

종류식 도로터널내에서의 환기 거동에 관한 연구

양판석* · 조영진* · 이재현**

(1997년 12월 20일 접수)

A Study on the Ventilation in a Long Road Tunnel

Pan-Seok Yang, Young-Jin Cho and Jae-Heon Lee

Key Words : Road Tunnel(도로터널), Hazardous Gas(유해가스), Soot(매연), Extinction Coefficient(소광계수)

Abstract

Longitudinal distributions of the extinction coefficient and concentrations of hazardous gases in a long tunnel located in urban area have been predicted theoretically. The results are compared with design criteria. It is found that the maximum concentrations of both CO and NOx in the tunnel are lower than the design criteria. However, the maximum extinction coefficient, generally considered to be a governing factor for ventilating flow rate, is shown lower than the design criterion. Therefore, it is suggested that the design criterion of the extinction coefficient should be increased to a slightly larger value.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

산악지형을 통과하는 도로건설시에는 주행시간 단축등 교통편의를 위하여 많은 터널이 건설되고 있다. 최근에는 동식물 생태계 보존을 위하여서도 터널 건설의 필요성이 높아지고 있다. 도로터널에서는 터널 입지선정 및 시공방식등 여러 문제가 있으나, 특히 최근에는 안전하고 쾌적한 주행 환경 확보를 위해 터널내 환기문제가 중요하게 대두되고 있다. 자동차 배기가스 중의 유해 물질에는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 그리고 탄화수소(THC) 등이 있으나, 일반적으로 일산화탄소의 농도기준에 맞추어 환기를 실시하면 기타 유해가스 성분은 안전한 농도로 유지될 수 있음이 알려져 있다.⁽¹⁾ 또한 터널내의 시계(visibility)는 부분적으로

타이어에 붙어있는 토사나 노면과 타이어의 마모로 인해 발생된 분진 등의 영향을 받으나, 주로 디젤 차량의 배기가스 중에 함유되어 있는 매연(soot)의 영향을 받는다.

본 연구에서는 현재 부산에 건설되고 있는 종류식 장대 터널인 S 터널에서 터널내의 종방향 공기 속도분포, 유해가스 농도분포, 그리고 매연에 의한 소광계수의 분포를 예측하고, 이 결과를 통해 설계 시 적용된 환기량산정 기준치에 관해 검토하여 보고자 한다.

1.2 터널의 환기 방식

도로 터널은 환기방식에 따라 자연환기식 터널 및 기계환기식 터널로 분류할 수 있다. 기계환기식 터널은 터널내 공기 유동을 일으키기 위한 기계설비가 있는 터널이고, 자연환기식 터널은 그렇지 않은 터널을 말한다. 기계환기식 터널은 크게 세가지로 분류할 수 있으며 이를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 (a)는 종류식 터널, (b)는 반횡류식 터

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

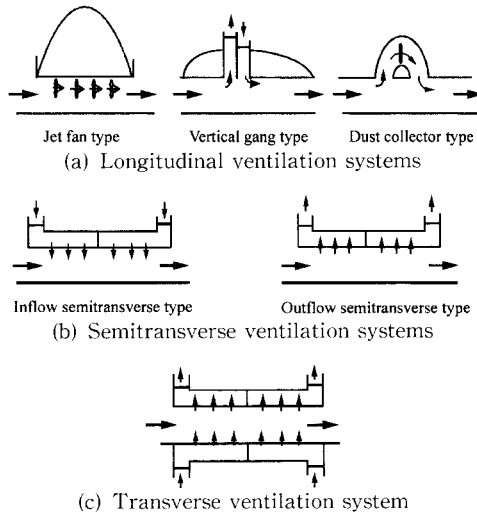


Fig. 1 Ventilation systems of road tunnels at side view.

널, 그리고 (c)는 횡류식 터널이다. 여기서 종류식 터널은 제트팬, 환기탑 또는 집진기에 의해 환기가 이루어지는 터널이고, 반횡류식이나 횡류식 터널은 터널 벽면에 설치된 덕트를 이용하여 환기가 이루어지는 터널이다. 반횡류식은 벽면 덕트를 통해 공기의 유입이나 유출만 있는 경우이고, 횡류식은 유입과 유출이 모두 있다. 그림에서 (a)의 왼쪽이 제트팬식, 중앙이 집중송배기식, 오른쪽이 집진기식이고 (b)의 왼쪽이 송기반횡류식, 오른쪽이 배기반횡류식, 그리고 (c)는 횡류식이다. 본 연구에서는 종류식 터널로서 제트팬과 집진기를 통해 환기가 이루어지는 부산 S 터널을 연구모델로 선정하였다.

1.3 연구 대상 터널

본 연구에서 연구모델로 선정한 부산 S 터널의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구의 모델터널은 그림에서 보는 바와 같이 8대의 세트팬 및 2대의 집진기가 설치된 기계환기방식의 일방향 터널이며, 그 제원은 총연장(L_t) 2330 m, 본선 터널 단면적 A-A(A_t) 61.7 m², 본선 터널 폭(W_t) 11 m, 본선 터널 높이(H_t) 8 m, 경사(θ) 2%, 차량 평균속력(V) 60 km/h, 대형차 혼입률(Φ) 16.2%, 그리고 통과차량수는 최대 2200 pcu/(h·lane)이다. 여기서 pcu(passenger car unit)는 승용차 한 대를 뜻하며, 버스나 트럭의 경우에는 승용차환산계수를 사용하여 pcu로 환산된다. 8대의 세트팬

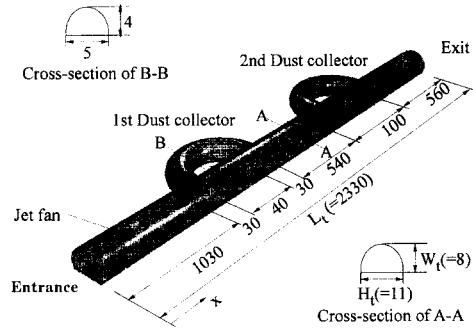


Fig. 2 Schematic diagram of the model tunnel (unit: m).

(토출단면 $A_r=0.83$ m², 유량 $Q_r=25$ m³/s/대, 토출속도, $U_r=30$ m/s, 정압상승 $\Delta P_r=13.79$ Pa/대)은 터널 입구에서부터 160, 320, 480 및 640 m 지점에 각각 2대씩 설치된다. 그림에서 제1집진기와 제2집진기로 표시된 두 대의 집진기(토출단면 $A_c=10$ m², 효율 $\eta_c=80\%$, 유량 $Q_c=300$ m³/s/대, 정압상승 $\Delta P_c=128.67$ Pa/대)는 터널 입구에서부터 각각 1080 및 1720 m 지점에 설치되어 터널내 오염된 공기가 여과될 수 있게 하였다.⁽²⁾

2. 간이환기량 산정법

터널 기본 설계 단계에서 환기량 산정은 터널 환기방식, 터널 단면, 그리고 환기설비 결정에 필요한 중요한 요소 중의 하나이다. 아래에는 CO와 NOx 기준 및 매연 기준 환기량 산정법을 나타내며, 실제 소요환기량은 둘 중 큰 값을 환기량으로 결정한다.

간이환기량 산정 방법을 제시한 한국도로공사 환기설비 설계기준⁽³⁾에서는 CO와 NOx 기준 환기량 Q_h [m³/s] 및 매연 기준 환기량 Q_s [m³/s]를 각각 아래식으로 산정하도록 추천하고 있다.

$$Q_h = \frac{q_h \times f_i \times f_v \times f_h}{3600} \times N_{pc} \times \frac{10^6}{P_{lim}} \times L_t \times N_t \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{1}{3600} \times \frac{q_s}{K_{lim}} \times f_{iv} \times f_h \times N_{pc} \times L_t \times N_t \quad (2)$$

여기서 q_h 는 pcu당 시간당 CO 또는 NOx 배출량 [m³/(pcu·h)]이며, f_i , f_v 및 f_h 는 각각 터널 구배, 차량 속도, 그리고 터널 고도에 따라 결정되는 각 유해가스별 배출량 보정계수⁽³⁾이다. 구배보정계수는 터널의 구배가 0일 때 배출되는 유해가스

에 대한 터널의 실제 구배에서 배출되는 유해가스의 비율로서, 터널의 구배가 증가할수록 커지며 구배가 감소할수록 작아진다. 속도보정계수는 규정된 속도에서 배출되는 유해가스에 대한 실제 차량 운행속도에서 배출되는 유해가스의 비율로서 속도가 증가할수록 커지며 속도가 감소할수록 작아진다. 고도보정계수는 해발고도에서 배출되는 유해가스에 대한 터널의 실제 고도에서 배출되는 유해가스의 비율로서 고도가 높아질수록 커진다. 이런 계수들은 유해가스별로 서로 다른 값을 갖는다. 또 q_s 는 pcu 당 시간당 매연 배출 기본값 [$\text{m}^3/(\text{pcu} \cdot \text{h})$], K_{lim} 와 f_{iw} 는 각각 최대 허용 소광계수 [m^{-1}], 그리고 차량속도와 터널구배에 따라 결정되는 매연의 배출량을 보정하는 속도-구배 보정계수이다. 그리고 N_{pc} , P_{lim} , L_t 및 N_l 은 각각 차선당 km 당 pcu 수 [$\text{pcu}/(\text{lane} \cdot \text{km})$], 유해가스 최대 허용 농도 [ppm], 터널의 길이 [km], 그리고 차선수이다.

그러나 식(1)와 (2)에서 결정된 환기량에 의해 환기를 실시할 경우 터널내 유해가스 및 매연의 농도가 구간내 어느 영역에서나 설계기준치 이하로 유지될 것인가라는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 터널을 유한개의 터널 종방향 제어체적으로 분할한 후 각 제어체적에 연속방정식을 적용함으로써 상대속도를 구하고, 이 값들을 터널 전체의 적분형 운동량방정식에 적용하여 터널입구 공기속도를 구한다. 이어서 터널입구 공기속도와 상대속도를 이용하여 국부적인 공기유동속도를 구한다. 마지막으로 상기 제어체적에 농도방정식을 적용하여 터널 종방향에 따른 유해가스 및 소광계수의 분포를 구한다.

3. 공기 유속 분포

3.1 운동량 방정식

Fig. 3에는 길이가 L_t , 단면이 A_t 이며, θ 의 각

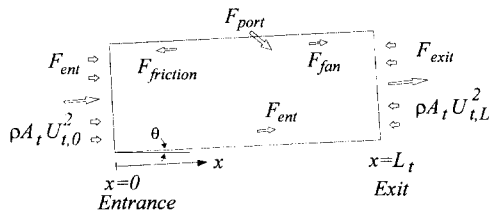


Fig. 3 Conservation of momentum for a entire tunnel.

도로 경사진 터널에 작용하는 여러 가지 힘요소를 나타내었다. 그림에서 좌표 x 는 터널의 종방향을 나타내며, 입구에서 출구방향을 양의 방향으로 정한다.

터널의 공기를 가속시키는 힘은 터널에 작용하는 전체 외력의 합이므로 운동량보존법칙을 적용하면 다음과 같은 방정식을 세울 수 있다.

$$\rho A_t (U_{t,L}^2 - U_{t,0}^2) = F_{\text{piston}} + F_{\text{fan}} + F_{\text{port}} - F_{\text{friction}} + F_{\text{ent}} - F_{\text{exit}} \quad (3)$$

여기서 U 는 터널 종방향 주유동의 단면 평균 공기유속을 말하며, 하첨자 t , L 및 0 은 각각 터널, 터널 출구 및 터널 입구를 말한다. 위식의 좌변은 터널의 공기를 터널의 입구속도 $U_{t,0}$ 에서 터널의 출구속도 $U_{t,L}$ 로 가속시키는데 필요한 힘이다. 또 우변의 첫째항 F_{piston} 는 터널내를 통과하는 차량의 피스톤효과, 둘째항 F_{fan} 는 터널내 제트팬에 의한 추진력, 셋째항 F_{port} 는 터널내 환기포트 출입 공기유동에 의한 힘, 넷째항 F_{friction} 은 터널내 벽면 마찰에 의한 유동 손실, 다섯째항 F_{ent} 는 터널 입구에서의 유동손실, 그리고 여섯째항 F_{exit} 는 터널 출구에서의 유동손실이다. 식(3)의 우변 각 항은 다음과 같다.

식(3)의 우변 첫째항 F_{piston} 는 차량의 피스톤효과에 의한 힘으로서 다음 식과 같이 표현된다.

$$F_{\text{piston}} = \frac{\rho}{2} C_D A_v N \int_0^{L_t} |V - U_{t,x}| (V - U_{t,x}) dx \quad (4)$$

여기서 C_D , A_v , N 및 V 는 각각 차량의 항력계수, 차량의 전면투영면적, 단위 터널 길이당 차량수 및 차량 평균속도이다. 차량의 항력계수와 전면투영면적은 일본도로공단에서 실물크기의 도로주행시험을 통하여 얻은 자료를 사용하였다.⁽⁴⁾ 이 자료에 따르면 본 터널 단면적의 경우 소형차의 전면투영면적 및 항력계수는 각각 2.31 m^2 과 0.645 이며, 대형차의 경우에는 각각 7.11 m^2 과 1.26 이다. 대형차 혼입률을 Φ 라고 할 때, 차량의 항력계수 C_D 와 전면투영면적 A_v 의 곱은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D A_v = (1 - \Phi) (C_D A_v)_s + \Phi (C_D A_v)_l \quad (5)$$

여기서 하첨자 s 와 l 은 각각 소형차 및 대형차를 말한다.

식(3)의 우변 둘째항 F_{fan} 는 제트팬에 의해 생성

되는 힘으로서 제트팬이 n 개의 위치에 설치되어 있을 경우 다음 식과 같이 표현된다.

$$F_{fan} = \sum_{i=1}^n (\rho N_f A_f |U_f| (U_f - U_{t,x}) |k_f)_i \quad (6)$$

여기서 N_f , A_f 및 U_f 는 각각 한 위치에 설치된 제트팬수, 제트팬 출구 유동단면적, 그리고 제트팬 토출속도이다. 실제 터널에서 제트팬은 터널의 천정이나 측벽 부근에 설치되므로 비대칭성으로 인한 국부적인 와류등의 현상을 감안하여 유동손실계수 k_f 를 도입하며, 그 범위는 1.0~1.2이라고 한다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 유동손실계수 k_f 값으로 1.1을 사용하였다.

식(3)의 우변 셋째항 F_{port} 는 환기포트 출입 공기에 의한 추진력으로서 터널 전체에 m 개의 집진기 또는 수직갱이 설치되어 있을 경우에 유입구 유동이 터널 전체유동에 미치는 힘 F_{port} 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$F_{port} = \rho A_t \times \sum_{k=1}^m \left(\left(\frac{A_c}{A_t} U_c \right)^2 + \frac{A_c}{A_t} U_c^2 \cos \alpha - 2 \frac{A_c}{A_t} U_c U_{t,x} \right)_k \quad (7)$$

여기서 A_c , U_c 및 α 는 각각 터널 내로 토출되는 공기의 유동단면, 토출 속도 및 터널 종방향과 토출유동이 이루는 각도이다. 참고로 터널로부터 집진기 또는 수직갱으로 유출되는 공기에 의한 종방향 운동량 유출은 무시할만하므로 고려하지 않는다.

식(3)의 우변 넷째항 $F_{friction}$ 은 터널벽면에서의 마찰손실로서 다음과 같이 표현된다.

$$F_{friction} = \rho \lambda \frac{A_t}{2d_n} \int_0^L U_{t,x}^2 dx \quad (8)$$

여기서 λ 및 d_n 는 각각 터널 벽면마찰계수 및 터널의 수력학적 지름을 나타낸다. 벽면마찰계수 λ 는 수력학적지름, 레이놀즈수 및 벽면의 조도에 관련되어있으나, 일본 후쿠시마 터널에 대한 연구⁽⁶⁾에서 실측 자료와 계산결과 비교를 통해 산출된 결과를 보면 일반적인 고속도로 터널에서 λ 는 0.025, 그리고 보행자 통로 등과 같이 터널내에 유동손실을 일으키는 부가적인 시설이 있는 경우에는 λ 는 0.030으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 97년 고속도로 환기시설기준⁽³⁾에 따라 λ 는 0.025로 선택하였다.

식(3)의 우변 마지막 두 항 F_{ent} 와 F_{exit} 는 터널

입구와 출구에서의 유동손실로서 터널 입구와 출구에서의 압력손실, ΔP_0 와 ΔP_L 및 터널 입구와 출구를 향하여 부는 맞바람에 의한 영향 ΔP_w 등이 포함될 수 있으며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_{ent} - F_{exit} = -A_t (\Delta P_0 + \Delta P_L + \Delta P_w) \quad (9)$$

터널 입구와 출구에서의 유동손실, ΔP_0 와 ΔP_L 은 유동 단면의 급격한 변화에 의하여 나타나는 값이며, 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_0 = \xi_0 \frac{\rho U_{t,0}^2}{2} \quad (10)$$

$$\Delta P_L = \xi_L \frac{\rho U_{t,L}^2}{2} \quad (11)$$

여기서 ξ_0 와 ξ_L 은 각각 터널입구와 출구에서의 유동손실계수이며, 그 값으로는 각각 0.6 및 1.0이 추천된다.

터널 입구와 출구를 향하여 부는 맞바람에 의한 영향 ΔP_w 는 주위 대기의 상태에 따라 큰 변화를 보인다. 맞바람은 터널 전체유동에 유리하게 작용할 수도 있으나, 그렇지 않을 수도 있다. 심지어는 환기방향과 반대로 터널을 관통하는 바람이 불수도 있다. 따라서 환기 설비 설계시에는 맞바람이 터널을 관통하는 최악의 상황을 고려하여 설계가 이루어진다. 맞바람에 의해 터널내에 환기방향과 반대 방향으로 자연풍이 U_n 의 속력으로 터널을 관통하여 불고 있을 때 터널에 미치는 압력손실 ΔP_w 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_w = \left(\xi_0 + \xi_L + \lambda \frac{L_t}{d_n} \right) \frac{\rho U_n^2}{2} \quad (12)$$

여기서 자연풍의 속력에 대한 정량적인 자료를 얻기란 사실상 어렵기 때문에 터널 환기 설비 설계시에서는 자연풍의 속도 U_n 을 2~3 m/s로 간주한다.⁽¹⁾ 그러나, 실제로 터널 주위에 부는 바람이 터널내의 유동에 영향을 미치는 경우는 다음과 같다. 터널의 입구와 출구에서 각각 $U_{n,0}$ 와 $U_{n,L}$ 의 속력으로 터널을 등지는 바람이 불고 있는 경우이며, 이때 터널의 공기유동에 미치는 압력손실 ΔP_w 를 구하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta P_w = \frac{\rho}{2} (\cos \beta_L \cdot U_{n,L}^2 - \cos \beta_0 \cdot U_{n,0}^2) \quad (13)$$

여기서, β_0 와 β_L 은 각각 입구 및 출구를 향하여 부는 바람이 터널 종방향과 이루는 각도이다. 식

(13)을 살펴보면 출구를 향하여 부는 바람의 속력이 클수록, 그리고 터널 입구를 향해 부는 바람의 속력이 작을수록 많은 압력손실을 가져온다. 따라서 해당 지역의 풍속 및 풍향에 관한 자료가 입수된다면, 식(12)보다는 식(13)을 이용하는 것이 바람직하다고 본다.

3.2 연속방정식

터널내 공기유동은 고속이 아니므로 비압축성이며 축방향 유동성분이 지배적인 1차원으로 가정할 수 있다. Fig. 4와 같이 단면 A_t 와 공기밀도 ρ 가 일정한 터널의 종방향 제어체적에서 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dU_{t,x}}{dx} = q_i - q_e \quad (14)$$

여기서 유량 q_i 와 q_e 는 터널 단위체적당 유입되고 유출되는 환기공기량이다.

4. 유해가스 농도 분포

터널내 CO, NOx 및 매연 등 유해가스의 종방향 농도분포는 터널 종방향 입의 단면에서 농도가 일정하다고 가정하여 1차원으로 해석될 수 있다. 터널내 유해가스의 농도분포를 구하기 위하여 Fig. 5에는 터널 제어체적에서 유해가스의 발생과 출입을 나타내었다. 이 제어체적에 유해가스의 질량보

존법칙을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & A_t \left(CU_{t,x} - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_x + A_t C_{in} q_i dx + S_v A_t dx \\ &= A_t C q_e dx + A_t \left(CU_{t,x} - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x+dx} \\ &+ \frac{\partial C}{\partial t} A_t dx \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 C , C_{in} , Γ , S_v 그리고 t 는 각각 제어체적의 유해가스농도, 집진기나 터널내 덕트등 기계환기시스템을 통해 제어체적으로 유입되는 공기의 유해가스농도, 유해가스의 확산계수, 차량에 의해 단위시간당 발생하는 유해가스의 양, 그리고 시간이다. 식(15)에서 좌변 첫째항은 대류와 확산에 의해서 제어체적으로 유입되는 유해가스량, 둘째항은 기계환기시스템을 통해서 제어체적으로 유입되는 유해가스량, 그리고 셋째항은 제어체적내의 차량에 의해 발생하는 유해가스량이다. 우변 첫째항은 기계환기시스템에 의해 터널 외부로 유출되는 유해가스량, 둘째항은 대류와 확산에 의해 제어체적 밖으로 유출되는 유해가스량, 그리고 마지막 항은 제어체적내에서 단위시간당 제어체적내 유해가스의 증가량이다. 식(15)에 식(14)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_{t,x} \frac{\partial C}{\partial x} = \Gamma \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - (C - C_{in}) q_i + S_v \quad (16)$$

상기 식에서 각 항의 상대적인 크기를 조사하기 위하여서 다음과 같은 무차원수를 도입하였다.

$$\tau \equiv \frac{U_{t,x} t}{L_t}, \quad X \equiv \frac{x}{L_t}, \quad Pe \equiv \frac{U_{t,x} L_t}{\Gamma} \quad (17)$$

여기서 Pe 는 Peclet수로서 대류량과 확산량의 비를 나타낸다. 식(17)를 식(16)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - (C - C_{in}) \frac{q_i L_t}{U_{t,x}} + \frac{L_t S_v}{U_{t,x}} \quad (18)$$

일반적으로 터널에서 공기속도 U_t 는 4~7 m/s 정도이며 이때 확산계수 Γ 는 0.2~1.0 m²/s이다.⁽⁷⁾ 따라서 장대터널의 경우(터널길이 L_t 가 1500 m 이상)는 Pe 의 크기는 10⁴을 넘는다. 그러므로, 식(18)의 우변 첫항을 무시할 수가 있다. 따라서 정상상태의 농도에 관심이 있는 본 연구에서는 다음과 같은 최

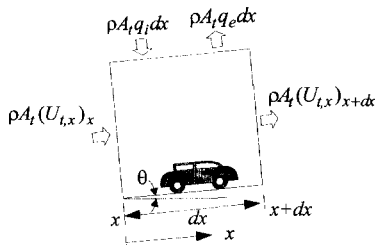


Fig. 4 Conservation of mass for a control volume.

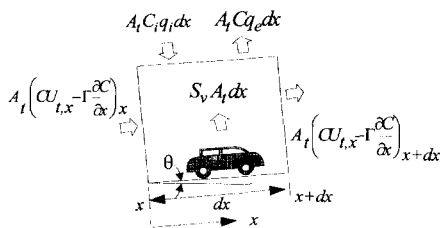


Fig. 5 Mass balance of pollutant for a control volume.

중 농도방정식을 얻을 수 있다.

$$U_{t,x} \frac{dC}{dx} = -(C - C_{in}) q_i + S_p \quad (19)$$

5. 가시거리 산정

매연의 경우에는 매연 자체의 농도보다는 매연에 의한 가시도(visibility)의 변화에 관심이 있으며, 가시도는 일반적으로 매연농도에 의해 결정되는 소광계수(extinction coefficient, K)에 의해 표현된다. 소광계수 K 는 입자의 지름을 d_p , 매연의 부피농도를 C_p , 매연의 소광효율(Extinction efficiency)을 E_p , 그리고 매연의 부피농도중 소광현상에 관계된 입자상 물질의 비율을 ϕ 라 할 때 다음과 같이 정의된다.⁽⁸⁾

$$K = \frac{1.5\phi C_p E_p}{d_p} \quad (20)$$

여기서 소광효율 E_p 는 입자단면적에 따른 빛의 차단량에 대한 입자의 분산 및 흡수 등에 의한 빛의 제거량의 비를 말한다. 본 연구에서는 소광효율 E_p 를 구하기 위하여 매연은 입자지름 d_p 가 0.1 μm 인 구형입자, 그리고 터널내 빛의 파장을 0.52 μm 로 간주하여 소광효율 E_p 를 0.75로 정하였다.⁽⁹⁾ 그리고 탈황연료를 사용하고 미국의 94년 오염물질 규제를 만족하는 엔진에서 얻은 입자상 물질의 구성비 ϕ 는 57%이다.⁽¹⁰⁾ 설계시 고려되는 소광계수는 100 m 전방을 기준한 값이므로 100 m 전방에서의 매연의 평균농도를 사용하여 식(20)을 통하여 소광계수의 분포를 구한다.

6. 국소분포계산

6.1 공기 유속분포 산정

터널 종방향 위치에 따른 공기의 국소속도 $U_{t,x}$ 는 터널 입구속도 $U_{t,0}$ 와 상대속도 $U^*_{t,x}$ 의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U_{t,x} = U_{t,0} + U^*_{t,x} \quad (21)$$

위식에서 보는 바와같이 속도 $U^*_{t,x}$ 는 터널 입구속도 $U_{t,0}$ 에 대한 국소속도 $U_{t,x}$ 의 상대속도이다. 본 연구에서는 입구속도 $U_{t,0}$ 와 상대속도 $U^*_{t,x}$ 를 개별적으로 구한 후 이 값들을 식(21)에 대입하여 국소속도 $U_{t,x}$ 를 구한다.

먼저 상대속도 $U^*_{t,x}$ 를 구하기 위해 식(21)을 식(14)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{dU^*_{t,x}}{dx} = q_i - q_e \quad (22)$$

상대속도 $U^*_{t,x}$ 를 구하기 위해서는 전체 터널 길이 L_t 를 일정한 개수의 종방향 제어체적으로 분할하는 방법을 이용한다. 식(22)로부터 Δx 간격의 제어체적에서의 국소속도의 관계는 다음과 같은 이산화방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{U^*_{t,i+1} - U^*_{t,i}}{\Delta x} = (q_i - q_e)_j \quad (23)$$

여기서 j 는 j 번째 제어체적을 말하며, $U^*_{t,i}$ 는 j 번째 제어체적의 왼쪽 경계면에서의 국소속도를 말한다. $j=1$ 인 경우 $U^*_{t,1}$ 는 0이 된다. 또 터널 단위 체적당 정미환기유량 $(q_i - q_e)_j$ 는 제어체적에서 입출되는 정미환기유량을 제어체적의 부피로 나눈 값이다. 그러므로 터널의 입출구 이외의 위치에서 터널내로 유입되고 유출되는 유량이 알려지면 종방향 국소속도 $U^*_{t,x}$ 를 구할 수 있다.

이제 터널 입구속도 $U_{t,0}$ 를 구하기 위하여 식(21)을 식(3)에 대입하여 다음과 같이 정리하였다.

$$\begin{aligned} & U_{t,0} \left(C_D \frac{A_v}{A_t} N \int_0^L |V - U_{t,0} - U^*_{t,x}| dx \right. \\ & + 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_f A_f |U_f|}{k_f A_t} \right)_i + 4 \sum_{k=1}^m \left(\frac{A_c}{A_t} U_c \right)_k + 4 U^*_{t,L} \\ & + \frac{\lambda}{d_h} \int_0^L |U_{t,0} + U^*_{t,x}| dx + \xi_0 U_{t,0} + \xi_L U_{t,0} \\ & + 2 \xi_L U^*_{t,L} \Big) = - \left(\xi_0 + \xi_L + \lambda \frac{L_t}{d_h} \right) \frac{\rho U_n^2}{2} - \frac{\rho}{2} \\ & \cdot (\cos \beta_L \cdot U_{n,L}^2 - \cos \beta_0 \cdot U_{n,0}^2) + 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_f A_f |U_f|}{k_f A_t} \right. \\ & \cdot (U_f - U^*_{t,x}) \Big)_i + C_D \frac{A_v}{A_t} N \int_0^L (V - U^*_{t,x}) |V \\ & - U_{t,0} - U^*_{t,x}| dx + 2 \sum_{k=1}^m \left(\left(\frac{A_c}{A_t} U_c \right)^2 + \frac{A_c}{A_t} U_c^2 \cos \alpha \right. \\ & \left. - \frac{2 A_c}{A_t} U_c U^*_{t,x} \right)_k - \frac{\lambda}{d_h} \int_0^L U^*_{t,x} |U_{t,0} + U^*_{t,x}| dx \\ & - \xi_L (U^*_{t,L})^2 - 2 (U^*_{t,L})^2 \quad (24) \end{aligned}$$

위식에서 터널 입구 공기속도 $U_{t,0}$ 이외의 모든 항은 터널 환기 자료로부터 구하여질 수 있으므로 반복법을 사용하여 이 값을 구할 수 있다. 실제 계산에서는 터널 입구 공기속도 $U_{t,0}$ 의 반복오차가 0.001 m/s 이하일 때 수렴된 것으로 간주하였다.

정리하면 상대속도에 대한 차분화된 식(23)으로

부터 각각의 상대속도 $U^*_{i,x}$ 를 구하고, 식(24)로부터 터널 입구속도 $U_{i,0}$ 를 구하여 식(21)에 각 값을 대입함으로써 터널 종방향 국소속도 $U_{i,x}$ 를 구할 수 있다.

6.2 유해가스 농도분포 산정

CO, NOx 및 매연 등 유해가스의 농도를 구하기 위해 식(19)로부터 Δx 만큼 떨어진 j 번째 제어체적과 $j+1$ 번째 제어체적의 유해가스의 농도관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{U_j+U_{j-1}}{2}\right)\left(\frac{C_{j+1}-C_j}{\Delta x}\right) = -Q_{i,j}\left(\frac{C_j+C_{j-1}}{2}\right) + (C_m Q_i + S_v)_j \quad (25)$$

여기서 $j=1$ 은 터널에서 공기 유입구를 뜻하며, 유입구에서의 유해가스농도 C_1 을 0으로 두었다. 따라서 식(25)에 의하여 공기유동 방향으로 진행하면서 순차적으로 유해가스농도를 구할 수 있다. 단기회환기시스템에 의해 유입된 공기에 의해 터널내부에서 공기속도가 0이 되는 제어체적에서는 농도구배를 0으로 하였다.

본 연구의 모델 터널에서는 차종구성비, 보정계수(차속 60 km/h 기준)를 고려하여 터널 제어체적에서의 단위시간당 유해가스발생량 S_v 를 CO, NOx 및 매연의 경우 각각 5.191×10^{-2} , 4.204×10^{-2} 및 5.292×10^{-6} ppm/s로 하였으며 각 오염물질에 따른 속도보정계수, 구배보정계수 그리고 고도보정계수들은 한국도로공사 설비기준⁽³⁾을 따랐다. 또한 터널의 집진기 접속구에서 단위체적당 집진기를 통해 유입되고 유출되는 유량 q_i 와 q_e 는 모두 $0.1621 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 로 하였다.

7. 결과 및 고찰

7.1 1차원 해석적 방법에 의한 타당성 검증

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 일차원 해석적인 방법을 사용하여 터널내 평균 공기유속을 구하고, 이 값과 본 연구에서 구한 값을 비교하였다. 터널내 평균 공기유속이 \bar{U}_t 이고, 자연풍 U_n 이 터널 입구방향으로 불고 있을 때 터널내의 유동손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum \Delta p_{loss} = \frac{\rho}{2} \left(\xi_0 + \xi_L + \lambda \frac{L_t}{d_h} \right) (\bar{U}_t^2 + U_n^2) \quad (26)$$

여기서 입구손실계수 ξ_0 는 0.6, 출구손실계수 ξ_L

는 1.0, 벽면마찰계수 λ 는 0.025 ,⁽³⁾ 그리고 자연풍은 입구방향으로 2.5 m/s ⁽¹⁾로 놓았다. 상기의 유동손실과 균형을 이루는 정압상승은 자동차의 피스톤효과, 제트팬 및 집진기 토출 유동에 의해 이루어지며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum \Delta p_{gain} = \frac{\rho}{2} \frac{C_D A_v}{A_t} N_{pc} N_t L_t (V - \bar{U}_t) |V - \bar{U}_t| + \Delta P_f + \Delta P_c \quad (27)$$

여기서 우변 세개의 항은 각각 자동차의 피스톤효과, 제트팬에 의한 압력상승 및 집진기 토출 유동에 의한 압력상승이다. 제트팬에 의한 압력상승 ΔP_f 는 $13.79 \text{ Pa/대} \times 8\text{대}$, 집진기 토출 유동에 의한 압력상승 ΔP_c 는 $128.67 \text{ Pa/대} \times 2\text{대}$ 이다.⁽²⁾ 차량의 항력계수 C_D 와 전면투영면적 A_v 의 곱은 식(5)로부터 구할 수 있다. 이때 대형차 혼입률 ϕ 는 16.2%이다. 차선당 km당 차량수 N_{pc} [pcu/(lane·km)]는 한국도로공사에서 제시한 값을 따라 Table 1에 제시하였다. 차선수 N_t 은 2차선이고, 터널길이 L_t 는 2.33 km이다.

터널에서의 유동손실과 압력상승이 균형을 이루므로 식(26)과 식(27)을 등가시켜 1차원 해석방법에 의한 터널내의 평균공기 유속을 구하고 제어체적 방법과 간이환기량 산정법을 이용하여 구한 각각의 평균공기유속을 차속에 따라 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 점선은 일차원 해석적인 방법(1-D analytic method)에 의하여 구한 값을 나타내고,

Table 1 Vehicle numbers, N_{pc} [pcu/(lane·km)] with various car speeds, V [km/h].

V	0	10	20	30	40	50	60	70	80
N_{pc}	89.6	65.1	49.6	39.4	31.7	26.3	22.1	19.1	16.1

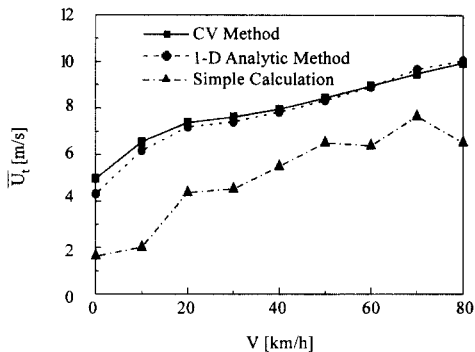


Fig. 6 Average air velocity with various car speeds.

실선은 제어체적 방법(control volume method, 이하 CV method로 칭함)을 이용한 터널 내 평균공기유속을 의미한다. 또한 일점채선은 간이환기량 산정법을 이용하여 구한 터널 내 평균공기유속이다. 간이환기량 산정법(simple calculation)에 의한 평균공기유속이 10 km/h 이하에서 낮게 산정되는 것은 저속인 경우의 필요환기량이 CO의 오염도 한계치에 의해 결정되기 때문이다.

제어체적 방법으로 구한 평균공기유속은 일차원 해석적 방법에 의한 값과 거의 일치함을 볼 수 있다. 제어체적 방법에 의한 평균공기유속은 차속이 0 km/h 일 때는 해석해를 기준으로 14%의 상대오차가 있으나, 그 밖의 차속에서는 6% 이내의 상대오차를 보인다. 이러한 비교로부터 본 연구에서 채용한 제어체적 방법의 타당성을 어느 정도 검증할 수 있었다. 반면, 간이환기량 산정법에 의한 값은 제어체적 방법이나 일차원 해석적 방법에 의한 값보다 전반적으로 작게 산정되고 있으며 특히, 환기설계 시 적용속도인 60 km/h에서는 제어체적 해석 방법보다 39.7% 적은 값을 나타낸다. 그러므로 간이환기량 산정법에서는 실제환기설비에 의하여 생성될 수 있는 환기량보다 적은 환기량을 추천하는 것으로 판단될 수 있다.

7.2 차량속력에 따른 최대 유해가스 농도 및 최대 소광계수

7.2.1 최대 CO 및 NO_x 농도

Fig. 7 과 Fig. 8에서는 각각 터널내 CO 및 NO_x의 최대 농도를 나타내었다. 여기서 점선은 본 연구의 모델 터널 설계시 이용한 설계기준치이며, 실선은 본 연구에 의한 결과이다. CO 최대 농도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 모든 차속 범위에서 설계기준치보다 낮은 안전한 수준으로 유지되며, 대체적으로 차속이 증가함에 따라 점진적인 감소를 보인다. 이는 차속이 증가함에 따라 차량피스톤 효과에 의해 터널내 공기속도는 증가하고 CO의 배출량을 지배하는 통과차량수와 속도보정계수의 곱은 줄어들기 때문이다. 차량 정체시(차속 0 km/h)에는 유해가스의 농도가 중요한 문제이며 이때의 CO 최대농도는 설계기준치 150 ppm보다 낮기 때문에 CO 농도는 안전한 수준으로 유지된다고 볼 수 있다.

NO_x 최대농도는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 모든 차속 범위에서 설계기준치 25 ppm보다 낮은 안

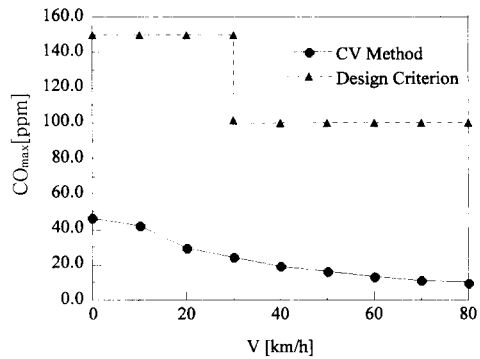


Fig. 7 Maximum CO concentration with various car speeds.

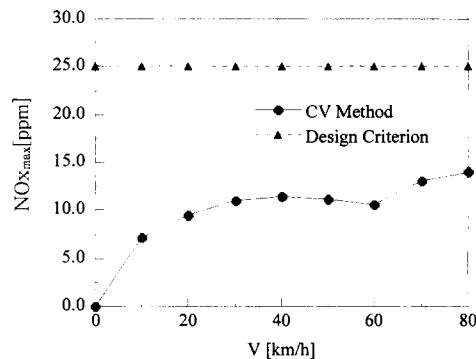


Fig. 8. Maximum NO_x concentration with various car speeds.

전한 수준으로 유지되며, 차속이 증가함에 따라 점진적으로 증가한다. 이는 No_x의 배출량을 지배하는 통과 차량수와 속도보정계수를 곱한 양이 점차적으로 증가하기 때문이다. 차속 60 km/h에서 NO_x의 배출량을 지배하는 통과차량수와 속도보정계수를 곱한 양이 일시적으로 감소하기 때문에 약간 줄어드는 현상이 나타난다. 또한 차속 0에서 NO_x가 0인 것은 한국도로공사 설비기준⁽³⁾에 의해서 이 속도의 속도보정계수가 0으로 산정되기 때문이다. NO_x 농도 기준으로도 전 차속 범위에서 안전한 수준으로 유지될 것으로 판단된다.

7.2.2 최대 소광계수

매연에 의한 터널내 최대 소광계수를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보면 소광계수는 차속 0 km/h에서 최대가 되며 설계기준치를 초과하고 있으나, 그의 차속에서는 설계기준치 이하로 유지되고 있다. 차속 변화에 따라 최대 소광계수가 변동

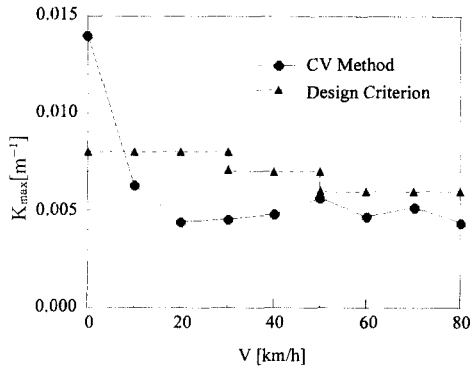


Fig. 9 Maximum extinction coefficient with various car speeds.

되는 이유는 CO 및 NOx의 경우와 마찬가지로 매연의 총배출량을 지배하는 통과차량수와 속도-고도 보정계수의 곱이 변동되기 때문이다. 차속이 0 km/h인 경우에는 차량이 정지해있기 때문에 가시도를 나타내는 소광계수가 설계기준치보다 높다 하더라도 터널 이용에 큰 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

7.3 간이환기량 산정법의 검토

본 연구 대상터널에 대하여 차속에 따른 최대 유해가스농도 및 최대 소광계수 분포를 살펴본 결과 대상터널에 설치된 환기장비들에 의한 환기량은 터널 내 오염물의 분포 및 가시거리를 적정하게 유지하는 것으로 판명되었다. Fig. 6에서 나타난 터널 내 평균공기유속 분포를 살펴볼 때 간이환기량 산정법으로부터 평균공기유속이 너무 낮게 나타나 있으므로 간이환기량산정법이 적정한 환기량을 산정할 수 있도록 하기 위해서는 매연기준 환기량 산정시 사용되는 속도-구배 보정계수 f_v 를 차속에 따라서 20 km/h에서 1.69배, 40 km/h에서 1.44배, 60 km/h에서 1.40배, 80 km/h에서 1.52배 등 평균적으로 1.7배정도 상향조정해야 할 것으로 사료된다.

7.4 터널 종방향 유해가스 및 소광계수 분포

7.4.1 종방향 CO 및 NOx 농도

Fig. 10과 Fig. 11에는 각각 차속 60 km/h 일 때의 터널내 종방향 CO 및 NOx의 분포를 나타내었다. CO의 터널 종방향 분포는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 터널 입구에서 출구까지 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 제1집진기 구간과 제2집진기 구간에서는 농도의 국부적인 요동을 볼 수

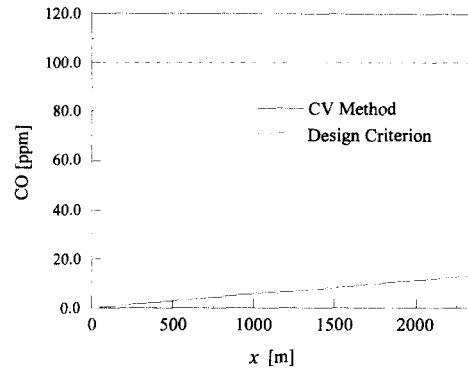


Fig. 10 Longitudinal distribution of CO concentration in the model tunnel.

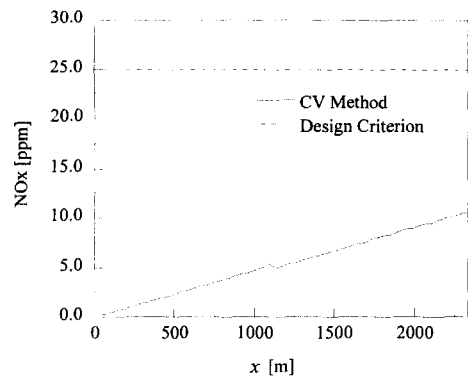


Fig. 11 Longitudinal distribution of NOx concentration in the model tunnel.

있다. 이는 집진기 구간에서 터널 본선 공기량이 변동됨에 따라 나타난 현상이다. 터널내 CO의 최대농도는 터널출구에서 13.1 ppm으로 나타났으며 이 수치는 설계기준치 100 ppm보다 낮다. 따라서 본 연구의 모델 터널에서는 CO농도 측면에서 볼 때 안전한 통행이 이루어 질 수 있다고 판단된다.

NOx의 터널 종방향 분포는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 CO의 종방향 농도분포와 비슷하게 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 터널내 NOx의 최대농도는 터널 출구에서 10.6 ppm으로 나타났으며 이 농도는 설계기준치 25 ppm보다 낮다. 그러므로 본 연구 모델 터널은 NOx농도 측면에서 볼 때 충분히 안전하다고 판단된다.

7.4.2 종방향 소광계수 분포

차속 60 km/h 일 때의 매연에 의한 터널의 종방향 소광계수의 분포를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보면 소광계수는 터널 입구에서부터 제1집진

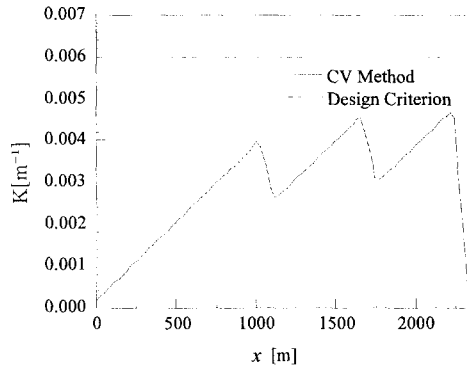


Fig. 12 Longitudinal distribution of extinction coefficient in the model tunnel.

기 구간까지 선형적으로 증가한다. 그리고 터널 본선 공기량의 일부가 집진기에서 여과되어 본선에 합류됨에 따라 제1집진기 출구에서 매연의 농도가 떨어지므로 소광계수는 급격히 감소된다. 설계기준치와 비교하여 보면 제2집진기 입구에서 최대가 되며 그 값은 0.00455 m^{-1} 로 설계기준치 0.006 m^{-1} 보다 낮게 나타나고 있다. 따라서 가시거리 측면에서 안전한 통행이 예상된다.

본 모델 터널의 경우에는 매연 농도가 설계기준치인 0.006 m^{-1} 보다 75% ($0.00455/0.006 \times 100$) 낮게 나타났기 때문에 과다 설계의 가능성을 신중하게 검토해보는 것이 필요하다고 본다. 또는 터널 운영시 교통량에 따라 제트팬이나 집진기를 부분운전하는 것이 바람직하다고 판단된다.

8. 결 론

본 연구를 통하여 부산 S 터널의 종방향 공기속도, CO, NO_x 및 소광계수의 분포를 예측하여 설계기준치의 적합성을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 1997년에 제정된 간이환기량 산정법에서는 적절한 환기량보다 적은 환기량을 예측하고 있는 것으로 판단되며 이를 보완하기 위해서는 매연 기준 환기량 산정 시 사용되는 속도-구배 보정계수 f_{10} 의 값을 평균적으로 1.7배정도 상향조정해야 할 것으로 사료된다.

(2) 터널내 CO와 NO_x의 종방향 분포는 모두 설계치 이하로 나타났으므로 CO나 NO_x 측면에서는 안전한 통행이 이루어질 수 있다고 판단된다.

(3) 매연에 의한 터널내 종방향 소광계수 분포는

설계기준치보다 훨씬 낮게 나타났으므로 안전한 통행이 예상된다.

(4) 제트팬이나 집진기등의 환기설비등을 교통량에 따라 부분 운전하는 것이 바람직하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 1997학년도 한양대학교 교내연구비의 지원과 한국과학재단 지정 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 한국도로공사, 1992, "도로터널 기술 기준 및 동해설(환기편)," pp. 12, 15, 21, 30, 38.
- (2) 코오롱 건설, 1996, "차량 터널 환기 시스템 최적 설계 연구," 코오롱 건설, p. 55
- (3) 한국도로공사, 건설기술연구원, 1997, "고속도로 터널 환기 설비 설계 기준," 한국도로공사
- (4) 한국도로공사, 1995, "고속도로 터널설계 실무자료집", p. 52.
- (5) Nico, C., "Impulse Fans," 1991, *7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 827~846.
- (6) Ohashi, H., Kawamura, T., and Baba, T., 1976, "A Study on a Longitudinal Ventilation System Using the Enlarged Jet Fans," *2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. D2-19~D2-44.
- (7) Charlse, F. S., 1979, "Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels," *Federal Highway Administration*, Washington DC, pp. 3~14.
- (8) William, C. H., 1982, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, pp. 318~336.
- (9) Parker, C. R., 1993, *Aerosol Science and Technology*, Second Edition, McGraw-Hill, p. 267.
- (10) Pischinger, R., and Staska, G., 1991, "Exhaust Gas Legislation and Exhaust Gas Emissions of Motor Vehicles," *7th International Symposium on the Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 21~51.