

환기시스템 적용 도로터널의 국소환기 특성 시뮬레이션 및 해석

박 기 립, 오 명 도[†], 이 재 현^{*}

서울시립대학교 기계정보공학과, ^{*}한양대학교 기계공학과

Simulation and Analysis of Local Ventilation Characteristic of Road Tunnel with Ventilation System

K. R. Park, M. D. Oh[†], J. H. Lee^{*}

Department of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 134-743, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Hang Yang University, Seoul 133-791, Korea

(Received March 5, 2000; revision received January 22, 2001)

ABSTRACT: In this study, a design program for ventilation requirements of a longitudinal road tunnel were developed and investigated. The control volume method was applied to calculate the local air velocity and the local concentration distribution of pollutants, CO , NO_X , *soot* along the tunnel for various tunnel ventilation system. This program was validated by comparing with the practical design data for the road tunnel ventilation system. The calculation results were in good agreement with the practical design data.

Key words: Road tunnel(도로터널), Fresh air requirements(소요환기량), Concentration distribution(농도분포), Tunnel ventilation system(터널환기시스템)

기 호 설 명

A_f : 제트팬 분류 단면적
 A_p : 환기포트 단면적
 A_t : 터널 단면적
 A_v : 차량의 전면 투영면적
 C : 제어체적의 유해가스농도 [ppm]
 C_D : 차량의 항력계수
 C_i : 기계환기시스템을 통해 제어체적으로 유입되는 공기의 유해가스농도 [ppm]
 C_s : 매연농도 [g/m^3]
 CO_{lim} : CO 의 법정허용농도 [ppm]

d_h : 터널의 수력학적 지름
 k : 포트운동량계수
 L : 터널 길이
 N : 단위길이당 차량수
 N_f : 설치된 제트팬 수
 NO_{Xlim} : NO_X 의 법정허용농도 [ppm]
 K : 제트팬 설치효율
 K_{lim} : *Soot*에 의한 법정허용가시도 [m^{-1}]
 Q : 각 오염물의 소요환기량 [$m^3/s \cdot km \cdot lane$]
 q_i : 종방향 유입되는 제어체적당의 환기량
 q_e : 종방향 유출되는 제어체적당의 환기량
 q_0 : 각 오염물질의 기준 배출량
 S_v : 차량에 의해 발생하는 유해가스량 [ppm/s]
 t : 시간
 U : 터널내 유동의 국소속도

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2756; fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

- U_f : 분류속도
 U_p : 환기포트의 유출속도
 V : 차량의 평균속도

그리스 문자

- β : 분류와 터널 축방향이 이루는 각도
 ρ : 공기 밀도
 Φ : 대형차 혼입률
 Γ : 유해가스 확산계수
 λ : 터널 벽면 마찰계수

상첨자, 하첨자

- e : 유출
 i : 유입
 s : 소형차
 t : 대형차
 $+$: 터널유동 방향
 $-$: 터널유동 반대방향

1. 서 론

국내 자동차 통행량의 급증으로 인한 도로 터널의 장대화 추세에 따라 터널 내부의 환경악화가 문제시되고 있고, 특히 환경 및 안전운행에 대한 중요성이 강조됨에 따라 터널 내의 쾌적한 환경과 가시거리 확보를 위한 환기시스템 설계의 필요성이 점차 높아지고 있다. 또한 최근에 각국에서는 터널로부터의 배기물질로 인한 주변환경 오염을 큰 문제로 다루고 있으며 정량화된 오염물질 규제에 터널 환기에 적용되기 시작하였다. 선진 외국에서는 오래 전부터 터널의 환기대책에 큰 관심을 가지고 자국의 특성에 맞는 설계자료의 정립을 위해서 지속적인 연구를 추진하고 있다.

현재까지의 국내 도로 터널 환기시스템 설계에서는 주로 국제상설도로협회(PIARC)나 미국, 일본 등의 기준과 지침을 전적으로 적용하고 있는 실정에 있다. 그러나 국내의 기상조건, 차량특성, 교통조건 및 터널특성에 대한 연구 없이 이들 방법을 국내 현장에 무조건적으로 적용하는 데는

많은 문제점이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 도로 터널 환기시스템 설계기술에 대한 연구의 필요성에 입각하여 이미 그 타당성이 검증된 미국의 연방도로공사(FHWA)에서 개발한 해석 프로그램인 TUNVEN의 제어체적 방법과 한국도로공사에서 1997년에 제시한 고속도로 터널 환기시설 설계기준을 바탕으로 환기장치의 용량과 오염물질의 농도예측이 가능하고 국내 현장적용이 적합한 설계 프로그램의 개발을 목적으로 한다. 또한 터널 내 유동손실로서 작용하는 변수 중 한국도로공사에서 제시한 기준이 명확하지 않은 터널 마찰계수와 자연풍의 영향에 대한 검토를 통해 두 변수가 터널 환기설계에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

2. 환기장치 용량산정 및 공기역학

2.1 환기량 산정식

환기의 대상이 되는 물질은 일반적으로 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 그리고 매연($soot$)이다. 현재 국내에서 적용되는 소요환기량 산출 방법은 일본 방식과 국제상설도로회의(PIARC) 방식이 있으며, 본 연구에서는 한국도로공사에서 원칙으로 제시한 PIARC 방식을 적용하였다. 소요환기량 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{CO} = \sum_{i=\text{차종}} (q_0^{CO} \cdot n)_i \frac{f_i \cdot f_v \cdot f_h}{3600} \frac{10^6}{CO_{lim}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{NO_x} = \sum_{i=\text{차종}} (q_0^{NO_x} \cdot n)_i \frac{f_i \cdot f_v \cdot f_h}{3600} \frac{10^6}{NO_x_{lim}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{soot} = \sum_{i=\text{차종}} (q_0^T \cdot n)_i \frac{f_{iv} \cdot f_h}{3600} \frac{1}{K_{lim}} \quad (3)$$

여기서, f_i 는 터널구배에 따라 결정되는 유해가스 배출량 보정계수, f_v 는 차량속도, f_h 는 터널고도에 따른 유해가스배출량 보정계수, f_{iv} 는 차량속도와 터널구배에 따라 결정되는 매연배출량 보정계수이다. q_0^{CO} , $q_0^{NO_x}$, q_0^T 는 각각의 오염물질에 대한 기준배출량을 나타내며 단위는 $[m^3/(pcu \cdot h)]$ 각 차종별 구성비와 배출량에 따라 결정된다. 각 오염물질에 대한 법정허용농도는 Table 1과

Table 1 Design criteria of contaminant level
(Car vel. [km/h])

Car Vel. Contamin.	10	20	30	40	50	60	70	80
CO [ppm]	150	150	150	100	100	100	100	100
NO _x [ppm]	25	25	25	25	25	25	25	25
Soot (K)[m ⁻¹]	.008	.008	.008	.007	.007	.006	.006	.006

같다. n 은 차종별 교통량으로 단위는 [대/km·lane]로 나타낸다. 본 연구에서는 위 식을 사용하여 각 오염물질에 따른 터널 내 소요환기량을 차량 주행속도별로 계산하였다. 그러나 위의 환기량 계산방법만을 가지고 터널 내의 환기시스템 설비설계를 하는 경우 터널 내 오염물질의 농도가 터널 전체 구간의 어느 영역에서나 설계기준치 이하로 유지된다고 단정할 수 없다. 따라서 기존의 TUNVEN에 적용하여 유효성이 인정되고 현재 실무에서 적용되고 있는 제어체적 방법을 통하여 터널 전구간에 걸친 국소 위치에서의 속도 및 오염농도를 계산하여 보다 정확한 환기설비 설계가 가능한 프로그램을 개발하였다.

2.2 터널의 공기역학

2.2.1 기본가정과 해석방법

차량통행으로 인한 터널 내부의 오염물질을 희석시켜 그 농도를 낮추기 위해서는 자연환기 또는 기계환기를 통해 깨끗한 공기를 터널 내로 유입시켜야 한다. 자연환기를 통한 환기량 유입은 터널 내를 주행하는 차량의 피스톤 효과를 이용하는 방법이 있으며, 기계환기를 통한 환기량 유입은 제트팬이나 집진기 그리고 수직갱 등을 사용하는 방법이 있다. 터널 내의 국소공기속도 및 오염물질의 농도분포는 이러한 것들의 상호작용을 고려하여 해석하여야 하며, 본 연구에서는 해석을 용이하게 하기 위해서 터널 내의 공기를 다음과 같이 가정한다.⁽¹⁾

- (1) 터널 내의 공기는 비압축성 유체로 가정한다.
- (2) 터널 내 공기의 흐름은 해석을 단순화하기 위해 차량 통행방향으로 1차원으로 가정한다.
- (3) 터널 내의 풍속은 준 정상류 유동으로 취급한다. 즉, 축방향 및 횡방향으로의 시간 가중평균이 거의 일정하다고 가정한다.

본 연구에서는 터널을 유한개의 종방향 제어체적으로 나누어 각 제어체적에 연속방정식 및 농도방정식을 적용하여 터널의 종방향 국소속도 및 유해가스농도 분포를 계산하였다.

2.2.2 연속방정식

터널 내 공기유동은 위에서 가정한 것처럼 고속이 아니므로 비압축성이며 터널의 종방향 성분만이 지배적인 1차원 방정식이다.

Fig. 1은 단면적과 공기밀도가 일정한 터널의 종방향 제어체적에서의 경계면과 환기포트를 통해 유입·유출되는 질량유량을 나타낸 것이며 그 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dU}{dx} = q_i - q_e \quad (4)$$

2.2.3 운동량 방정식

Fig. 2는 하나의 제어체적에 작용하는 외력 및 운동량을 표시한 그림이다. 각각의 요소를 살펴보면 \dot{M}_i 와 \dot{M}_e 는 각각 환기포트에 의해 유출입되는 운동량을 말하고 f_{piston} 은 제어체적 내를 통과하는 차량의 피스톤 효과가 제어체적 전체 유

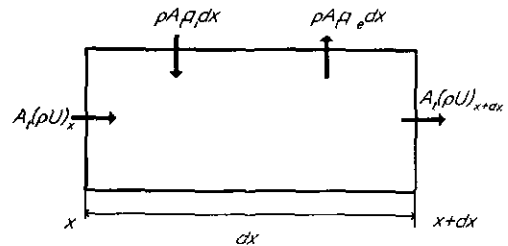


Fig. 1 Conservation of mass for a control volume.

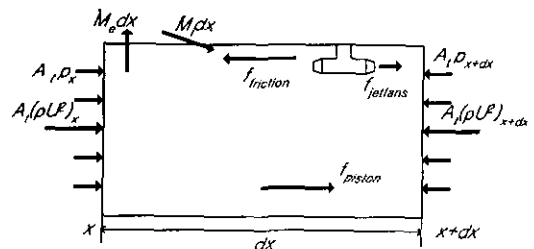


Fig. 2 Momentum balance of pollutant for a control volume.

동에 미치는 외력을 말하며, $f_{jetfans}$ 은 제트팬에 의한 외력을 나타낸다. $f_{friction}$ 은 터널 내 벽면마찰에 의한 유동손실이다. 터널의 공기를 가속시키는 힘은 이들 전체 외력의 합이므로 운동량 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [(\rho U^2)_{x+dx} - (\rho U^2)_x] A_t + (\dot{M}_e - \dot{M}_i) dx \\ & = (p_x - p_{x+dx}) A_t + f_{piston} dx \\ & \quad + f_{jetfans} dx - f_{friction} dx \end{aligned} \quad (5)$$

위 식의 좌변은 제어체적면을 통과하는 운동량의 합을 우변은 제어체적면에 작용하는 외력들의 합을 낸다. 각 항들의 보다 상세한 구분은 다음과 같다.

1) 차량에 의한 피스톤 효과

식(5)의 f_{piston} 은 차량에 의한 피스톤 효과를 말하며 터널 전체에 대한 피스톤 효과는 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$\begin{aligned} F_{piston} &= \frac{\rho}{2} \times \\ & \int_0^L \left[(C_D A_V)^+ \frac{N_+}{V_+} (V_+ - U) |V_+ - U| \right. \\ & \quad \left. - (C_D A_V)^- \frac{N_-}{V_-} (V_- + U) |V_- + U| \right] dx \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 차량의 항력계수와 전면투영면적의 곱은 소형과 대형으로 구분하여 다음과 같이 나타낸다.

$$C_D A_V = (1 - \phi)(C_D A_V)_s + \phi(C_D A_V)_t \quad (7)$$

2) 제트팬에 의한 환기력

식(5)의 $f_{jetfans}$ 항은 제트팬에 의한 환기력이다. 제트팬은 고속의 분류를 터널내로 분사함으로써 추진력을 얻는 장치이다. 제트팬 하나의 추진력을 식으로 쓰면 다음과 같다.

$$f_{jetfans} = \rho A_f |U_f| (U_f - U) \quad (8)$$

제트팬이 여러 개 설치되어 있을 때 터널 전체 유동에 미치는 효과는 다음 식과 같다.

$$F_{jetfans} = \sum_{i=1}^n (\rho N_f A_f |U_f| K (U_f - U))_i \quad (9)$$

3) 환기포트에 의한 환기력

식(5)의 $(\dot{M}_i - \dot{M}_e)$ 는 환기포트에 의한 환기력으로 횡류식 시스템 및 종류식 시스템으로 나누어지고 종류식 시스템에서의 환기포트력은 다시 수직포트와 경사포트 환기력으로 나눌 수 있다.

횡류식 시스템의 경우는 터널 내의 주유동 방향에 수직으로 흡·배기되기 때문에 환기포트의 운동량은 터널 주유동의 운동량에 영향을 미치지 않는다. 그것을 식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$f_{port} = \rho A_t (U_x^2 - U_{x+dx}^2) \quad (10)$$

그러나 실제의 경우에 포트가 수직으로 설치되어 있다 하더라도 포트로 유·출입되는 유동이 터널의 주유동 방향에 정확히 수직일 수는 없으므로 다음과 같이 보정한다.

$$f_{port} = k\rho A_t (U_x^2 - U_{x+dx}^2) \quad (11)$$

이것을 유입과 유출로 구분하여 터널 전체에 작용하는 환기포트력을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_0^L (M_i - M_e) dx = \\ & 2\rho \int_0^L U [(1 - k_i) a_i - (1 - k_e) q_e] dx \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, k_i 와 k_e 는 각각 유입과 유출포트 운동량 계수로서 그 값은 0.67, 0.60을⁽²⁾ 사용한다.

식(12)는 일반적으로 사용되는 송기 반횡류식의 경우에는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\int_0^L (M_i - M_e) dx = \rho A_t (1 - k_i) (U_L^2 - U_0^2) \quad (13)$$

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 종류식 환기방식의 송기와 배기포트가 있는 터널부에 작용하는 힘요소를 나타내고 있다.

종류식 터널에서의 수직 배기포트의 연속방정

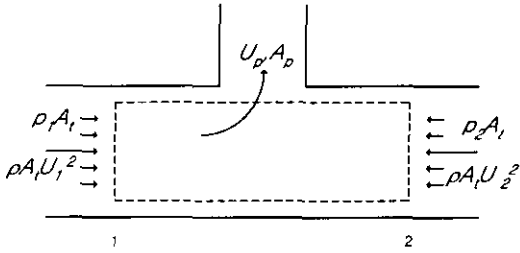


Fig. 3 Conversation of axial momentum near longitudinal tunnel with a vertical ventilation port.

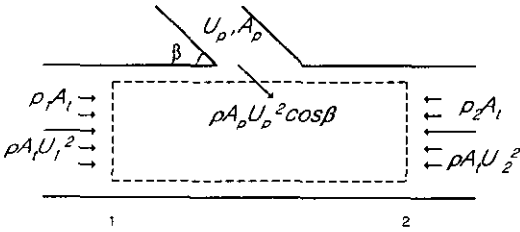


Fig. 4 Conversation of axial momentum near longitudinal tunnel with a angled ventilation port.

식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\rho U_1 A_t = \rho U_b A_b + \rho U_2 A_t \quad (14)$$

$$p_1 A_t + \rho A_t U_1^2 - p_2 A_t - \rho A_t U_2^2 = 0 \quad (15)$$

식(14)와 식(15)를 가지고 터널 전체에 m 개의 수직포트가 설치되어 있는 경우 환기포트에 의한 환기력을 구하면 다음 식과 같다.

$$\int_0^L (\dot{M}_i - \dot{M}_e) dx = \rho A_t \sum_{i=1}^m \left\{ 2 \frac{A_b}{A_t} U_b U - \left(\frac{A_b}{A_t} U_s \right)^2 \right\}_i \quad (16)$$

경사포트에서는 집진기, 수직갱, 그리고 샷칼트 방식과 같이 일반적으로 급기노즐이 설치되어 기류유동으로 인한 송압력이 발생한다. 경사포트에 의한 환기력을 계산하기 위하여 Fig. 4와 같은 제어체적에서 연속방정식과 운동량방정식을 세우면 각각 다음과 같다.

$$\rho U_1 A_t + \rho U_b A_b = \rho U_2 A_t \quad (17)$$

Table 2 Friction coefficient of tunnel wall

Side Wall Type	λ
Smooth Lining	0.015~0.020
Concrete	0.025
Rock without Lining	0.03~0.05

$$p_1 A_t + \rho A_t U_1^2 + \rho A_b U_b^2 \cos \beta - p_2 A_t - \rho A_t U_2^2 = 0 \quad (18)$$

수직포트와 마찬가지로 식(17)과 식(18)을 가지고 m 의 경사포트가 있는 터널 전체의 환기력을 계산하면 다음과 같다.

$$\int_0^L (\dot{M}_i - \dot{M}_e) dx = \rho A_t \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{A_b}{A_t} U_b^2 \cos \beta + \left(\frac{A_b}{A_t} U_s \right)^2 - 2 \frac{A_b}{A_t} U_b U \right\}_i \quad (19)$$

4) 터널벽면 마찰손실

식(5)의 $f_{friction}$ 은 터널벽면에서의 마찰손실로서 파이프나 덕트에서와 같이 계산할 수 있으며 터널 전체의 마찰손실은 다음과 같다.

$$F_{friction} = \rho \lambda \frac{A}{2d_h} \int_0^L U^2 dx \quad (20)$$

λ 는 터널 벽면마찰계수로서 직선터널의 경우 측벽의 형태에 따라 Table 2와 같다.⁽¹⁾ 한국도로공사에서는 측벽의 형태에 관계없이 일반적으로 벽면마찰계수를 일정하게 0.025로 제시하고 있으나, 측벽형태에 따른 벽면마찰계수의 차이가 터널 내의 공기유속 및 각 오염물질의 농도에 영향을 미치므로 실제적인 벽면마찰계수값을 선택하는 것이 필요하다.

5) 터널 입출구 및 자연풍에 의한 손실

식(5) 우변의 나머지 항은 터널 입구와 출구에서의 압력손실 및 터널 입구와 출구를 향하여 부는 자연풍에 의한 영향이 포함된 것으로 다음 식과 같다.

$$A_t \int_0^L (p_x - p_{x+dx}) dx = -A_t (\Delta P_0 + \Delta P_L + \Delta P_W) \quad (21)$$

여기서, ΔP_0 와 ΔP_L 은 터널 내 유동의 각각 입구와 출구에서의 유동손실이다. 터널의 경우에는 공기방향이 변할 수 있으므로 입구와 출구에서의 유동손실은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_0 + \Delta P_L = & - \left[\rho \frac{AU_L}{4} \{ \xi_0(|U_L| - U_L) + \xi_L(|U_L| + U_L) \} \right. \\ & \left. + \rho \frac{AU_0}{4} \{ \xi_L(|U_0| - U_0) + \xi_0(|U_0| + U_0) \} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, ξ_0 와 ξ_L 은 각각 터널 입구와 출구에서의 유동손실계수이다. 일반적으로 출구손실계수는 난류에서 1이며, 입구손실계수는 터널 입구의 형상에 영향을 받으므로 일반적으로 입구의 형상이 각진 사각모서리인 경우는 그 값이 0.5로 알려져 있다.⁽¹⁾

식(21)의 마지막 항은 자연풍에 의한 유동손실로 그 계산은 두 가지 방법이 적용된다. 하나의 방법은 자연풍이 U_n 의 속도로 터널 내를 관통하여 환기방향과 반대방향으로 불고 있을 경우로 그 압력손실을 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta P_w = \left(\xi_0 + \xi_L + \frac{\lambda L}{d_h} \right) \frac{\rho U_n^2}{2} \quad (23)$$

여기서, 자연풍의 속도는 일반적으로 터널 주유동의 반대방향으로 2.5 m/s라고 간주한다.

다른 하나의 방법은 해당지역의 풍향과 풍속에 대한 자료가 있는 경우로 터널의 입구나 출구 쪽에서 발생하는 자연풍에 대한 터널 내의 유동손실을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta P_w = & \frac{\rho}{2} (C_n \cos B_L \cdot U^2_{n,L} \\ & - C_n \cos B_0 \cdot U^2_{n,0}) \end{aligned} \quad (24)$$

B_0 과 B_L 는 각각 터널 입구와 출구를 향하여 부는 바람이 터널 종방향과 이루는 각도이다. C_n 은 재순환방지벽과 터널 출구의 벽면이 돌출되어 있는 경우에는 0.7, 재순환방지벽만 있는 경우에는 0.55, 돌출부와 낮은 측벽이 설치된 경우는 0.1, 낮은 측벽만 설치된 경우는 0.25 정도가

된다고 알려져 있다.⁽¹⁾

6) 터널 내의 압력평형식

위에서 계산한 각각의 힘의 요소들을 모두 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{A}{2} (U^2_L - U^2_0) = & \frac{\rho}{2} \int_0^L \left[(C_{DA} v)^+ \frac{N_+}{V_+} (V_+ - U) |V_+ - U| \right. \\ & \left. - (C_{DA} v)^- \frac{N_-}{V_-} (V_- + U) |V_- + U| \right] dx \\ & + \sum_{i=1}^n \left[\rho N_f A_f |U_f| K(U_f - U) \right]_i \\ & + 2\rho \int_0^L U [(1 - k_i) q_{in} - (1 - k_e) q_{out}] dx \\ & - \rho \frac{\lambda A_t}{2dh} \int_0^L U^2 dx \\ & + \rho A_t \sum_{i=1}^n \left[\frac{A_p}{A_t} U^2 \rho \cos \beta + \left(\frac{A_p}{A_t} U_s \right)^2 \right. \\ & \left. - 2 \frac{A_p}{A_t} U_p U \right]_i \\ & + \rho A_t \sum_{i=1}^n \left[2 \frac{A_p}{A_t} U_p U - \left(\frac{A_p}{A_t} U_s \right)^2 \right]_i \\ & + A_t \Delta P_w \end{aligned} \quad (25)$$

2.2.4 오염물질 확산방정식

터널 내부의 임의 제어체적에서 오염물질의 거동은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있으며 질량보존 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A \left(CU - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_x + AC_i q_i dx + S_v A dx = & \\ AC q_e dx + A \left(CU - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x+dx} + \frac{\partial C}{\partial t} A dx & \end{aligned} \quad (26)$$

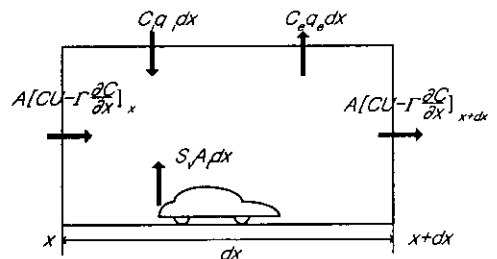


Fig. 5 Mass balance of pollutant for a control volume.

위 식을 연속방정식 식(4)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \Gamma \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - (C - C_i)q_i + S_v \quad (27)$$

위 식을 $\tau \equiv \frac{Ux}{L_i}$, $X \equiv \frac{x}{L_i}$, $Pe \equiv \frac{U_i L_i}{\Gamma}$ 로 무차원화하면 식(28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - (C - C_i) \frac{q_i L}{U} + \frac{LS_v}{U} \quad (28)$$

여기서, Pe 는 Peclet 수로서 대류량과 확산량의 비를 의미한다. 일반적으로 터널에서 유해가스의 확산계수 Γ 는 0.2~1.0 m²/s이며, 공기속도 U 는 4~7 m/s 정도이다. 따라서 장대터널의 경우는 Pe 의 크기는 10⁴을 넘는다. 그러므로 식(27)에서 우변 첫째 항을 무시할 수 있다. 또한 터널 내의 농도가 시간에 따라 급격히 변화하지 않는 정상상태로 가정하면 식(27)은 다음과 같은 최종 농도방정식으로 나타낼 수 있다.

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = -(C - C_i)q_i + S_v \quad (29)$$

오염물질 중 매연농도 규제는 중량기준으로 표시하지 않고 일반적으로 가시도, K 의 관점에서 허용농도를 정한다. 매연농도와 가시도의 상관관계는 일반적으로 다음 식으로 표현되는 MIRA의 관계식을 이용한다.⁽⁴⁾

$$K = 6.25C_s \quad (30)$$

설계시 고려되는 가시도는 100 m 전방을 기준으로 정한 값이므로 100 m 전방에서의 매연의 평균농도를 사용하여 구하였다.

2.3 국소속도 분포계산

터널 내 종방향 위치에 따른 공기의 국소속도

U 는 터널 입구속도 U_0 와 상대속도 U^* 의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U = U_0 + U^* \quad (31)$$

먼저 상대속도 U^* 는 연속방정식 식(4)에 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$\frac{dU^*}{dx} = q_i - q_e \quad (32)$$

상대속도 U^* 를 구하기 위해서 전체 터널길이 L 을 일정한 개수의 종방향 제어체적으로 분할하여 식(33)과 같이 나타내었다.

$$\frac{U_{j+1}^* - U_j^*}{\Delta x} = (q_i - q_e)_j \quad (33)$$

여기서 j 는 j 번째 제어체적이며, 또한 단위체적당 정미환기량 $(q_i - q_e)_j$ 는 제어체적에서 유출입되는 정미환기유량을 제어체적으로 나눈 값이다. 따라서 터널의 입출구 이외의 위치에서 터널 내로 유입되고 유출되는 유량이 알려지면 종방향 상대속도 U^* 를 구할 수 있다. 이제 터널의 입구속도 U_0 는 앞의 식(31)을 터널 내의 압력평형식인 식(25)에 대입하여 계산할 수 있다. 실제 계산에서는 U_0 의 반복오차가 0.001 m/s 이하일 경우를 수렴된 것으로 간주하였다.

2.4 오염물질 농도분포 산정

오염물질의 농도분포를 구하기 위하여 식(30)으로부터 다음과 같이 유해가스의 농도관계를 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{U_j + U_{j+1}}{2} \right) \left(\frac{C_{j+1} - C_j}{\Delta x} \right) = -Q_{i,j} \left(\frac{C_j + C_{j+1}}{2} \right) + (C_i Q_i + S_v)_j \quad (34)$$

여기서 $j=1$ 은 터널에서의 공기유입을 뜻하며,

유입구에서의 유해가스농도 C_1 을 0으로 두었다. 따라서 식(34)에 의하여 공기유동 방향으로 순차적으로 유해가스의 농도를 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소요환기량 계산 및 환기기 용량산정

개발 프로그램의 타당성 검토는 원칙적으로 다수의 실제 터널에서 교통량 및 주행 속도에 따른 터널내 풍속과 오염물질의 농도분포에 대한 실측 결과와의 비교가 바람직하나 현재 국내에는 이러한 자료가 전무한 실정이다.

본 연구에서는 한국도로공사의 설계자료에 제시된 다음과 같은 모델터널에 대해 그 타당성이 입증된 제어체적방법을 적용하여 터널 내 풍속을 계산하고 한국도로공사에서 제시한 기준배출량으로 오염물질 발생량을 계산하였고, 소요환기력 계산 및 터널 종방향에 따른 각 오염물질의 농도분포를 계산하였다.

비교 모델터널의 제원은 다음과 같다.

연장 : 3477 m	구배 : -0.3554%
고도 : 125.7 m	단면적 : 73.955 m ²
대표직경 : 8.155 m	차선수 : 2차로
추정교통량 :	
승용차 38,956 대/일	소형버스 3,124 대/일
대형버스 3,136 대/일	소형트럭 4,046 대/일
중형트럭 6,480 대/일	대형트럭 3,562 대/일
특수트럭 1,526 대/일	

Fig. 6은 차량 속도별 각 오염물질에 대한 본

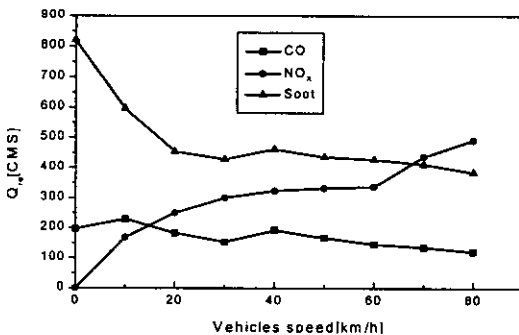


Fig. 6 Comparison of ventilation requirements for various speeds.

프로그램의 소요환기량 계산 결과이다. CO는 차량 주행속도 변화에 상관없이 소요환기량의 변화가 미소하며, NO_x는 차량 주행속도가 증가함에 따라 소요환기량이 증가하고 있다. Soot는 차량 주행속도가 저속인 경우에 그 소요환기량이 매우 큰 값을 나타내고 있다.

계산된 소요환기량으로 환기장치의 용량을 결정하기 위해서는 자연환기력 및 차량의 주행속도에 영향을 받는 교통환기력을 고려하여 각 오염물질별로 최대 환기승압력을 구해야 한다. 이때 터널 내 차량의 평균주행속도는 CO의 경우 지체교통시의 값인 10 km/h에서, NO_x는 전속도를 검토하여 최대 환기승압력을 산출하여 결정한다.

Fig. 7은 본 모델 터널의 각 오염물질별 차량의 평균주행속도에 따른 요구 환기승압력을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 CO의 경우 최대 환기승압력은 11.6 mmAq이고, NO_x는 차량 평균주행속도가 10 km/h일 때의 값 8.1 mmAq이다. Soot는 60 km/h일 때 가장 높은 승압력인 -36.5 mmAq로 나타났다. 이처럼 각 오염농도별 최대 환기승압력이 결정되면 그 값에 따른 적절한 환기장치를 설계하여야 한다.

본 연구에서는 모델터널이 일방향 터널의 구조이므로 교통환기력을 최대한 활용하기 위하여 선정 환기장치로 제트팬을 사용하였다. 제트팬은 구경에 따라 그 설치간격이 다르며 계산에 사용된 제트팬의 사양은 Table 3과 같다.⁽⁴⁾

위에서 계산한 승압력을 가지고 각 오염물질별 요구되는 제트팬 수를 계산하면 Table 4와 같다. 각 오염물질별로 제트팬 수를 비교하여 보면 CO

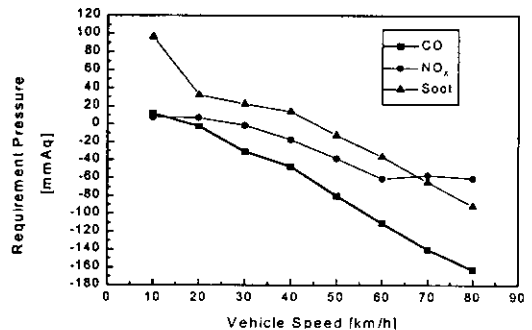


Fig. 7 Requirement pressure for various vehicle speeds.

Table 3 Specification of jet fan for tunnel

Type	Diameter [mm]	Cross. Area [m ²]	Discharge Velocity [m/s]	Install. Distance [m]
600	630	0.27	30	80
1000	1030	0.83	30	140
1500	1530	1.83	30	180

의 경우가 가장 많으므로 본 연구에서는 600형 제트팬 36대를 모델터널에 적용하여 각 오염물질별 터널 종방향의 농도분포를 계산하였다.

3.2 각 오염 물질별 농도분포

Fig. 8~Fig. 14는 제트팬 설치 전과 설치 후의 각 오염물질별 터널 종방향 농도분포이다. Fig. 8에서 제트팬 설치 전 CO의 농도분포를 살펴보면 차량속도가 선정속도인 10 km/h일 때에는 터널 입구로부터 약 1,100 m 지점에서 법정허용농

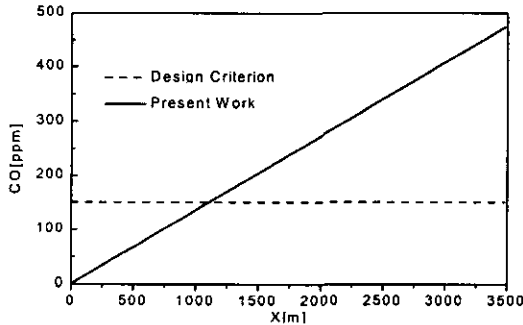


Fig. 8 Distribution of CO concentration in model tunnel without jet fans.

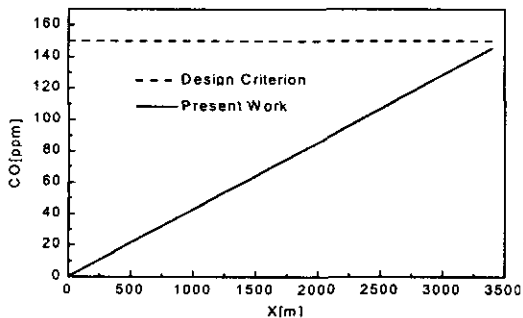


Fig. 9 Distribution of CO concentration in model tunnel with jet fans.

Table 4 Required number of jet fan

Contaminant	Jet Fan		
	T-600	T-1000	T-1500
CO	36 ea.	11 ea.	6 ea.
NO _x	22 ea.	7 ea.	3 ea.
Soot	None	None	None

도인 150 ppm을 넘어서 출구부분에는 그 농도가 약 473 ppm에 다다르고 있다. 제트팬 설치 후의 농도인 Fig. 9에서는 터널 전구간에서 그 농도가 허용농도 이하로 나타남을 볼 수 있으며, 출구부분의 최대값은 약 140 ppm이다.

차량속도가 10 km/h일 때의 NO_x는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 제트팬 설치 전에는 입구로부터 약 1,400 m 지점에서 허용농도인 25 ppm을 넘고 있다. 출구부분의 농도는 약 60 ppm이다. 제트팬 설치 후의 NO_x의 농도분포를 보면 터널 전구간에서 그 허용농도인 25 ppm 이하로 나타

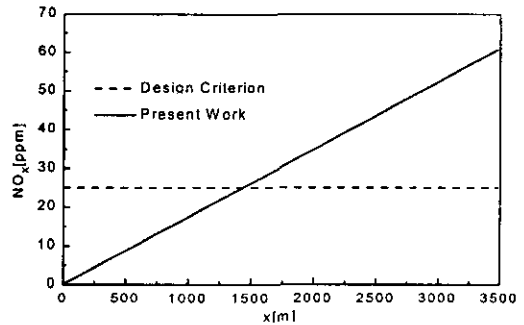


Fig. 10 Distribution of NO_x concentration in model tunnel without jet fans.

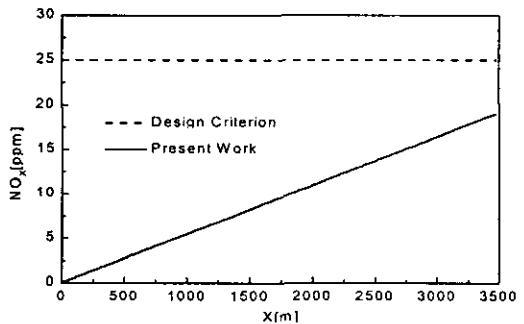


Fig. 11 Distribution of NO_x concentration in model tunnel with jet fans.

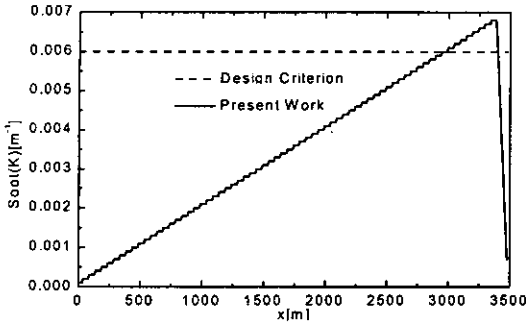


Fig. 12 Distribution of *soot(K)* concentration in model tunnel without jet fans.

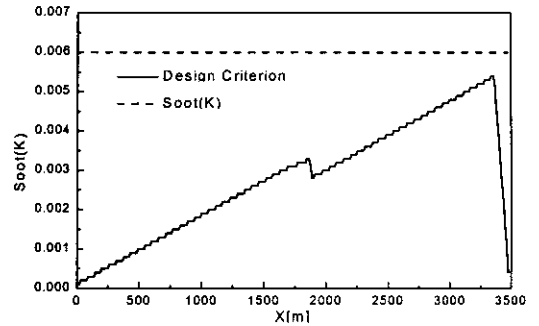


Fig. 14 Distribution of *soot(K)* concentration in model tunnel with electrostatic precipitator.

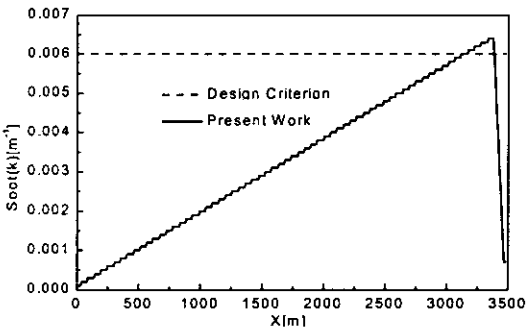


Fig. 13 Distribution of *soot(K)* concentration in model tunnel with jet fans.

났으며 최대값은 19 ppm이다. 그 값이 허용농도와 비교하여 매우 작은 이유는 최대환기승압력이 NO_x 보다 큰 CO 를 기준으로 제트팬의 용량을 결정하여 터널에 적용시켰기 때문이다.

마지막으로 Fig. 12~Fig. 14는 *soot*의 경우로 앞에서 언급한 것처럼 가시도를 가지고 종방향 분포를 나타내었다. 이때 차량의 속도는 선정속도인 60 km/h이다.

Fig. 12의 가시도 분포를 살펴보면 제트팬 설치 전은 그 최고치가 0.0068로 법정허용값인 0.006을 넘어서고 있다. Fig. 13의 제트팬 설치 후 그 최대값은 0.0064로 설치 전의 값보다는 낮으나 그 법정허용값은 초과함을 볼 수 있다. 따라서 *soot*에 의한 가시도의 최대값을 법정허용치로 낮추기 위해 전기집진기를 모델 터널에 적용하였다. 적용한 전기집진기는 토출면적 10 m^2 , 유량 $150\text{ m}^3/\text{s}$, 효율 80%로 터널의 1800 m 지점에 설치하여 그 가시도 분포를 계산하였다. Fig. 14에서 보듯이 터널 전구간에서 그 허용값인 0.006

이하로 나타났고 그 최대값은 0.0054이다.

따라서 본 모델 터널에 제트팬 36대와 유량이 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 인 전기집진기를 터널에 적용하면 모든 오염물질에 대한 법정허용기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 환기 설계기준에 대한 검토

3.3.1 터널 벽면마찰계수

위에서 언급한 대로 터널 내 벽면마찰계수에 따른 CO 의 농도분포를 Fig. 15에 표시하였다. 또한 Table 5에는 각각의 CO 농도분포를 법정허용치인 150 ppm으로 낮추기 위해 필요한 환기승압력을 계산하였다. Fig. 15를 보면 가장 작은 벽면마찰계수인 0.015의 경우는 터널출구부에서의 CO 농도가 367.9 ppm이고, 0.025인 경우는 473.9 ppm, 마지막으로 0.05인 경우는 1014 ppm으로 3배 정

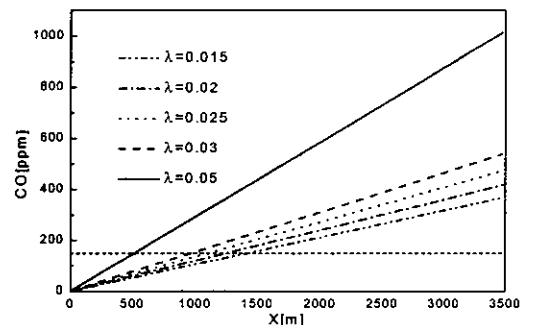


Fig. 15 Distribution of CO concentration in model tunnel for various dracy coefficients.

Table 5 Max. ventilation pressure with tunnel wall friction coefficient

Wall Friction Coeff. (λ)	Max. Ventilation Pressure
0.015	7.68 mmAq
0.020	9.60 mmAq
0.025	11.57 mmAq
0.03	13.55 mmAq
0.05	21.46 mmAq

도의 높은 농도분포를 나타낸다. 현재 한국도로공사에서는 터널 벽면마찰계수를 0.025로 제시하고 있으나 본 연구의 결과에서 보듯이 그 값의 차이에 따라 터널 내 오염물질의 농도 및 그에 따른 환기승압력의 차가 매우 크므로 터널 축벽 형태에 맞는 적절한 마찰계수를 사용하여야 한다.

3.3.2 자연풍의 영향

일반적으로 터널 내 자연풍의 영향은 터널 유동의 반대방향으로 2.5 m/s의 세기로 작용한다고 가정하고 설계한다. 그러나 자연풍이 항상 같은 방향과 세기를 가지고 터널 내에 작용한다고 볼 수는 없으므로 그 방향과 세기에 따라 다음과 같이 검토하였다.

Fig. 16에는 자연풍이 각각 2.5 m/s로 터널 유동방향으로 작용할 경우와 반대로 작용할 경우 그리고 자연풍이 작용하지 않는 경우의 CO의 농도분포를 나타냈었다. 또한 벽면마찰계수와 마찬가지로 그때의 최대 환기승압력을 Table 6과 같이 계산하였다. Fig. 16에서 보듯이 자연풍이 2.5 m/s의 세기로 터널 유동과 같은 방향으로 불

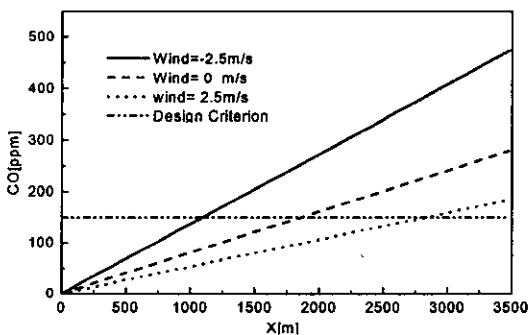


Fig. 16 Distribution of CO concentration in model tunnel for various speeds of natural wind.

Table 6 Max. ventilation pressure with natural wind velocity of tunnel

Wind Velocity	Max. Ventilation Pressure
-2.5 m/s	11.57 mmAq
0 m/s	7.07 mmAq
2.5 m/s	2.85 mmAq

경우 그 최대 농도는 183 ppm으로 나타났다. 그러나 같은 세기로 반대 방향으로 작용할 경우에는 그 최대치가 473.1 ppm으로서 그 차이는 약 2.5배 정도가 나는 결과를 얻었다. 이와 같은 결과로 터널 내 자연풍에 영향도 벽면마찰계수와 마찬가지로 환기장치 용량계산에 중요한 변수이므로 실제 터널의 주변 기상조건에 대한 조사 후 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한국도로공사에서 제시한 환기량 산정방법을 적용하여 도로 터널의 소요환기량 및 제어제적방법을 적용하여 특정 환기방식에 따라 터널 내의 국소속도 및 CO, NO_x, soot의 차량속도에 따른 종방향 농도분포에 대한 계산을 수행할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 따라서 본 전산 프로그램을 사용하여 특정 종류식 장대 차로 터널에 대한 환기량 설계가 이루어졌을 때 도로 터널 적용 설계기준치에 적합하게 설계되었는지를 판단할 수 있다.

마지막으로 프로그램의 타당성을 검토하기 위해서 한국도로공사에서 제시한 모델 터널을 가지고 이를 계산한 결과 현행 설계기법에 의한 환기량산정을 정확하게 계산할 수 있다는 것을 확인하였다.

또한 환기설계기준에 대한 검토로서 터널 외벽의 형상에 따른 터널 벽면마찰계수 및 자연풍의 영향이 터널 환기장치 용량계산에 크게 작용하므로 그 적용에 있어서 신중한 고려가 요구됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Charlse, F. S., 1979, Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels,

- Federal Highway Administ, Washington DC.
2. Kolon Construction Co., 1996, Study on Optimum Design for Ventilation System of Road Tunnel, Technical Report of Kolon Constuction Co.
 3. Yang P. S., 1997 Study on Ventilation Characteristics of Longitudinal Road tunnel, M.S. Thesis, Hanyang University.
 4. Korea Highway Corporation, 1997, Design Criteria of Ventilation Facility of Highway Tunnel, Technical Report of Korea Highway Corporation.
 5. Cho Y. C., Yu J. O., and Nam C. H., 1998, Road tunnel Ventilation System Design(II), Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27., No. 1, pp.37-52.
 6. Paker, C. R., 1993, Aerosol Science and Technology, Second Edition, McGraw-Hill.
 7. William, C. H., 1982, Aerosol Technology, John Wiley & Sons.