

## TUNVEN 모형의 검증 및 보정

정장표 · 윤삼석 · 이승묵\*

경성대학교 건설 · 환경공학부  
\*이화여자대학교 환경공학과

(2000년 1월 14일 접수, 2000년 2월 25일 채택)

## Validation and Calibration of TUNVEN Model

Jang-Pyo Cheong · Sam-Seok Yoon · Seung-Muk Yi\*

*Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyung Sung University*

\* *Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*

### ABSTRACT

In this study, the possibility of application of TUNVEN model was investigated through the validation and calibration processes. In order to validate and calibrate the TUNVEN model developed in USA to obtain prediction of the quasi-steady state longitudinal air velocities and the pollutants concentrations by solving the coupled one-dimensional steady state tunnel aerodynamic and advection equations.

The major input parameters such as the concentration data for CO and NO<sub>x</sub>, meteorological data and traffic volume in Hawngryung tunnel were measured. Prior to preparing the input parameters, the sensitivity analysis was conducted to identify the input parameters which need to be most accurately estimated in TUNVEN program. In order to establish the relationships between the model values and the measured values, the linear regression analysis was applied. In linear regression analysis, the model values were taken as independent parameter(X) and the measured values were taken as dependent parameter(Y) for four cases of data set. From the results of linear regression analysis, the correlation coefficient(r) for four cases were calculated more than 0.91 and the values of slope and interception were analyzed as 0.5~2.2 and 0.01~2.3 respectively. From the above results, we concluded that the suitability of TUNVEN model was identified in prediction the longitudinal pollutant concentrations in tunnel.

## 요약문

본 연구에서는 터널 오염도 예측과 환기시설 설계에 사용되는 TUNVEN 모형의 적용성을 검토하기 위하여, 부산시 남구 대연동 소재 황령산 터널을 대상으로 하여 TUNVEN의 주요 입력자료에 해당되는 터널내 오염농도(CO, NO<sub>x</sub>), 풍속, 온도, 상대습도 등을 실측하였다. 그리고 그 실측 결과를 토대로 TUNVEN 모형의 검증(validation) 및 보정(calibration)을 행하였다. 또 검정 및 보정 결과를 분석하여 향후 우리나라에서 터널내의 오염도 예측 및 적정 환기시설 설계시 TUNVEN 모형의 적용가능성에 대해 평가하였다. 본 연구에 의해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다. 총 4차에 걸쳐 터널 길이방향에 대한 CO 및 NO<sub>x</sub> 농도의 실측치와 모형치를 이용하여 단순회귀분석을 행한 결과, CO 및 NO<sub>x</sub>에 대한 상관계수가 모두 0.91 이상, 기울기 및 절편이 0.5~2.2, 0.01~2.3의 값을 나타내었다. 그리고 터널 길이방향으로 진행할수록 CO와 NO<sub>x</sub>의 실측치 및 모형치가 같이 증가되는 동일한 경향을 보이고 있는 점을 고려할 때 터널 오염도 예측에 있어서 TUNVEN 모형의 적용가능성은 매우 높은 것으로 나타났다.

주제어 : TUNVEN 모형, 터널 오염도, 검정, 보정, 민감도

## 1. 서론

경제성장과 더불어 자동차산업의 발달로 자동차가 기하급수적으로 증가하고 있는 반면, 도로의 확충은 자동차의 증가에 미치지 못하고 있는 실정이다. 토지 이용도가 높은 도시지역의 경우 한정된 도시 구역내에서의 원활한 교통소통을 위하여 터널 건설이 필수적이며, 특히 도로터널 중에서도 길이 1,000 m 이상의 장대터널들에 대한 수요가 크게 증가하고 있다.<sup>1)</sup>

부산광역시에서도 황령산 제3터널(2,147 m), 황령산 제4터널(3,300 m), 승학 터널(3,350 m), 산성 터널(4,540 m), 장산 제2터널(3,520 m) 등 12개의 장대터널들이 향후 계속 건설될 예정이다.<sup>2)</sup> 그러나 이러한 도로터널의 건설은 차량의 고속주행으로 인한 소음·진동문제, 지하수 배수문제, 교통사고 처리문제 등 해결해야 할 여러 가지 문제를 안고 있으며, 가장 중요한 문제 중 하나는 자동차 배기가스에 의한 터널내 오염농도를 감소시키기 위한 환기처리 계획이다.

터널은 옥외 대기 환경에 비해 오염물질의 확산이 제한되며 자동차 통행량 증가에 따라 오염물질 배출량이 증가하게 되므로 이로 인한 시정장애 및 불쾌감을 초래하며, 특히 터널내 교통체증시에는 장시간 노출로 인한 인체 건강상의 문제들을 야기시키고 있는

실정이나, 국내에서는 도로터널의 환기시스템에 대한 연구실적이 거의 없는 실정이다.<sup>3-5)</sup> 그러므로 터널내 쾌적한 환경조건을 조성하기 위해서는 무엇보다도 우리나라의 지형, 기상조건, 자동차의 특성, 도로의 성격, 터널의 규모, 터널내의 교통조건, 터널의 입지조건 등 개개의 터널실정에 따라 검토하여 적합한 환기설계기준과 최적설계기법의 확립이 시급히 요청되고 있다.

따라서 본 연구에서는 터널내의 오염도를 정확히 예측하고, 그 결과를 토대로 적정 대기질을 유지하기 위한 환기량산정을 목적으로 개발된 TUNVEN (TUNnel VENTilation)에 대하여 실측자료(오염도, 기상요소)를 토대로, 본 모형의 검정 및 보정을 행하였고, 그 결과를 분석하여 향후 우리나라에서 터널내의 오염도 예측 및 환기시설 설계시 TUNVEN 모형의 적용가능성을 살펴보았다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1. TUNVEN 모형

TUNVEN 모형은 미국에서 1974년부터 수행되어 진 터널 인근지역 및 터널내의 대기질 관리에 관한

연구의 일부분으로 개발되었다. TUNVEN 모형은 1개의 주프로그램과 8개의 부프로그램으로 구성되어 있으며, 터널길이 방향의 오염물질 농도분포 및 유동 특성(속도)을 산정할 수 있다. TUNVEN모형은 일차원(터널길이 방향) 정상상태에서 터널내의 공기동역학 방정식과 농도확산(이류) 방정식을 연계하여 수치해석적 방법(유한차분법)으로 터널내 오염물질의 농도 및 속도 등을 산정한다. 이때 터널내의 공기유동특성을 지배하는 공기동역학 방정식에는 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 등이 이용되며, 오염물질의 농도를 산정하기 위한 이류 방정식에는 분자확산항, 이류에 의한 확산항 및 차량 배기가스 및 환기에 관련된 오염원항 등이 포함되어있다. 공기동역학 방정식과 이류 방정식을 연계시켜 수치해석적으로 풀 때, 터널내의 공기는 이상기체 방정식을 만족하는 이상기체로서 비압축성 유체로 가정하며, 터널내의 공기유동은 준정상상태(quasi-steady state)에서 터널길이방향의 일차원 유동을 하는 것으로 가정한다.<sup>6-8)</sup>

TUNVEN 프로그램의 입력자료는 Table 1에 정리된 바와 같이 터널의 물리적 성질에 관한 자료, 구간 자료, 교통 및 기타자료 등 크게 3가지로 구분된다.<sup>9)</sup>

### 2.2. 공기동역학 방정식

TUNVEN모형에서는 터널내의 공기유동 특성을 파악하기 위하여 이상기체 방정식, 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식이 이용되는데, 터널내의 미소체적(control volume)에 대해, 질량보존법칙을 적용

시키면 식 (1)의 결과를 얻을 수 있다. TUNVEN 모형의 주요 가정 중 하나가 터널내의 공기가 비압축성 유체로 간주하기 때문에 흐름속도와 관계된 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\frac{d(\rho u)}{dx} = \frac{(\rho_i q_i) - (\rho_e q_e)}{A} \quad (1)$$

$$U(X2) = U(X1) + \frac{1}{A} \int_{X1}^{X2} (q_i - q_e) dX \quad (2)$$

TUNVEN 모형에서는 전체터널길이를 다수의 구간(section)으로 분할하여 그 해를 구하기 때문에, 구간 분할 수가 n일 경우 터널입구와 터널출구 사이의 속도 변화관계식은 식 (2)를 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_L - U_0 = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (q_i - q_e) \Delta x_i \quad (3)$$

그리고, 터널내의 임의의 검사체적에 대하여, 정상상태의 운동량 보존법칙을 적용하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$[(\rho U^2)_{x+dx} - (\rho U^2)_x]A + (\dot{M}_e - \dot{M}_i)dx = (\rho_x - \rho_{x+dx})A - \frac{1}{2}(\rho_x + \rho_{x+dx})gA \sin(\theta_R)dx + f_{piston}dx + f_{jet Fans}dx - f_{friction}dx \quad (4)$$

식 (4)에서, 밀도항을 체적평균 밀도( $\bar{\rho}$ )를 사용하여 정리한 후 터널전체길이에 대해 적분하고 관련 항끼리 묶으면 다음 식 (5)와 같이 정리된다.

Table 1. Basic input data for TUNVEN model

Physical characteristics of tunnel	Section data	Traffic & External data
Total length	No. of sections & zones	Vehicle no. in each direction
Area	Length	Drag coefficient
Perimeter	Altitude change	Average vehicle area
Altitude at entrance	Inflow ventilation rate	Percent truck (%)
Entrance coefficient	Outflow ventilation rate	Portal wind data
Exit coefficient	Vehicle speed in each direction	Ambient pollutant levels
Friction factor	Inflow ambient pollutant levels	

$$F_{Accel} = (F_{Vent} + F_{Jet\ Fans}) + (F_{External} - F_{Gravity}) + (F_{Piston}) - (F_{Friction}) \quad (5)$$

식 (5)의 각 항들은 다음과 같이 정의된다.

$$F_{Accel} \equiv \overline{\rho} A (U_L^2 - U_0^2).$$

$$F_{Vent} \equiv \int_0^L (\dot{M}_i - \dot{M}_e) dx,$$

$$F_{External} \equiv A (P_o - P_L).$$

$$F_{Gravity} \equiv g A \int_0^L \rho \sin(\theta_R) dx,$$

$$F_{Piston} \equiv \int_0^L f_{Piston} dx,$$

$$F_{Friction} \equiv \int_0^L f_{Friction} dx$$

$$F_{Jet\ Fans} \equiv \int_0^L f_{Jet\ Fans} dx$$

윗 식에서 좌변은 터널 입구에서의 공기 속도로부터 터널 출구의 공기 속도로 가속시키는데 필요한 축방향 힘을 나타낸다. 우변의 첫번째 항은 터널내의 환기시스템(유입유출환기량, 제트팬)에 관련된 힘을 나타내며, 두번째 항은 터널 입구 및 출구에 작용되는 외력의 축방향 힘 등 터널 주변 환경과의 상호작용에 관련된 힘을 의미하는 한편, 세번째 및 네번째 항은 각각 차량운동과 관련된 힘, 터널내의 공기흐름에 의한 힘 손실을 나타낸다.

정상상태의 에너지 보존방정식을 만족하기 위한 조건은, 임의의 검사체적에 대한 에너지 유입율과 내부발생율의 합이 반드시 에너지 유출율과 평형을 이루어야 한다는 것이다. 터널내 임의의 검사체적에 관하여 에너지 보존법칙을 적용하면 식 (6)과 같은 터널 검사체적에 대한 에너지평형 방정식을 얻을 수 있다.

$$A \left[ \rho U \left( h + \frac{U^2}{2} + gz \right) \right]_X + \rho_i q_i \left( h_i + \frac{q_i^2}{2a_i^2} + gz_i \right) dx + \dot{e}_{Veh} dx + \dot{e}_{Jet} dx + \dot{e}_{Equip} dx = A \left[ \rho U \left( h + \frac{U^2}{2} + gz \right) \right]_{x+dx} + \rho_e q_e \left( h_e + \frac{q_e^2}{2a_e^2} + gz_e \right) dx + \dot{e}_{H.T.} dx \quad (6)$$

식 (6)을 정리하면, 터널 축방향 길이에 대한 미분 형태의 방정식을 얻을 수 있으며, 다시 이를 적분하면 식 (7)과 같은 터널내 임의의 두 지점간 에너지 평형관계를 결정할 수 있다.

$$\dot{E}_{Veh} + \dot{E}_{Jet} + \dot{E}_{Equip} = \dot{E}_{Flow} + \dot{E}_{Vent} + \dot{E}_{H.T.} \quad (7)$$

식 (7)의 좌변은 각각 정상상태에서의 차량운동으로 인한 에너지 전달율(기여율, 고온의 배기가스, 기계적 마찰, 냉각기판의 방출열 등), 제트팬에 의한 에너지 전달율, 터널내의 전동 등 부대장비에 의한 에너지 전달율을 수식으로 표현한 항들이고, 우변의 항들은 각각 터널내의 유체흐름, 환기시설, 터널내외의 벽면 및 환경과의 열전달 상호작용에 의한 에너지 제거율을 의미하고 있다.<sup>10-14)</sup>

TUNVEN모형에서, 터널길이 방향에 관한 오염물질의 농도를 산정하기 위하여서는 앞절의 공기동역학 방정식과 오염물질에 대한 질량보존 방정식이 필요한데, 터널내의 미소체적에 대한 특정 오염물질의 질량수지식은 식 (8)과 같이 표현된다. 이때, 터널내 농도는 터널길이 방향으로만 변하는 1차원으로 가정됨과 동시에 터널내의 차량들은 선오염원으로 취급되며, 오염물질은 공기와 혼합된 희석성분(dilute component)으로 가정하여 유도되었다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} (UC) = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{C_i q_i}{A} - \frac{C q_e}{A} + S_v + \bar{R} \quad (8)$$

여기서,

- C : 오염물질 농도 (ppm)
- C<sub>i</sub> : 유입 환기공기의 농도(ppm)
- D : 총확산 계수 (ft<sup>2</sup>/s or m<sup>2</sup>/s)
- S<sub>v</sub> : 차량에 의한 오염물질 발생율(ppm/s)
- $\bar{R}$  : 화학 반응에 의한 오염물질 발생율 (ppm/s)

식 (8)에 포함된 화학반응항  $\bar{R}$ 을 무시하고 앞절의 연속방정식에 관한 식 (3)을 식 (8)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같은 축방향의 터널길이 L에 대한

터널이류 방정식의 일반적인 형태를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + (C_i - C) \frac{qL}{UA} + \frac{LS_v}{U} \quad (9)$$

$$P_e = \frac{UL}{D} \quad \text{or} \quad N_{pe} = \frac{Z_L^2}{D_E t_L}$$

여기서,

- $Z_L$  : 유체 유동경로의 길이 (m)
- $D_E$  : 난류 확산도 ( $m^2/s$ )
- $t_L$  : 유체 체류시간 (s)

식 (9)에서 분자확산에 의한 항을 무시하고 준정상 상태를 가정하면, 식 (10)을 얻을 수 있고, 이를 다시 임의의 축방향 터널 길이에 대하여 적분하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d(UC)}{dx} = \frac{C_i q_i}{A} - \frac{C q_e}{A} + S_v \quad (10)$$

$$C_x = C_0 + \int_0^x \frac{S_v}{U} dx - \frac{1}{A} \int_0^x (C - C_i) \frac{q_i}{U} dx \quad (11)$$

식 (11)에서  $C_0$ 는 입구에서 유입되는 공기에 포함된 오염물질의 농도를 의미하며,  $C_x$ 는 터널내 임의의 축방향 거리에서 오염물질의 농도를 의미하기 때문에 식 (10)과 공기동역학 방정식을 연계하여 풀게 되

면 정상상태에서 터널내 임의의 축방향지점에 대한 농도를 계산해 낼 수 있다.

### 2.3. 입력자료 정리 및 분석

#### 2.3.1. 민감도 분석

본 연구에서는 민감도 분석을 통하여 TUNVEN 모형에 있어서, 모형결과치에 크게 영향을 미치는 중요한 입력자료를 파악함으로써, 입력자료 획득 및 선정에 참고하였다. 이때 민감도 분석을 위해 선택한 변수는, 터널내의 통행하는 차량과 관련된 차량의 항력계수, 차량면적, 차량속도, 차량비, 그리고 터널의 물리적 제원인 터널둘레, 터널면적, 터널의 해발고도, 유입·유출 환기비, 풍속, 대기 중의 CO 농도 등으로 정하였다.

변수의 범위는 기준을 정하여 10%, 20% 증가 및 10% 감소 등 세 단계로 변화시켰으며, 그 중 몇 개의 변수는 증가와 감소의 비를 약간 크게 적용하였는데 각 입력변수의 지정값 및 변환값은 Table 2에 제시된 것과 같다. 그리고 기준값 및 변환값을 민감도 계수에 관한 식 (12)에 적용하여 터널길이 방향으로 500 ft 간격의 6개 지점에 대한 터널 민감도 계수를 산정하여 Table 3에 정리하였다.<sup>15-18)</sup>

여기서, 민감도 계수의 값이 클수록 변수값의 변화에 따른 결과가 민감하게 변하고 0에 가까울수록 결

Table 2. Range of variable input parameter for sensitivity analysis

Item	Input parameter	Fixed value	Variable value	
Vehicles data	drag coefficient	0.5	0.52, 0.54, 0.6	sensitivity coefficients were calculated at each 500(ft) distance for tunnel length direction(6 site)
	average vehicle area	20(ft <sup>2</sup> )	22, 24, 26	
	vehicle speed	40(mph)	44, 48, 52	
	car ratio	2000(vph)	1000, 1500, 2000, 2400	
Physical characteristics of tunnel	perimeter	100(ft)	90, 110, 120	
	in/out ventilation rate	200(KCFM)	150, 180, 220	
	tunnel area	500(ft <sup>2</sup> )	400, 550, 600	
	tunnel altitude	0(ft)	150, 250, 300	
External data	wind velocity	0(mph)	2.25, 4.5, 9	
	CO concentration of ambient air	0(ppm)	1, 5, 10	

Table 3. Mean sensitivity coefficient for each condition

Variable	Mean sensitivity coefficient	Priority
Area of vehicle (ft <sup>2</sup> )	0.001046 (20→22)	6
	0.000963 (20→24)	
	0.000915 (20→26)	
Vehicle speed (mph)	0.000832 (40→44)	5
	0.000745 (40→48)	
	0.000672 (40→52)	
Traffic volume (vph)	7.42E-07 (2000→1000)	10
	3.87E-07 (2000→1500)	
	2.12E-07 (2000→2200)	
	1.85E-07 (2000→2400)	
Drag coefficient	1.701 (0.5→0.52)	1
	1.717 (0.5→0.54)	
	1.541 (0.5→0.60)	
Perimeter (ft)	3.56E-05 (100→90)	7
	3.59E-05 (100→110)	
	1.79E-05 (100→120)	
In/Out ventilation rate (KCFM)	7.4E-05 (200→150)	8
	7.84E-05 (200→180)	
	8.6E-05 (200→220)	
Tunnel area (ft <sup>2</sup> )	5.88E-06 (500→400)	9
	3.85E-06 (500→550)	
	3.48E-06 (500→600)	
Tunnel altitude	0.0648 (0→150)	3
	0.0382 (0→250)	
	0.03166 (0→300)	
Wind velocity (mph)	0.00702 (0→2.25)	4
	0.01889 (0→4.5)	
	0.043808 (0→9)	
CO concentration of inlet & outlet (ppm)	0.268336 (0→5)	2
	0.149667 (0→10)	
	0.099765 (0→15)	

과값의 변화가 작음을 나타낸다.

$$S_c = \frac{C_i - C_s}{\frac{S_{av}}{C_s}} \quad (12)$$

Table 4. Basic data for Hwangryung tunnel in Pusan

Length	Perimeter	Cross sectional area	Altitude at entrance	Altitude at exit	Slope	Fan	
1860 m	27.6 m	41.85 m <sup>2</sup>	61.8 m	21.8 m	2.2%	120HP×2	320HP×2

여기에서

S<sub>c</sub> : 민감도 계수

C<sub>s</sub> : 기준에서의 농도

C<sub>i</sub> : 임의조건에서의 농도

S<sub>v</sub> : 기준조건에서 변수

S<sub>av</sub> : 임의의 조건변수와 기준조건 변수값의 차이

민감도 분석 결과, 차량항력이 터널의 오염농도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 나타났으며, 그 다음으로는 출구에서의 CO 농도, 터널의 해발고도, 입구에서의 바람속도, 차량속도 등의 순서로 영향이 큰 것으로 파악되었다.

### 2.3.2. 대상터널의 제원

TUNVEN 모형은 비교적 고속으로 주행이 가능하며 장대터널 적용이 용이하도록 개발된 점을 고려하여 부산에서 가장 최근에 개통되었고 터널통과 길이가 두 번째로 긴 황령산 터널을 대상으로 TUNVEN 모형을 적용하였다. 황령산 터널에 대한 제원은 Table 4에 정리된 바와 같으며, 총 길이가 1,860 m의 터널에 환기시설로서 120마력, 320마력의 송풍기가 양방향 입구 상단에 각각 설치되어 있으며, 환기방식은 반회류식을 적용하고 있다. 또한 환기구는 터널 천장내 5 m 간격으로 설치되어 있다.

### 2.3.3. 대상오염물질

본 연구는 1995년 9월 23일 10:30~17:30까지 총인원 18명을 동원하여 황령산 터널내(대연동에서 전포동 방향)에서 1시간 범위를 산정하여(시료채취 요원투입 및 기타준비 등) 총 4차례 시료를 채취하였으며, 동시에 터널공기 오염도를 측정하였다. 여기서 터널 환기시설 가동 및 미가동 상태의 터널오염도를 비교 분석하기 위하여 1차 및 2차 시료채취는 터널 환기시설 미가동 상태에서, 3차 및 4차에서는 터널 환기시설 가동 상태에서 실측하였으며, 입구의 오염

농도는 1차 및 2차 시료채취시 측정하였다. 또한, 터널길이 방향의 시료채취 간격은 1차, 3차에서 100 m와 200 m 지점을 기준으로 하여 200 m간격으로 1,800 m까지 10개 지점, 그리고 2차, 4차는 100 m 지점을 기준으로 하여 200 m간격으로 1,860 m까지 10개 지점에서 시료채취를 실시하였다. 시료채취는 20 l 테프론 bag과 흡인펌프(흡인유량 1 l/min)를 준비한 요원이 각 측정지점별로 배치되어 같은 시간대 터널내 전구간에서 20분동안 동시에 시료를 채취하였으며, 수집한 시료는 즉시 실험실로 운반하여 CO는 비분산적외선흡수법(NDIR)으로, NO<sub>x</sub>는 화학발광법(chemiluminescent method)으로 측정 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 실측치와 모형치 비교 평가

터널내 각 채취지점별 CO농도 및 NO<sub>x</sub>농도의 실측치와 모형치를 터널 내 시료 채취지점이 동일한 1차,

3차와 2차, 4차로 구분하여 Table 5와 6에 정리하고 그 결과를 Fig. 1 및 2에 도시하였다. 그림에서 백점은 모형에 의한 CO, NO<sub>x</sub>농도이며, 흑점은 실측에 의한 CO, NO<sub>x</sub> 농도를 나타냈다.

CO 농도 측정치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 1차, 3차 측정시에는 800 m 지점에서 높게 나타났다가 1,000 m 지점에서 다시 낮아지고, 1,600 m 지점에서 CO농도가 다시 낮아지는 것이 고찰되었다. 이것은 대상터널인 황령산 터널의 경우 중간 부분인 약 930 m 지점에 차단벽이 설치되어 있고, 또한 600 m와 1,200 m 지점에 2개소의 사고차량 대피장소가 설치되어(4.0×4.5 m) 터널내 반대 차선벽과 관통되어 있는 구조로서, 일반적으로 양방향 터널에서 나타나는 공기정체 현상이 발생하는 구간이 되므로, 800 m와 1,200 m 지점에서는 CO농도가 높게 나타나고, 환기공기 이송관 차단벽이 설치되어 있는 중간 지점과 인접한 1,000 m 지점 및 출구에서 근접한 1,600 m 지점은 환기공기의 영향으로 CO농도가 낮게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 2차 측정시 700 m 지점에서 CO농도가 높게 상승하는 것은 600 m 지점의 차량대피 장소로 인한 공기정체 현상으로 추

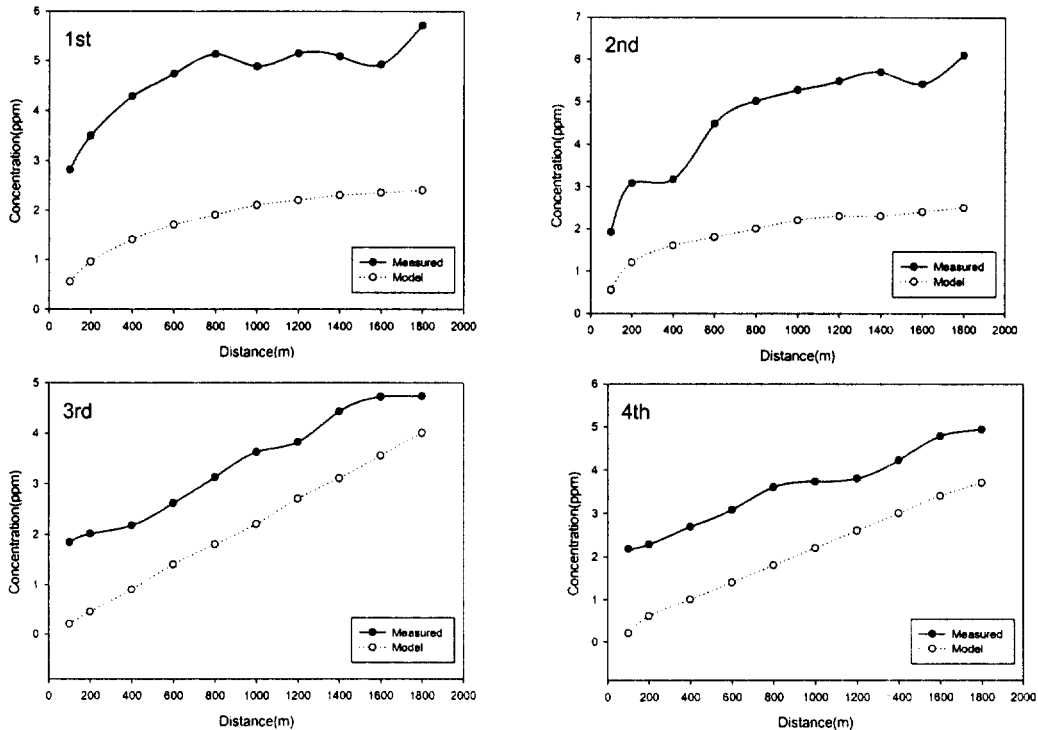


Fig. 1. Comparison of measured and calculated CO concentration data for each sampling site.

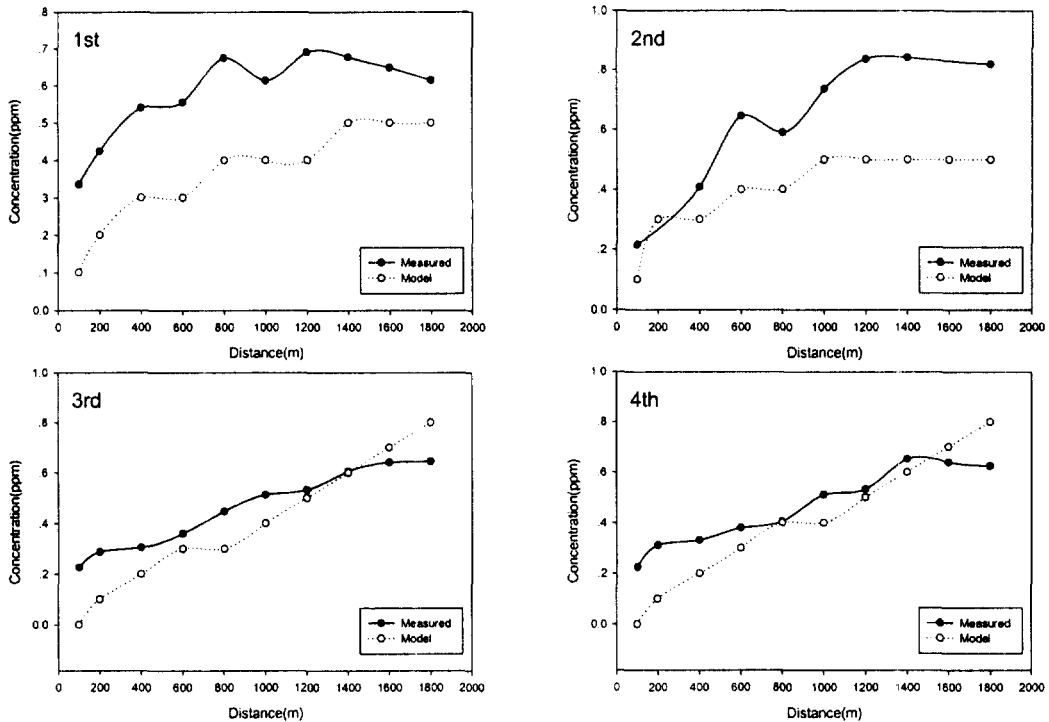


Fig. 2. Comparison of measured and calculated NO<sub>x</sub> concentration data for each sampling site.

정되며, 1,700 m 지점에서 CO농도가 다소 낮아지는 것은 환기공기의 영향에 기인된 것으로 추정된다.

NO<sub>x</sub> 농도의 실측치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1차 및 2차 측정시 NO<sub>x</sub> 농도가 800 m와 1,200 m 인 근지점에서 높게 나타났는데, 이것은 CO에서와 동일하게 차량 대피장소에 의한 것으로 추정된다. 4차 측정시에는 900 m 지점에서 실측치와 모형치가 거의 일치하였고, 3차 및 4차 측정결과를 함께 비교하면 실측치의 NO<sub>x</sub>농도가 모형치의 NO<sub>x</sub>농도보다 높게 나타났다가 1,400 m 인근 지점에서는 거의 일치한다. 그리고 그 이후에는 모형치의 농도가 실측치의 농도보다 높게 나타났다. 이는 터널 통과 지점에서 직진 방향으로 동서고가도로 연결 램프가 설치되어 있으며 또한 인접한 우측방향에는 전포동 우회차선, 범내골 직진차선, 문현동 방향의 교차로 신호대기 등 차량 정체구간이 연결됨으로써 차량 감속 및 정속으로 인해 NO<sub>x</sub>농도가 낮아지는 것으로 사료된다. 그러나 전체적으로 볼 때 터널내 환기시설 가동유무와 관계없이 터널길이 방향으로 진행할수록 CO와 NO<sub>x</sub>농도가 증가하는 것으로 나타났고 모형의 농도가 실측치의 농도에 비해 과소평가되는 경향을 나타내었다.

### 3.2. TUNVEN 모형의 검증 및 보정

총 4차에 걸쳐 CO 및 NO<sub>x</sub> 농도에 대한 터널길이 방향으로 실측치와 모형치를 정리한 Table 5와 6에 나타내었으며, 이들의 단순회귀분석(일차회귀직선) 결과를 정리하여 Table 7에 나타내었다. 일반적으로 실측치와 모형치의 상관관계는 상관계수가 클수록 커지며, 회귀식의 경우는 기울기가 1에 가까울수록, 절편은 0에 가까울수록 모형치는 실측치에 근접하게 된다. 그러나 오염물질 측정시 수반되는 측정오차와 모형의 가정 및 한계성에 따른 모형치의 오차가 항상 존재하기 때문에 기울기와 절편은 1과 0값을 갖지 않는 것이 보통이다.

일본의 경우, 예측치와 실측치간의 적합성을 만족하는 조건으로서,

- 1) 일차회귀직선의 기울기가 (0.8에서 1.2 범위)에 속하며,
  - 2) 상관계수가 0.71(가능한 0.8 이상) 이상될 것과
  - 3) 오염농도의 경향이 동일한 것을 제시하고 있다.
- Table 7의 결과를 살펴보면, 특히 CO의 경우 상관계수 95% 이상, 기울기 및 절편은 각각 0.8~2.2와



Table 5. Comparison of CO concentration

(unit : ppm)

Distance (m)	1st*		3rd**		2nd*		4th**	
	measured	model	measured	model	measured	model	measured	model
100	2.81	0.55	1.84	0.20	1.92	0.55	2.18	0.2
200	3.49	0.95	2.01	0.45	3.08	1.2	2.28	0.6
400	4.28	1.40	2.17	0.90	3.17	1.6	2.69	1.0
600	4.73	1.70	2.61	1.40	4.48	1.8	3.08	1.4
800	5.13	1.90	3.12	1.80	5.01	2.0	3.60	1.8
1,000	4.88	2.10	3.62	2.20	5.27	2.2	3.73	2.2
1,200	5.14	2.20	3.82	2.70	5.48	2.3	3.80	2.6
1,400	5.08	2.30	4.43	3.10	5.69	2.3	4.22	3.0
1,600	4.92	2.35	4.72	3.55	5.41	2.4	4.78	3.4
1,800	5.71	2.40	4.73	4.00	6.09	2.5	4.93	3.7

\*ventilation fan was on, \*\*ventilation fan was off

Table 6. Comparison of NO<sub>x</sub> concentration

Distance (m)	1st*		3rd**		2nd*		4th**	
	measured	model	measured	model	measured	model	measured	model
100	0.335	0.1	0.226	0.0	0.215	0.1	0.225	0.0
200	0.424	0.2	0.287	0.1	N.A.	0.3	0.311	0.1
400	0.54	0.3	0.305	0.2	0.408	0.3	0.331	0.2
600	0.555	0.3	0.360	0.3	0.645	0.4	0.380	0.3
800	0.674	0.4	0.447	0.3	0.590	0.4	0.405	0.4
1000	0.613	0.4	0.513	0.4	0.736	0.5	0.511	0.4
1200	0.689	0.4	0.532	0.5	0.836	0.5	0.532	0.5
1400	0.676	0.5	0.606	0.6	0.841	0.5	0.652	0.6
1600	0.648	0.5	0.641	0.7	N.A.	0.5	0.639	0.7
1800	0.614	0.5	0.645	0.8	0.819	0.5	0.625	0.8

\* ventilation fan was on, \*\* ventilation fan was off

Table 7. Results of linear regression analysis for each measured and calculated data

Item Data	CO [ Y = a + bX ]			NO <sub>x</sub> [ Y = a + bX ]		
	correlation coefficient(r)	a	b	correlation coefficient(r)	a	b
1st	95.56%	2.286	1.306	91.23%	0.292	0.791
2nd	97.39%	0.480	2.164	97.48%	0.014	1.556
3rd	99.01%	1.585	0.848	97.30%	0.231	0.578
4th	99.07%	1.934	0.801	95.48%	0.247	0.543

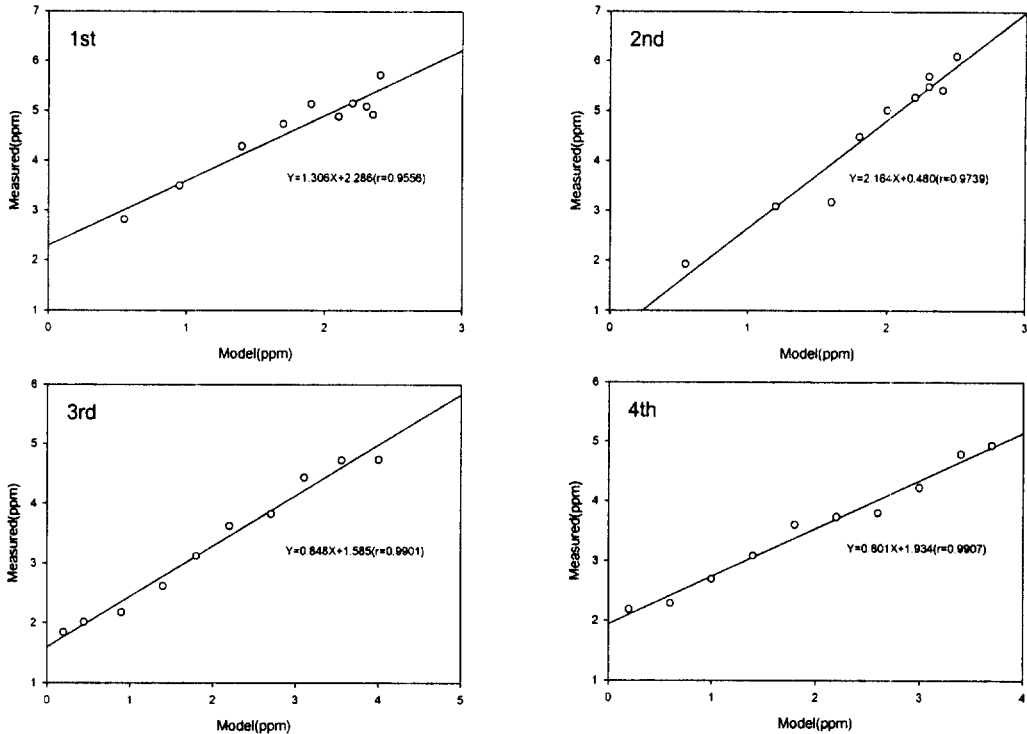


Fig. 3. Comparison of the linear regression analysis for measured and calculated concentration data of CO.

0.5~2.3으로 산정되었으며, NO<sub>x</sub>의 경우는 상관계수 91% 이상, 기율기 및 절편 각각 0.5~1.6과 0.01~0.3으로 나타났다. 이러한 결과와 Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 터널길이 방향으로 진행할수록 CO와 NO<sub>x</sub>의 실측치 및 모형치가 같이 증가되는 동일한 경향을 보이고 있는 점을 고려할 때 TUNVEN 모형의 적합성을 확인할 수 있었다.

상, 기율기 및 절편이 0.5~2.2, 0.01~2.3의 값을 나타내었다. 그리고 터널 길이방향으로 진행할수록 CO 및 NO<sub>x</sub>의 실측치 및 모형치가 같이 증가되고 있는 동일한 경향을 고려할 때, 터널 오염도 예측에 있어서 TUNVEN 모형의 적합성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터널의 오염도 예측과 환기시설 설계에 사용되는 TUNVEN 모형의 적합성을 검토하기 위하여 부산시 남구 대연동 소재 황령산 터널을 대상으로 하여 TUNVEN의 주요 입력자료에 해당되는 터널내 오염도 예측 및 적정 환기시설 설계시 TUNVEN 모형의 적용 가능성에 대해 조사하였다.

총 4차에 걸친 터널 길이방향 CO 및 NO<sub>x</sub> 농도의 실측치와 모형치를 이용하여 단순회귀분석을 실시한 결과, CO 및 NO<sub>x</sub>에 대한 상관계수가 모두 91% 이

#### Nomenclature

- a<sub>i</sub> : Influx ventilation port area perpendicular to port axis per unit tunnel length, ft (m)
- a<sub>e</sub> : Efflux ventilation port area perpendicular to port axis per unit tunnel length, ft (m)
- ε̇ : Energy transfer rate (power) per unit tunnel length, BTU/hr-ft (erg/hr-m)
- z : Elevation (z<sub>0</sub> = elevation of portal at x = 0, z<sub>L</sub> = elevation of portal at x=L), ft (m)
- A : Tunnel effective cross-sectional area, ft<sup>2</sup>

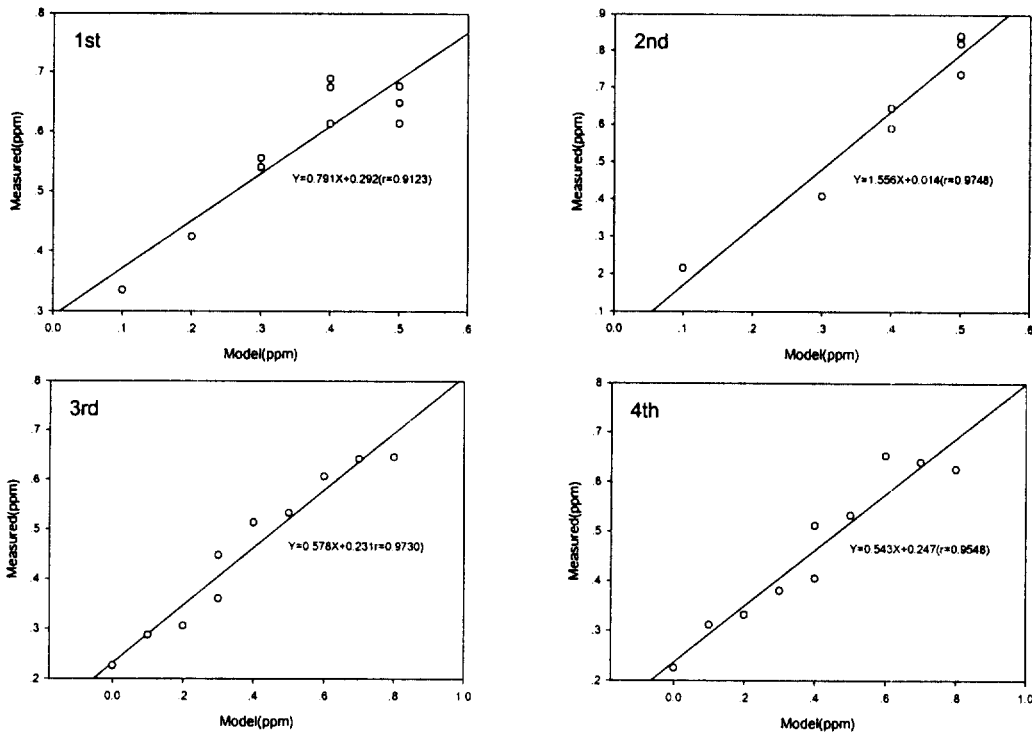


Fig. 4. Comparison of the linear regression analysis for measured and calculated concentration data of NO<sub>x</sub>.

- (m<sup>2</sup>)
- C : Flow cross-sectional average concentration of pollutant under consideration, ppm
- Ė : Energy transfer rate (power), BTU/hr (erg/hr)
- F : Force (positive in positive tunnel direction), lb (dynes)
- h : Specific enthalpy per unit mass, BTU/lb (erg/g)
- L : Tunnel length(traffic portal to traffic portal), ft(m)
- q : Volumetric ventilation rate per unit axial length and tunnel cross-sectional area (q<sub>i</sub> for influx, q<sub>e</sub> for efflux), l/sec
- R̄ : Fluid specific gas constant, BTU/lb·F (erg/g°C)
- S<sub>v</sub> : Local source rate due to vehicles for the pollutant under consideration, ppm/sec
- U : Tunnel cross-section average axial velocity

- city at a specific x location and directed in the positive tunnel direction, ft/sec (m/s)
- D : Total diffusivity of tunnel air, ft<sup>2</sup>/s (m<sup>2</sup>/s)
- ρ : Local tunnel air density, lb/ft<sup>3</sup> (g/cm<sup>3</sup>)
- ρ̄ : Tunnel volume average air density, lb/ft<sup>3</sup> (g/cm<sup>3</sup>)
- ( )<sub>e</sub> : Refers to ventilation efflux
- ( )<sub>i</sub> : Refers to ventilation influx
- ( )<sub>0</sub> : Refers to condition at tunnel entrance (x=0)
- ( )<sub>L</sub> : Refers to condition at tunnel exit (x=L)

### 참고 문헌

1. 김영성 외 7명, "서울시 주요 터널내 기체상 오염 물질 농도 측정," 한국대기보전학회지, 9(4), 320~328 (1993).
2. 부산광역시 시정발전연구원, "세계의 도시연구,"

- 지하공간개발, 6 (1994).
3. 김광수, 터널 오염도와 그 영향인자에 관한 연구, 경성대학교 석사학위논문 (1992).
  4. 전대영, 부산시 지하상가의 오염도 및 환기량 조사연구, 부산대학교 석사학위논문 (1992).
  5. 이희관, 환기가 실내공기 오염물질의 제거에 미치는 영향에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문 (1993).
  6. U. S. Department of Commerce, "Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels," PB80-143803(1979).
  7. U. S. Department of Commerce, "Users Guide for the TUNVEN and DUCT Programs," NTIS, PB80-141575(1980).
  8. McCabe, W. L. and Smith, J. C., Unit operations of chemical Engineering, fifth Edition, McGraw-Hill chemical engineering series, p. 310(1993).
  9. Schlaug, R. N., "Users Guide for the TUNVEN and DUCT Programs," Federal Highway administration Report FHWA-RD-78-187, April(1979).
  10. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., New York(1960).
  11. Idel'chik, I. E., "Handbook of Hydraulic Resistance-Coefficients of Local Resistance and of Friction," Translated by A. Barouch, D. Grunaer(Ed)., AEC Report AEC-TR-6630, Israel Program for Scientific Conditioning Engineers, New York (1972).
  12. Healey, J. H., Patterson, M. N. and Brown, E. J., "Pressure Losses Through Fittings Used in Return Air Duct Systems," *ASHRAE Trans.*, 68, Part II, 281(1962).
  13. Waggen, J. P., "Friction Factors for Pressure-Drop Calculations," *Nucleonics*, 19(11), 145(1961).
  14. Shapiro, A. H., Compressible Fluid Flow, Vol. II, Ronald Press, New York(1954).
  15. 정장표, 김상현, "IAQ모형의 민감도분석에 관한 연구," 경성대학교 생산기술연구지 (1994).
  16. 김도원, 대기확산 모형의 감응도 분석에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문 (1987).
  17. 박명호, 대기확산 모형의 민감도 분석에 관한 연구, 경성대학교 석사학위논문 (1990).
  18. 김선태, 이동오염원에 대한 대기확산모형의 감응도 분석에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문 (1989).