시뮬레이션 모델은 다음과 같은 특성을 갖추어야 한다.

- 차량 배기물질중 규제 대상인 CO, NOx, smoke, 농도의 예측이 가능하여야 한다.
- 환기 방법에 관계없이 적용 가능하도록 사용자 위주로 범용화 되어져야 한다.

#### 3.1 모델의 기본 개념

시뮬레이션 모델링의 목적이 오염물질 농도 예측을 통한 최적 환기량의 결정에 있으므로 오염물질 배출량 추정이 가장 중요한 변수가 된다. 각 변수들의 결정에 관련되어 있는 변수들을 중심으로 정리하면 다음과 같다.

터널 내 공기 흐름을 가능케 하는 요인별로 환기력을 구분하면 (1) 외부 풍압, 온도, 위치에 너지 차에 의한 열에너지에서 비롯되는 자연 환기력, (2) 차량 통행에 의한 교통 환기력(piston effect), (3) 환기 설비에 의한 기계 환기력으로 나누어진다. 이들 환기력에 의한 터널 내 힘의 평형 관계를 나타내는 운동량 방정식은 다음과 같은 기본 식을 가진다.

$$\text{자연환기력} + \text{기계환기력} + \text{교통환기력} = \text{터널입출구 및 내부 손실합}$$

각각의 환기력에 영향을 미치는 변수들을 정리하면 다음과 같다.

자연환기력 결정 변수:

터널 외부의 풍속, 풍향, 온도, 공기 밀도 및 기압, 터널 내부의 온도, 공기 밀도, 기압, 터널 단면적, 길이 및 입출구 형태

교통 환기력 결정 변수:

교통 밀도, 교통량, 차량 속도, 점적율(blockage ratio), 저항계수, 자동차 전면 투영 면적, 공기 밀도, 터널 내부 풍속, 자동차 형태 및 길이

기계 환기력 결정 변수:

터널 내 풍속, 입배기 port 위치 및 설치 각도, fan의 승압, 배출량, 배출 속도 및 배출구 단면적, 운동량 계수, 터널내 풍속 및 공기 밀도)

터널 내외부 손실력 결정 변수:

입출구 충격 손실 계수, 내부 환기 마찰계수, 터널 길이 및 단면적, 터널 내 풍속, 공기 밀도

### 3.2 오염 물질 배출량

차량 배기 물질 가운데 규제 대상이 되는 물질은 일반적으로 CO와 smoke이며 독성이 강한 NOx를 규제 대상으로 하는 국가 수가 최근 증가하고 있다. 환기 시스템 설계 시에도 이들 물질 농도를 기준으로 하여 환기량을 결정하며 이를 기준으로할 경우 Pb, SO<sub>2</sub> 등과 같은 여타 유해 물질의 농도는 극히 낮아지게 되므로 고려 대상에서 제외하고 있다.

오염 물질의 배출량 추정은 기존 차량의 배출 특성의 이해뿐만 아니라 각국에서 향후 년도 별로 대기 오염 규제 관련 법으로 강화하고 있는 차량 배기물질 배출량 규제에 대한 고려도 동시에 되어져야 한다. 또한 특정 터널에서의 배출량의 년도별 추정을 위하여 매 년도의 자동차 연식의 분포에 대한 고려도 함께 필요하다. 차량별 CO, NOx, smoke의 배출량 추정에 관련된 변수 간의 기본 식을 정리하면 다음과 같다.

$$q = q^{\circ} (f_i + f_v + f_s) f_k f_a \quad (1)$$

$$q = q^{\circ} m_s f_v f_i f_k f_a \quad (2)$$

$q$  : 차량 1대당 배출량                       $f_i$  : 구배 계수  
 $q^{\circ}$  : 기준 배출량                               $f_k$  : 고도계수  
 $f_i$  : 아이들링 계수                             $f_a$  : 년도별 배기량 감소계수  
 $f_v$  : 속도 계수                                  $m_s$  : 자동차 중량

식 (1)은 가솔린 및 디젤 승용차의 CO 배출량, 디젤 승용차의 NOx 및 smoke 배출량 추정에, 식 (2)는 가솔린 승용차의 NOx 배출량, 대형 트럭의 CO, NOx, smoke 배출량 계산에 적용된다.

국내 차량의 오염 물질 배출 계수에 관한 자료는 년도별 차량의 연식 변화를 고려한 국립 환경 연구원 자동차 공해 연구소의 보고서를 기초로 하여 Table 3과 같이 1990년도를 기준 년도로 정리하여 모델에 포함하였다.

### 3.3 농도 분포 계산

터널 내에서는 Reynolds 수가 비교적 크므로 단면상의 풍속이 거의 일정하며 차량 통행으로 인한 심한 와류 현상과 환기 설비 등에 의한 혼합 효과로 인하여 단면상의 오염 물질 농도 변화가 거의 없다. 따라서 일반적으로 입배기구 부근에서의 국부적인 풍속 및 오염 물질 분포 분석의 경우를 제외하고는 1-D 형태로 차량 터널 환기 시스템을 해석하고 있다.

터널 내 각 점에서의 농도 분포는 다음과 같은 정상류 이류 확산식에 연속식을 대입하여 정리한 식을 유한 차분법으로 해석하여 구하도록 하였다.

$$C_{i+1} = \frac{C_i(U_i + U_{i+1} - Q_i \Delta X) + 2 \Delta X S_i}{U_i + U_{i+1} + Q_i \Delta X}$$

$U_i$  : i번째 구간에서의 풍속                       $Q_i$  : i번째 구간으로의 입기량  
 $C_i$  : i번째 구간의 입기중의 농도                 $S_i$  : i번째 구간에서의 차량 배출량  
 $C$  : i번째 구간에서의 터널 내 농도  
 $\Delta X$  : 터널 구간 길이

### 3.4 Flow chart

Fig. 1에서와 같이 모델의 기본 flow는 미연방 도로공사의 TUNVEN 모델에 기초하여 (1)터널 내의 관련 환기력의 계산, (2)이에 기초한 각 구간에서의 환기 속도 계산 (3)농도 계산의 순서를 따른다. jet fan, 집진기, 입배기 port나 터널의 설치시 등과 같은 환기 방식의 경우에는 입력 자료 형태 변경과 jet fan 및 집진기 소요 송압 및 소요 대수 계산을 할 수 있는 routine을 포함하고 있다.

#### 4. 현장 적용성 검토

본 연구에서 개발한 모델을 1995년 하반기에 개통한 총길이 1860m의 황령터널에 적용 검토하였다. 환기 방식으로는 터널 상부의 환기 터널과 연결된 port로부터 유입된 공기가 차량 진행 방향으로 흘러가는 반횡류식 환기 방식을 채택하고 있으며 부산시의 진구와 남구를 연결하는 도심지 터널이다. 터널의 개략적인 특성을 Table 4에 정리하였다. 본 연구에서는 1995년 5월 26일과 7월 21일 사이 총 3회에 걸쳐 기상 및 환기 자료를 측정하였다. 터널 외부 풍향 및 풍속은 TOYO OTA사의 model TEK-3 풍향 풍속계, 터널 내부 풍속은 KANOMAX사의 model 24-6111 anemometer, 기압은 THOMMEN사의 model TP-90 barometer, CO농도는 KANOMAX사의 model 2323 monitor를 사용하여 측정하였다. 한편 본 논문에서는 모델의 적용성 검토를 CO농도에 제한하였으므로 기타 오염 물질에 관한 기술은 생략한다.

##### 4.1 시뮬레이션 결과 비교

시뮬레이션 모델로부터 출력된 추정치와 실측치의 비교는 환기 속도/환기량과 CO농도를 기준으로 하였다. 특히 2회째 측정 시까지 개통을 하지 않은 상태여서 자연환기력만에 의한 환기속도의 측정 비교가 가능하였다. 환기량 측정치와 시뮬레이션 결과를 Table 5와 6에 정리하였으며 차량 운행 시의 터널 내부 CO농도의 경우 터널 내부 위치별로 비교한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 7월 21일 측정 시의 교통량은 차종별로 Table 7에 정리하였으며 환기 속도의 경우 차량 진행 계획 방향과 반대 방향인 경우는 "-"로 표시하였다.

자연 환기 속도는 0.33~1.77m/s로 측정이 되었으며 추정치의 상대오차는 2.0~6.9% 범위를 보인다. 이는 모델 내에서 정량화된 고도, 온도, 기압 차이 및 외부 풍압에 의한 자연 환기압의 관계식의 문제점이라기 보다 이들 변수중 가장 영향력이 큰 외부 풍속의 순간적인 변화에 따른 측정상의 문제로 해석할 수 있다. 차량 통행에 의한 교통 환기 속도는 3.96m/s로 추정치 3.91m/s와 불과 1.1%의 상대 오차를 보인다. 총 환기량 추정치의 상대 오차는 2.9%정도로 비교적 근사함을 보여주고 있다.

CO 농도의 경우 터널 입구로부터 출구 쪽으로 이동할 수록 농도가 증가하며 터널 출구 부근에서는 모델에서 고려하고 있지 않은 난류 확산에 의하여 농도가 점진적으로 낮아짐을 분명하게 보여주고 있다. 이에 반하여 이류 확산만을 고려하는 본 모델에 의한 추정치는 실측치와 추정치의 상대 오차의 최저, 최고, 평균값은 각각 2.2%, 52.3% 13.0%이며 CO농도는 차량 통행으로 인한 와류 형성에 따라 고정점 농도의 경우 Fig. 3서와 같이 변하므로 모델 추정치의 상대오차 13%는 심각한 수준의 차이로 보이지 않는다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 차량 터널 환기 시스템의 최적화를 위한 도구로서의 오염 물질 농도 예측 시뮬레이션 모델의 개발을 목적으로 하였으며 모델은 (1) 환기 방식의 차이를 고려한 범용 모델로 0작성하였으며, (2) 국내 자동차 배출 특성의 년도별 추이를 고려하였다. 모델을 도심지 장대 차량 터널에 적용한 결과 자연 환기 속도의 상대 오차는 2.0~6.9%, 교통환기력은 1.1%, 총환기량은 2.9%의 상대 오차를 보임으로써 추정치가 매우 근접함을 보여 주었다. 한편 터널 내 CO농도 분포 경우 상대 오차는 2.2~52.3%이며 평균 13.0%로 나타났다.

본 연구가 차량 터널의 급속한 장대화에 비추어 중요한 요소 기술인 환기 시스템 설계에 관련된 연구의 활성화의 기초가 되었으면 하는 바램이다.

## 6. 참고 문헌

1. 조강래외 5인, 1993, "자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구," 한국대기보전학회, vol. 9, no. 1, pp. 69-77.
2. Schlang, R.N. and T.J. Carlin, 1979, "Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels," Science Application, Inc., US DOC NTIS PB 80-143803.
3. Kumar, S. and G. Cox, 1985, "Mathematical Modelling of Fires in Road Tunnels," Proceedings of the 5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Lillie, France, pp. B1-61-b1-76.
4. Velde, K.T., 1988, "A Computer Simulation for Longitudinal Ventilation of a Road Tunnel with Incoming and Outgoing Slip Roads," Proceedings of the 6th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Durham, UK, pp. C3-179-C3-201.
5. Nakamura, N., Ohashi, H. and Y. Kato, 1991, "Numerical Simulation of Fire Fume Propagation along the Ceiling of a Down-grade Tunnel," Proceedings of the 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK, pp. 319-336.
6. Jacques, E.J., 1991, "Numerical Simulation of Complex Road Tunnels" Proceedings of the 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK, pp.467-487.
7. Ferro, V., Borchiellini, R. and V. Giaretto, 1991, "Description and Application of a Tunnel Simulation Model," Proceedings of the 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK, pp. 487-512.
8. Casale, E., Charvier, J.M. and G. Lemaire, 1994, "Tunnel Ventilation System Modelling," Proceedings of the 8th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool, UK, pp. 69-81.
9. Bettis, R.J., 1994, "The Use of Physical and Mathematical Modelling to Assess the Hazards of Tunnel Fires," Proceedings of the 8th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool, UK, pp. 439-470.
10. Rhodes, N., 1994, "Review of Tunnel Fire and Smoke Simulations," Proceedings of the 8th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool, UK, pp. 471-486.

Table 1. Vehicle tunnel ventilation simulation models

Developer	Year	Characteristics
Schlang, R.N., et al	1979	fire simulation
Kumar, S., et al	1985	longitudinal ventilation simulation with slip roads
Velde, K.T.	1988	fire simulation with considerations of radiation and illuminance
Kumar, S., et al	1988	fire simulation in a down-grade tunnel
Nakamura, N., et al	1991	ventilation simulation
Jacques, E.J. (Univ. of Catholic Louvain)	1991	ventilation simulation
Ferro, V., et al (Torino Politech)	1991	ventilation simulation
Casale, E., et al	1994	ventilation simulation
Rhodes, N.	1994	fire simulation
Bettis, R.J., et al	1994	fire simulation

Table 2. Comparison of major simulation models

Model	TUNVEN model	University of Catholic Louvain model	Torino Politech model
assumption	1-D quasi-steady state	1-D steady state	1-D steady state
applicable ventilation methods	longitudinal, transverse, semi-transverse	longitudinal	longitudinal, transverse, semi-transverse
calculation method for ventilation quantity	summation of component forces	Hardy-Cross iteration	Graph theory
method for concentration prediction	FDM of advective diffusion	based on exhaust and air quantity in each section	advective diffusion (linear gradient)

Table 3. Prediction of emission rate by vehicle

Oxides of Nitrogen (NOx)  
(g/km)

Vehicle Type		Year						
		'90	'91	'92	'93	'94	'95	2000
Passenger Car		1 (0.80)	0.79	0.68	0.53	0.49	0.50	0.58
Taxi		1 (1.01)	0.94	0.89	0.73	0.75	0.77	0.84
B	Small-Gasoline	1 (1.43)	1	1	1	1	1	1
	Small-Diesel	1 (1.40)	1.01	1.05	1.05	1.06	1.06	1
U	Medium	1 (1.92)	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.74
	Heavy	1 (15.54)	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.74
T R U C K	Small	1 (1.48)	1.01	1.03	1.02	1.01	1.01	0.99
	Medium	1 (1.92)	0.98	0.98	0.94	0.91	0.89	0.74
	Heavy	1 (15.29)	0.99	0.98	0.96	0.94	0.92	0.77
Motor Cycle		1 (0.11)	1	1	1	1	1	1

Particulate  
(g/km)

Vehicle Type		Year						
		'90	'91	'92	'93	'94	'95	2000
Passenger Car		1 (0.01)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
Taxi		1 (0.00)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BUS	Small-Gasoline	1 (0.00)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Small-Diesel	1 (0.37)	1.00	1.00	1.00	0.97	0.97	0.89
	Medium	1 (0.76)	0.99	0.99	0.96	0.92	0.89	0.80
	Heavy	1 (2.39)	0.99	0.97	0.95	0.91	0.88	0.79
TRUCK	Small	1 (0.42)	0.98	0.98	0.93	0.90	0.90	0.86
	Medium	1 (0.76)	0.99	0.99	0.96	0.92	0.89	0.80
	Heavy	1 (2.52)	0.98	0.97	0.93	0.89	0.86	0.77
Motor Cycle		1 (0.01)	1	1	1	1	1	0.00

Carbonmonoxide (CO)  
(g/km)

Vehicle Type		Year						
		'90	'91	'92	'93	'94	'95	2000
Passenger Car		1 (11.89)	0.73	0.58	0.38	0.27	0.23	0.21
Taxi		1 (6.76)	1.00	0.98	0.72	0.78	0.83	0.97
BUS	Small-Gasoline	1 (6.21)	1	1	1	1	1	1
	Small-Diesel	1 (1.54)	1	1.01	1.02	1.04	1.05	0.68
	Medium	1 (2.43)	0.98	0.97	0.95	0.95	0.94	0.62
	Heavy	1 (17.21)	0.94	0.89	0.87	0.84	0.81	0.52
TRUCK	Small	1 (1.96)	0.99	0.99	0.98	1.00	1.02	0.75
	Medium	1 (2.43)	0.98	0.97	0.95	0.95	0.94	0.62
	Heavy	1 (18.59)	0.97	0.94	0.92	0.90	0.89	0.59
Motor Cycle		1 (13.00)	1	1	0.96	0.92	0.87	0.66

note : The values in parentheses are absolute emission rates

Table 4. Tunnel characteristic

Hwang-ryong tunnel	
Length	1850 m
Cross-sectional area	73.5 m <sup>2</sup>
Perimeter	34.0 m
Altitude change	44.0 m
Wind velocity	-0.58 ~ 0.77 m/s
entrance exit	-0.7 ~ 5.5 m/s
Ventilation method	Semi-transverse
Traffic method	one-way

note: "-" sign in velocity means wind blowing against the traffic direction.

Table 5. Comparison of natural velocity

date	natural velocity (m/s)		ventilation quantity (m <sup>3</sup> /s)	
	simulated	calculated	simulated	calculated
May 26, 1995	- 0.32	- 0.34	23.69	24.90
May 29, 1995	0.95	0.94	70.17	68.82
July 21, 1995	1.65	1.77	12.124	130.21

Table 6. Comparison of traffic-induced velocity and total ventilation quantity

date	traffic-induced velocity (m/s)		total ventilation quantity (m <sup>3</sup> /s)	
	simulated	calculated	simulated	calculated
July 21, 1995	3.91	3.96	408.79	420.94

Table 7. Average traffic volume (July 21, 1995)

vehicle type	passenger car	taxi	small bus	large bus	small truck	heavy truck	total
traffic volume (veh/hr)	438.6	123.6	22.8	90.0	111.6	7.8	794.4



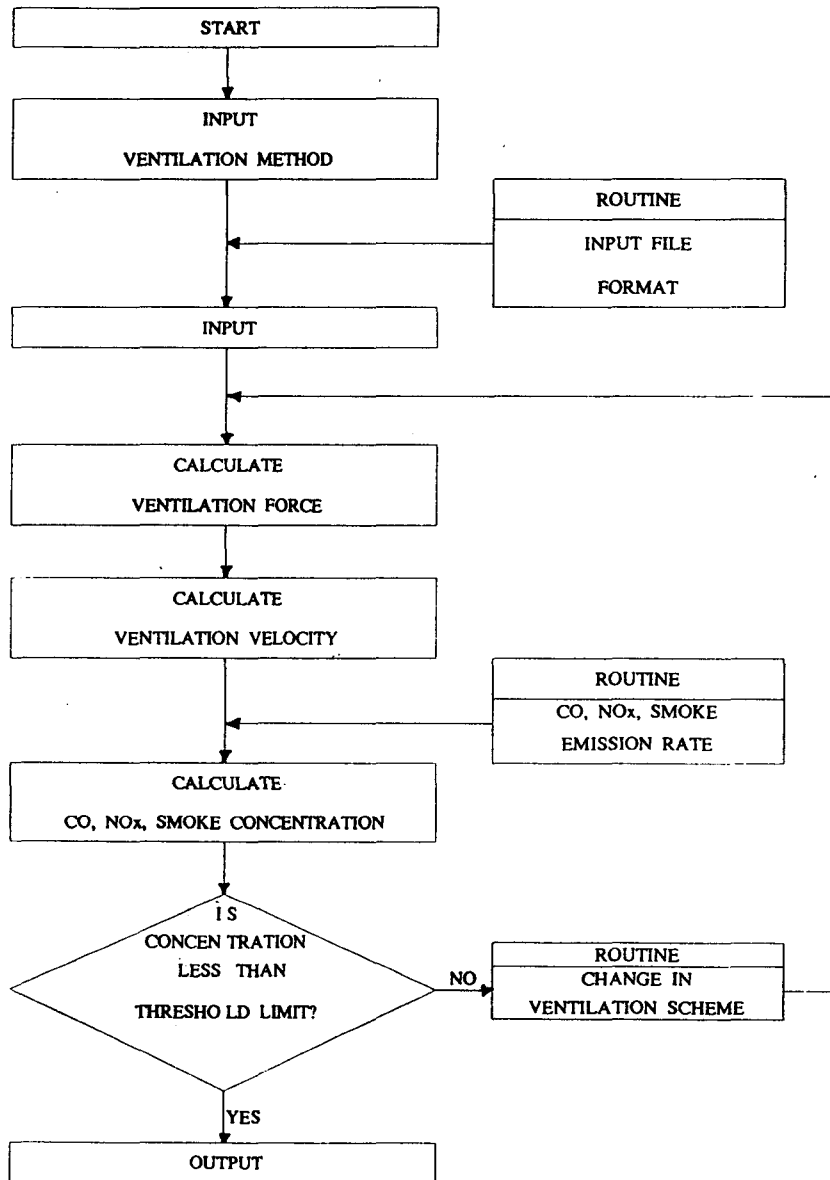


Fig 1. Flow chart

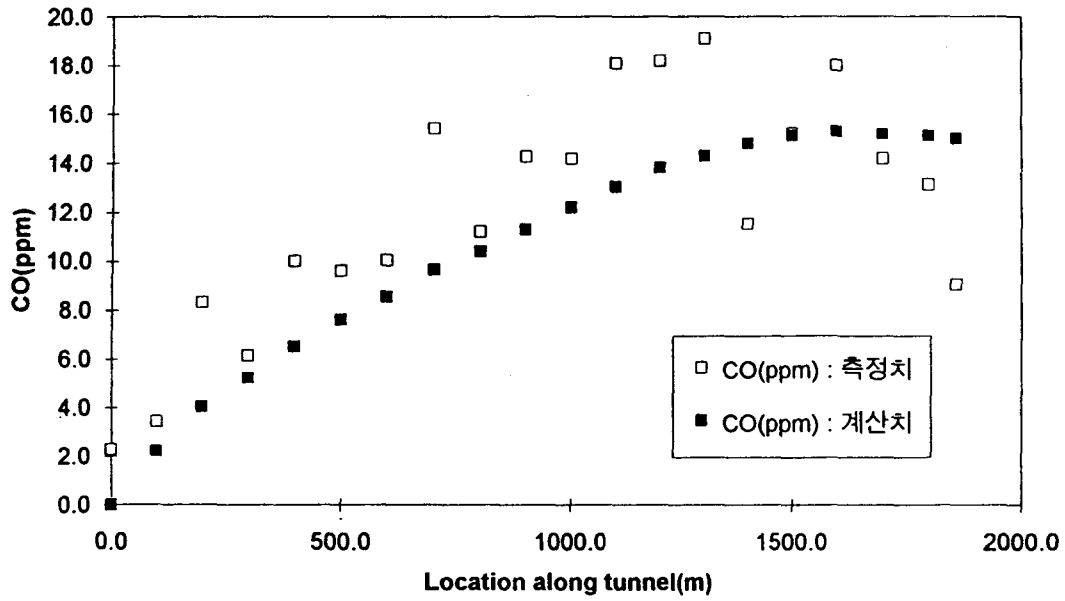


Fig 2. Comparison of CO concentrations along tunnel

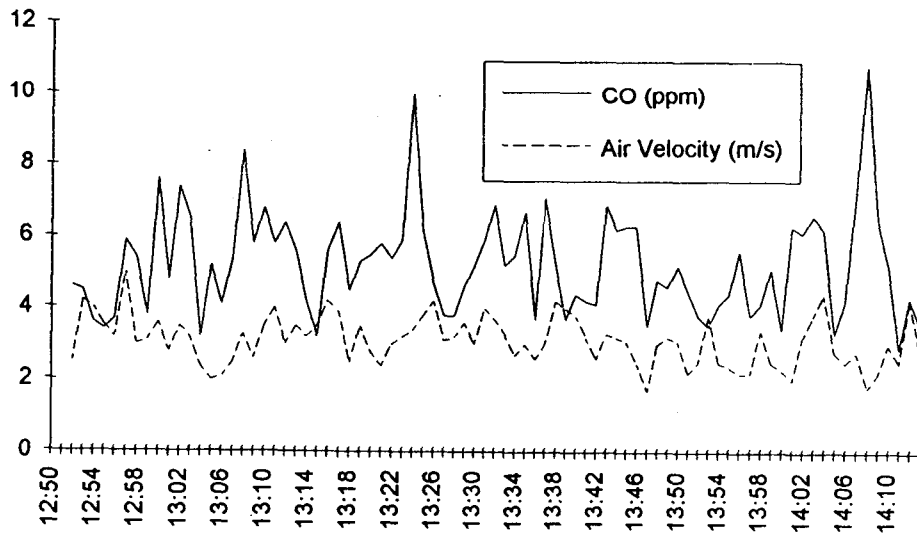


Fig 3. Temporal variation of CO concentration and air velocity at a fixed location