도로터널 환기시스템 설계 프로그램 개발

Study on Optimization Technique for Design of the Road Tunnel Ventilation System

유 지 오* · 이 동 호** · 신 현 준***
J.O. Lew · D.H. Rie · H.J. Shin
(1999년 9월 8일 접수, 1999년 10월 30일 채택)

ABSTRACT

In this study, the computer code for the optimal design of road tunnel ventilation system based on one-dimensional analysis of the air flow was developed. The control volume method was used to calculate the air velocities and the concentration distribution of pollutants(CO, NOx, Particulate) for various tunnel ventilation system.

This code was validated by comparing the calculation results to the practical design data for the road tunnel ventilation system. The calculation results were in accord with the practical design data.

1. 서 론

최근에 각종 SOC사업이 본격화되면서 고속도로망 및 도시교통망 확충이 가속화되어 장대터널이 급증하고 있을 뿐만 아니라 차량의 급속한 증가로 차량배기가스에 의한 터널내부 환경의 악화가 문제시되고 있다.

특히 도로터널은 반밀폐 공간으로 터널내에서의 사고는 인명피해와 막대한 재산 피해로 이어질 수 있으므로 안전운전을 위한 제반설비 및 대책이 필요하며 안전운행을 위한 가시거리 확보 및 쾌적한 환경에 대한 요구가 대두되고 있다. 따라서 터널에서 이와 같은 요구를 만족하기 위해서 기계환기설비가 투입되고 있으며 이에 대한 최적화 설계에 대한 필요성이 높아지고 있다.

* 신흥대학 건축설비과
** 인천대학교 산업안전과
*** 건설기술 연구원 건설그룹

선진외국에서는 오래 전부터 터널의 환기대책에 지대한 관심을 가지고 자국의 특성에 맞는 설계자료의 정립을 위해서 지속적인 연구를 추진하고 있으나 국내의 경우에는 아직까지 외국의 경험 및 설계 기준에 의존하고 있어 시스템 설계 및 선정시에 많은 문제점을 안고 있다[1~7].

터널 환기시스템 설계에 필요한 각종자료는 터널의 지형, 차량의 특성 등에 따라 많은 차이가 있기 때문에 동일한 계산식을 사용할지라도 설계에 필요한 자료를 장기간에 걸쳐 체계적으로 정립하고 지속적으로 보완해야 한다. 그러나, 국내에서는 이에 대한 연구가 많지 않은 실정으로 일본 및 유럽의 자료에 의존하고 있기 때문에 많은 혼란을 야기하고 있기 때문에 도로공사[8,9]에서는 1998년에 고속도로 터널을 대상으로 하는 설계기준을 제시하고 있다. 따라서 이를 반영할 수 있는 설계 프로그램의 개발에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다.

환기시스템에 관련한 해석모델은 정상적인 운영상태에서 터널의 환기량계산이나 농도예측을 위한 모델[10~12], 화재 등과 같은 비정상적인 상태에서 터널내의 기류해석[13] 및 수직갱[14]이나 집진기갱[15]의 입출구[16,17]와 같은 특정 위치에 대한 기류분포 등을 해석하기 위한 모델 등이 있다.

현재 국내에서 사용하고 있는 대표적인 모델로는 미국의 연방도로공사(FHWA)에서 개발한 TUNVEN과 이를 기본으로 수정한 모델들이 다수 있다. TUNVEN 모델은 미국의 연방 도로공사가 장기간에 걸쳐서 터널내 기류 및 오염물질 거동을 파악하기 위하여 실측자료를 토대로 개발한 것으로 터널내 기류 및 오염물질의 거동이 1차원 준정적상태라는 가정 하에 1차원 운동방정식과 이류확산방정식을 유한차분법을 적용하여 해석하고 있다.

현재 국내에서도 이를 이용하여 특정터널에서 오염물질의 거동을 예측하여 환기기 용량의 적정성 여부를 판단하기 위한 자료로 사용되고 있으나 현재 고속도로 터널의 대부분을 차지하는 종류식 환기방식이나 조합형 환기방식에 대한 해석이 불가능하여 프로그램의 적용이 불가능한 경우가 많아지고 있으며, 또한 최적의 환기용량 결정을 위한 도구로 사용될 수 없는 한계가 있기 때문에 최적설계를 위한 프로그램의 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 기존의 TUNVEN에 적용하여 유효성이 인정되고 현재 실무의 수계산에 적용되고 있는 Control Volume Method를 사용하여 압력평형식 및 연속방정식을 유도하고 이를 유한차분법으로 풀어 터널내의 압력분포 및 속도분포를 구하여 다양한 환기방식에 적용할 수 있도록 함으로서 환기시스템의 최적설계 조건을 도출하고 이에 따른 오염물질거동을 해석할 수 있는 프로그램 개발에 관한 내용을 제시하고자 한다.

2. 도로터널의 공기역학

터널환기의 목적은 오염되지 않은 신선공기를 터널로 유입하여 차량에서 배출되는 배기가스를 희석·배기함으로서 터널내의 오염농도를 허용치 이하로 유지시켜 쾌적한 환경을 확보함으로서 이용자의 건강과 안전운행을 도모하는 것으로, 이 때 필요로 하는 신선공기의 양을 터널의 소요환기량이라 한다.

소요환기량은 자연환기 및 기계환기에 의해서 유입할 수 있으며, 터널내 공기의 흐름은 터널내의 차량운행에 의한 피스톤효과, 젯트팬이나 집진기 등에 의한 승압효과, 수직갱 등에 의한 부력효과, 대기의 자연조건 등에 의해서 영향을 받게 된다. 따라서 터널내의 기류의 분포나 오염물질의 농도분포는 이들의 상호작용을 고려해서 해석되어야 한다.

2.1 기본가정

- 터널내의 공기는 이상기체이며 비압축성 유체로 가정한다.
- 터널내 공기의 흐름은 TUNVEN의 개발 당시 FHWA가 기류의 속도와 오염물질의 측정을 통해서 확인한 바와 같이 해석을 단순화하기 위해서 1차원유동으로 한다.
- 도로터널에서 축방향의 흐름은 높은 Reynolds 수와 차량과 환기유동에 의한 난류촉진효과로 확산정도가 큰 난류유동으로 가정한다.

• 터널내의 국부적인 속도의 변동은 비교적 작은 편차(±0.3m/s)를 보이며, 축방향의 평균속도는 교통량 및 기계환기량에 의존하며 변동이 빠르지 않으므로 정상류로 가정한다.

이상에 근거하여 터널내의 공기흐름은 흐름은 준정상상태(quasi-steady state)로 볼 수 있다.

2.2 운동량보존의 법칙

터널내 공기를 하나의 공기주로 가정하면 제어체적(Control volume)에 작용하는 운동량은 제어체적에 작용하는 외력(jet fan의 승압력, piston효과, 마찰저항)의 총합이 된다. 따라서 터널의 제어체적에 작용하는 외력 및 운동량은 Fig. 1과 같으며 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$((\rho U_r^2)_{x+dx}-(\rho U_r^2)_x)A_r+(\dot{M}_e-\dot{M}_i)dx=$$
$$(p_x-p_{x+dx})A_r-\frac{1}{2}(\rho_x+\rho_{x+dx})g\sin\theta_R dx$$
$$+f_{Piston}dx+f_{Equipment}dx-f_{Friction}dx \quad \cdots\cdots(1)$$

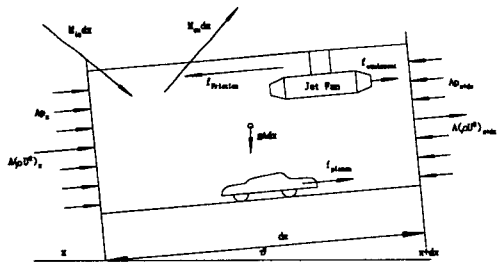

Fig. 1 Momentum for tunnel elemeant control volume

2.2.1 환기설비에 의한 환기력($f_{Equipment}$)

환기시스템에 의한 환기력은 횡류 환기방식을 적용하는 경우에는 흡배기 포트를 통해서 유입되거나 유출되는 공기에 의한 운동량과 종류식 환기방식에서는 젯트팬 및 수직갱, 전기집진기의 송기노즐에 의한 환기력을 들 수 있다.

1) 흡배기 포트의 운동량

유체역학이론에 따라 흡기 또는 배기 포트를 통해서 터널의 종방향에 수직으로 유입되거나 유출되는 유체는 터널 종방향의 운동량에 영향을 미치지 않기 때문에 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 흡기 또는 배기 포트를 포함하는 Control volume에 대한 운동량법칙을 적용하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_2-p_1=\rho(U_1^2-U_2^2) \quad \cdots\cdots(2)$$

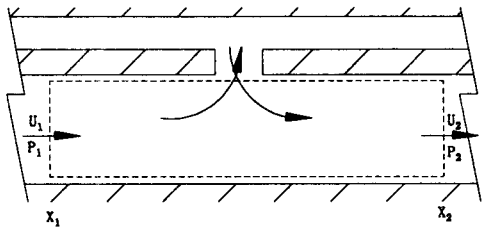

Fig. 2 Schematic representation of tunnel ventilation ports

그러나 실제의 경우에 포트가 수직으로 설치된 경우라도 포트로 입출입되는 흐름은 수직하지 않기 때문에 식 (3)과 같이 수정되어야 한다. 여기서 k는 포트 운동량계수(port momentum coefficient)이다.

$$F_{vent}=2\rho\int_0^L U_r[(1-k_i)q_{in}-(1-k_e)q_{ex}]dx \quad \cdots\cdots(3)$$

여기서, q_{in}, k_i 는 단위 길이당 유입되는 흐름의 량과 포트운동량계수이며, q_{ex}, k_e 는 포트를 통해 유출되는 흐름의 량과 포트운동량계수로 FHWA의 보고서에서는 k_i=0.67~0.68, k_e=0.60를 추천하고 있다.

2) 젯트팬에 의한 환기력

젯트팬은 고속의 분류(U_j=30m/s)를 터널내 공기에 분사함으로서 추진력을 주는 장치로 유체역학이론에 따라 젯트팬 하나의 추진력은 식 (4)와 같다.

$$f_{jet}=\rho A_j U_j^2 \cdot K_1 . K_2 \quad \cdots\cdots(4)$$

여기서, $K_1=(1-(U_r/U_j))$로 터널내 풍속에 대한 보정계수, K_2는 천장과 팬의 설치거리 및 편심 정도에 따른 보정계수이다.

따라서 터널에 n개의 젯트팬이 설치되어 있다면 젯트팬에 의한 추진력은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$F_{jet}=\sum_{i=0}^{n}(\rho A_j U_j^2 \cdot K_1 \cdot K_2)_i \quad \cdots\cdots(5)$$

3) 송기노즐 및 배기갱에 의한 환기력

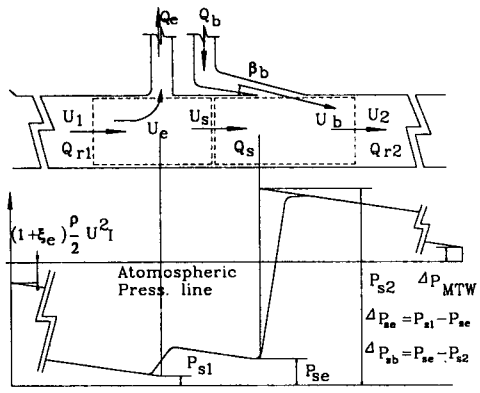

Fig. 3 Momentum for the exhaust and inlet shaft

집진기, 수직갱 및 샤카르트방식은 Fig. 3과 같이 송기노즐이나 배기구가 설치되어 송배기 본래의 목적 및 기류유동으로 인한 승압력이 발생하게 되는데 이는 다음 같이 계산된다.

① 송기노즐의 승압력(ΔP_b)

Fig. 3에서 점선으로 표시한 송기노즐을 포함하는 Control Volume에 대한 운동량 방정식 및 연속방정식은 식 (6), (7)과 같다.

$$(P_{se}+\rho U_s^2)A+K_b\rho Q_b U_b\cos\beta = (P_{s2}+\rho U_2^2)A_r \quad \cdots\cdots(6)$$

$$A_r U_2 = A_b U_b + A_r U_s \quad \cdots\cdots(7)$$

따라서 송기노즐의 승압력(ΔP_b)은 식 (6)과 식 (7)을 정리하면 식 (8)이 된다.

$$\Delta P_b = 2\left(\frac{Q_b}{Q_{r2}}\right)\left\{\left(\frac{U_b}{U_r}\right)K_b\cos\beta - 2 + \frac{Q_b}{Q_{r2}}\right\}\frac{1}{2}\rho U_r^2 \quad \cdots\cdots(8)$$

② 배기구에 의한 승압력(ΔP_e)

Fig. 3에서 배기구를 포함하는 Control volume에 대해 운동량 방정식 및 연속방정식은 식 (9)와 (10)이 된다.

$$(P_{s1}+\rho U_1^2)A_r = (P_{se}+\rho Q_s U_s^2)A_r + K_e\rho Q_e U_e \quad \cdots\cdots(9)$$

$$A_r U_2 = A_r U_s + U_e A_e \quad \cdots\cdots(10)$$

따라서 배기구에 의한 승압력은 식 (11)로 정리된다.

$$\Delta P_e = 2\left(\frac{Q_e}{Q_{r1}}\right)\left\{K_e+\frac{Q_e}{Q_{r1}}-2\right\}\frac{1}{2}\rho U_1^2 \quad \cdots(11)$$

여기서, K_b 및 K_e는 송배기 노즐의 형상 및 유량에 관계되는 승압력계수로 실험적으로 각각 0.85~1.15와 0.7~1.1의 범위로 알려져 있으며 일반적으로 터널설계에서는 1을 적용하고 있다[3~5].

따라서, m개의 송기노즐 및 n개의 배기구를 갖는 환기시스템에 대한 환기력은 각각 식 (12) 및 (13)으로 표시할 수 있다.

$$F_{nozzle} = \sum_{i=1}^{m}\left[2A_r\frac{Q_b}{Q_{r2}}\left\{\left(\frac{U_b}{U_r}\right)K_b\cos\beta - 2 + \frac{Q_b}{Q_{r2}}\right\}\frac{1}{2}\rho U_r^2\right]_i \quad \cdots\cdots(12)$$

$$F_{exhaust\ shaft} = \sum_{i=1}^{n}\left[2A_r\frac{Q_e}{Q_{r1}}\left\{K_e+\frac{Q_e}{Q_{r1}}-2\right\}\frac{1}{2}\rho U_1^2\right]_i \quad \cdots\cdots(13)$$

2.2.3 차량에 의한 피스톤효과

차량이 터널과 같은 폐쇄공간을 통과할 때 차량의 진행으로 인한 터널내 공기주에 대한 항력이 터널내 공기에 대해서 추진력으로 작용하게 되는데, 이를 차량에 의한 피스톤효과라 하며 이는 도로터널에서 축방향의 공기유동을 야기하며, 이로 인하여 터널내 공기를 소정의 속도로 유동시키기 위한 팬 등의 기계환기장치에서 요구되는 승압력을 저감하는 효과로 작용한다.

피스톤효과는 특히 현대의 지하철 설계와 고속 차량 터널에서 중요한 역할을 하며 차량의 속도와 차폐율(blockage ratio)이 증가하면 더욱 중요한 인자로 작용한다.

차량의 항력은 다음 식으로 나타낸다.

$$F_D = C_D A_V \frac{\rho}{2}(V_t - U_r)^2 \quad \cdots\cdots(14)$$

여기서, A_v 차량의 평균 등가저항 단면적(m^2)이며, C_D는 항력계수이다.

따라서, 피스톤효과에 의한 환기력(교통환기력)은 식 (14)로부터 +방향 및 −방향으로 교통류가 있는 양방향터널에서의 교통 환기력(f_{piston})은 다음 식으로 표시된다.

$$f_{piston} = A_m\frac{\rho}{2}\{N_t^+|U_t^+ - U_r|(U_t^+ - U_r) - N_t^-|U_t^- + U_r|(U_t^- + U_r)\} \quad \cdots\cdots(15)$$

여기서, N_t 는 터널내 차량수로 다음 식으로 계산한다.

$$N_t = n \cdot L_r \cdot N_{Lane} = \frac{N_{veh} \cdot L_r}{U_t}$$

여기서, n은 단위길이당 교통량(대/km), L_r : 터널길이(km), N_{Lane} : 차선수, N_{veh} 는 시간당 통과하는 교통량(대/hr)이다.

또한 A_m 은 차량의 등가저항면적으로 터널환기 계산시에는 차량의 투영면적 및 저항계수는 소형과 대형으로 구분하여 식 (16)으로 계산한다.

$$A_m = A_s C_{DS}(1-\varphi) + A_L C_{DL}\varphi \cdots\cdots(16)$$

여기서, ψ 는 대형차 혼입율이다.

2.2.3 터널내부 벽면 마찰손실

도로터널의 벽면마찰손실은 파이프나 덕트와 같이 계산될 수 있으며 식 (17)과 같다.

$$F_{friction} = \lambda \frac{\bar{\rho}}{2} A_r \int_0^L U_r |U_r| dx \cdots\cdots(17)$$

2.2.4 입출구 손실 및 자연풍에 의한 환기저항

1) 터널 입출구 손실

터널의 입출구 손실은 단면적의 급격한 변화에 의한 것으로 입구에서 손실계수와 속도수두의 곱으로 표현된다. 출구에서의 손실과 입구에서의 압력손실은 각각 식 (18)과 (19)로 표시된다.

$$|\Delta p_{flow\ exit}| = \zeta_e \frac{\rho}{2} U_r^2 \cdots\cdots(18)$$

$$|\Delta p_{flow\ exit}| = \zeta_i \frac{\rho}{2} U_r^2 \cdots\cdots(19)$$

윗 식에서 ζ_e, ζ_e 는 각각 출구손실계수와 입구손실계수를 나타낸 것으로 일반적으로 터널에서 출구손실계수는 난류에서 1이며 이 값은 출구의 형태에 따라서 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 또 입구손실계수는 출구손실계수와는 다르게 터널입구의 형상에 영향을 받으며 일반적으로 입구의 형상이 각이진 사각모서리로 되어 있는 경우에는 0.5정도이며 원형으로 하는 경우에는 이 값이 상당히 작아지는 것으로 보고되고 있다.

또한 식 (18), (19)는 터널의 경우에 차량의 흐름이나 환기방식에 따라서 양쪽 입출구에서 공기의 흐름의 방향이 변할 수 있으므로 터널에서는 식 (20)과 같이 수정이 된다. 즉 각 입구 및 출구에서 입구손실계수를 사용할 것인지 출구손실계수를 사용할 것인지는 차량의 이동방향에 의존하지 않고 공기의 유동방향에 의존하게 된다.

$$\Delta P_{exit} + \Delta P_{enterance} =$$
$$-\frac{\bar{\rho} U_L}{4}\{\zeta_i(|U_L| - U_L) + \zeta_e(|U_L| + U_L)\}$$
$$-\frac{\bar{\rho} U_O}{4}\{\zeta_e(|U_O| - U_O) + \zeta_i(|U_O| + U_O)\}$$
$$\cdots\cdots(20)$$

2) 자연풍에 의한 환기저항

터널의 입구나 출구자연풍에 의한 환기저항은 자연풍에 의한 압력차, 터널 입·출구간의 압력차, 터널의 온도차에 의한 압력차등에 의해서 발생하나 설계시에 각각을 구분하는 것이 곤란하므로 이들을 총괄하여 입·출구간의 압력차로 나타내고 있다.

자연풍에 의한 환기저항에 대한 계산은 현재 두 가지 방법으로 터널설계시 적용되고 있다. 첫 번째는 일정한 풍속의 자연풍이 터널을 관통하여 흐른다고 가정하는 것이고 두 번째는 실제로 터널입구와 출구에 부는 자연풍이 미치는 영향을 풍압계수를 적용하여 고려하는 방식이다.

첫 번째의 경우 자연풍에 의한 환기저항은 식 (21)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{MTW} = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \frac{L_r}{D_r}\right) \frac{\rho}{2} U_n^2 \cdots\cdots(21)$$

여기서, U_n 은 터널을 통과해서 부는 자연풍의 속도이다.

따라서 윗식은 U_n 의 속도로 자연풍이 터널내를 통과할 때 발생하는 마찰손실 및 입출구손실의 합을 의미하며, 현재 도로터널의 설계시 자연풍의 풍속은 안전측면에서 차량에 대한 역풍으로 가정하여 2.5m/s로 하고 있다.

또 두 번째의 경우는 Blendermann에 의해서 연구되었으며 터널의 입구나 출구쪽으로 맞바람은 환기력에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.

이 경우에는 자연풍의 영향을 식 (22)와 같이 고려할 수 있다.

$$\Delta p_{wind} = \Delta p_{exit\ wind} + \Delta p_{entrance\ wind}$$
$$= C_n \frac{\rho_a U_n^2}{2} \cos\psi_n \cos|\psi_n| \quad \cdots\cdots(22)$$

여기서, C_n는 ψ_n를 0으로 하는 경우에 FHWA의 실측결과 recirculation barrier와 터널출구 벽면이 돌출되어 있는 경우에는 0.7, recirculation barrier만 있는 경우에는 0.55, 돌출부와 낮은 측벽이 설치된 경우는 0.4, 낮은 측벽만 설치된 경우는 0.25정도가 된다고 보고하고 있다.

2.2.5 터널내 압력평형식

전술한 외력 및 운동량의 변화량을 종합하여 정리하면 터널내 운동량 방정식은 식 (23)으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\bar{\rho} A_r}{2}(U_L^2 - U_0^{2)} = 2\bar{\rho}\int_0^L U_r\{(1-k_i)q_i - (1-k_e)q_e\}dx$$
$$-\left[\frac{\bar{\rho} A_r U_L}{4}\{\zeta_i(|U_L|-U_L) + \zeta_e(|U_L|+U_L)\} + \frac{\bar{\rho} A_r U_0}{4}\{\zeta_e(|U_0|-U_0) + \zeta_i(|U_0|+U_0)\}\right]$$
$$+\left[\frac{\bar{\rho}}{2}\int_0^L \left\{(C_D A_V)^+ \frac{N_+}{U_t^+}(U_t^+ - U_r)|U_t^+ - U_r| - (C_D A_V)^- \frac{N_-}{U_t^+}(U_t^+ + U_r)|U_t^+ + U_r|\right\}dx\right]$$
$$-\frac{\bar{\rho} A_r \lambda}{2D}\int_0^L U_r|U_r|dx + F_{equipment} + F_{external\ wind} \quad \cdots\cdots(23)$$

2.3 도로터널내의 오염물질농도 계산

도로터널의 공기오염은 차량에 배기가스에 의한 것으로 차량에서 배출되는 오염물질은 이류확산에 의해서 이동·확산되게 된다. 터널내의 오염물질의 농도분포는 터널내 공기 유동이 극히 발달된 난류유동이기 때문에 터널 단면상에서 공기의 유동속도와 마찬가지로 균일한 것으로 가정한다.

2.3.1 터널내 오염물질의 이동방정식

터널내 임의 제어체적에서 오염물질의 거동은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며 질량보존의 법칙을 적용하면 이들의 관계는 식 (24)와 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\frac{\partial C}{\partial x} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{Cq_{ex} - C_i q_{in}}{A_r} + S_v \quad \cdots\cdots(24)$$

또한 윗식을 $\bar{t} = \frac{U_r t}{L_r}$, $\bar{x} = \frac{x}{L_r}$로 무차원화하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial \bar{t}} + U_r\frac{\partial C}{\partial \bar{x}} = \frac{1}{Pe}\frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}^2} - \frac{(Cq_{ex} - C_i q_{in})L_r}{U_r A} + \frac{L_r S_v}{U_r} \quad \cdots\cdots(25)$$

식 (25)에서 Pe는 Peclet($U_r L_r/D$)수로 확산효과에 대한 이류효과의 비를 나타내는 것으로 터널내의 유동에서는 확산계수 D는 공기에서 분자의 확산계수(대략 $10^{-5}m^2/s$의 order)와는 달리 0.1에서 $1m^2/s$의 범위이나, 도로터널의 길이가 1 km에 달하는 경우에 10^3에서 10^4정도 order의 큰 수가된다. 따라서 식 (25)에서 2차 미분항은 무시할 수 있으며 또 터널내의 농도 변화가 급격하게 일어나지 않는 준 정적상태로 볼 수 있으므로 식 (24)는 식 (26)으로 나타낼 수 있다.

$$U_r\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{Cq_{in} - Cq_{ex}}{A} + S_v \quad \cdots\cdots(26)$$

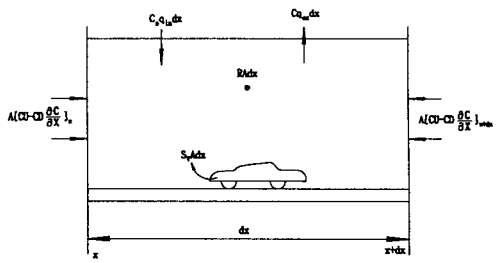

Fig. 4 Mass balance for pollutant in tunnel element control volume

3. 계산프로그램의 구성

본 프로그램은 터널제원 파일에 대한 입출력 모듈, 환기량 계산모듈(PIARC방식, 일본도로공단방식), 자연환기량계산 및 방재용 젯트팬계산 모듈, 장비계산모듈(젯트팬방식, 젯트팬+전기집진기, 젯트팬+수직갱), 시뮬레이션 모듈로 구성되어 있다.

프로그램의 기본 구성도는 Fig. 5와 같으며, 본 보고서에서는 입력모듈 및 출력모듈에 대한 설명은 생략하고 계산을 위한 모듈에 대해서만 알아보기로 한다.

3.1 터널내 풍속의 계산

터널내 풍속의 계산은 연속방정식과 식 (23)의 운동량방정식에 의해서 다음과 같은 과정으로 계산한다.

• 터널입구 속도 U_0를 가정한다.

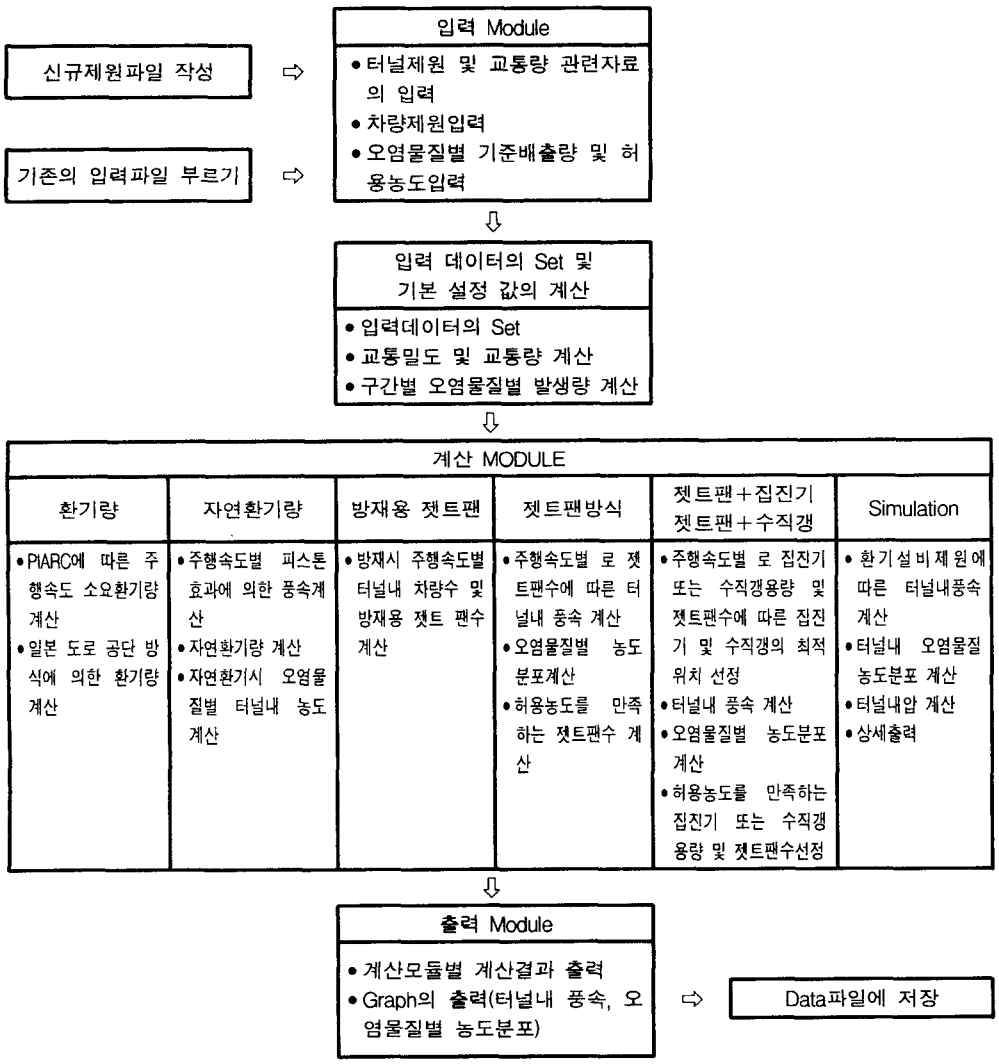

Fig. 5 Schematic of program modules

- 식 (1)에 의해서 국소속도 U_i 및 터널출구 속도 U_L를 구한다.
- 국소속도를 식 (23)에 대입하여 식 (23)의 근이 존재하는 범위를 구한다.
- 구해진 범위에서 half-interval method에 의해서 식 (23)의 좌변과 우변의 값의 오차가 0.0001 이하가 될 때의 속도 U_i를 최종 값으로 하였다.

3.2 오염농도 분포의 계산

대기의 오염농도를 C_o라면 식 (26)은 식 (27)로 나타낼 수 있으며, 터널내의 공기의 유동방향이 차량의 이동방향과 같은 경우와 반대인 경우로 나누어 차분식을 쓰면 식 (28)과 (29)로 표현될 수 있으며, 공기의 흐름이 정체되는 곳에서는 식 (30)으로 계산된다.

$$U_i\frac{C_{i+1}-C_i}{\Delta x}=\left\{C_o q_{in}-\frac{(C_{i+1}+C_i)}{2}q_{ex}\right\}/A_r+(S_v)_i \quad \cdots\cdots(27)$$

① 차량의 이동방향과 공기의 유동방향이 동일한 경우

$$C_{i+1}=\left\{\left(\frac{U_i}{\Delta x}-\frac{q_{ex}}{2A_r}\right)C_i+\frac{q_{in}}{A_r}C_o+(S_v)_i\right\}/\left\{\frac{U_i}{\Delta x}+\frac{q_{ex}}{2A_r}\right\} \quad \cdots\cdots(28)$$

② 차량의 이동방향과 공기의 유동방향이 반대인 경우

$$C_i=\left\{\left(\frac{U_i}{\Delta x}-\frac{q_{ex}}{2A_r}\right)C_{i+1}+\frac{q_{in}}{A_r}C_o+(S_v)_i\right\}/\left\{\frac{U_i}{\Delta x}+\frac{q_{ex}}{2A_r}\right\} \quad \cdots\cdots(29)$$

③ 정체점인 경우

$$C_i=\frac{S_v}{q_{in}}=\frac{q_{in}C_o+(S_v)_i}{q_{in}} \quad \cdots\cdots(30)$$

3.3 오염물질 발생량 계산

3.3.1 매연발생량

계산하고자 하는 구간(구간길이 : Δx)에서 매연발생량은 식 (31)에 나타낸 바와 같이 차종별 발생량($(q_o^T \cdot n)_i$)의 합을 구한 후에 구배속도보정 및 표고보정을 하여 구한다. 이때 차종은 디젤류를 연료로 하는 차량만을 취한다.

$$S^T=\sum_{\text{차종}}(q_o^T \cdot n)f_{iv}f_h\Delta x/3600 \quad \cdots\cdots(31)$$

따라서, 식 (33)의 $(S_v)_i$는 다음과 같이 표현된다.

$$(S_v)_i=S^T/(\Delta x \cdot A_r)$$

또한, 매연농도 계산시 C는 소멸계수(K : extinction coefficient)가 되며, 이에 대한 매연투과율 (τ %)는 식 (32)로 환산한다.

$$\tau=100\exp(-100K) \quad \cdots\cdots(32)$$

3.3.2 CO 및 NOx발생량

계산구간(Δx)에서 CO 및 NOx발생량은 식 (33)에 나타낸 것처럼 차종별 발생량($(q_o n)_i$)의 합을 구하고 구배, 속도, 표고에 대한 보정을 하여 구한다.

$$S^{CO\ 또는\ NOx}=\sum_{\text{차종}}(q_o^{CO\ 또는\ NOx} \cdot n)_i f_i f_v f_h \Delta x/3600 \quad \cdots\cdots(33)$$

따라서, S_v는 다음이 된다.

$$S_v=S^{CO\ 또는\ NOx}/(A_r \cdot \Delta x) \quad \cdots\cdots(34)$$

4. 프로그램의 타당성 검토

프로그램의 타당성 검토를 위해서 환기방식을 달리하는 다수의 실제 터널에서 교통량 및 주행속도에 따른 터널내 풍속과 오염물질의 농도분포에 대한 실측결과를 비교하여야 하나 현단계에서는 이와 같은 검증을 위한 자료가 전무한 실정이라 이에 대한 작업이 불가능하여 현행 설계데이터를 통해서 설계 값과 비교하였다.

모델터널은 현재 서울외곽순환고속도로에 건설예정인 S터널로 제원은 다음과 같다.

연장 : L=3971 m (4차선 일방향)
구배 : 1.08 %
고도 : 115 m
교통량 : N=7693 대/시
대형차혼입율: 19.7 %
내공단면적 : 134.91 m^2
대표직경 : 11.42 m
평균주행속도: 80 km/h (환기기 용량 산정시)

Fig. 6은 모델터널에 대한 주행속도별 소요환

기량을 수계산 결과와 비교한 것으로 각 오염물질(CO, NO_x, 매연)에 대한 환기량은 잘 일치하고 있으며 주행속도가 70 km/h일 때 다소 오차가 발생하고 있으나 1% 이내로 반올림오차에 의한 것으로 볼 수 있다.

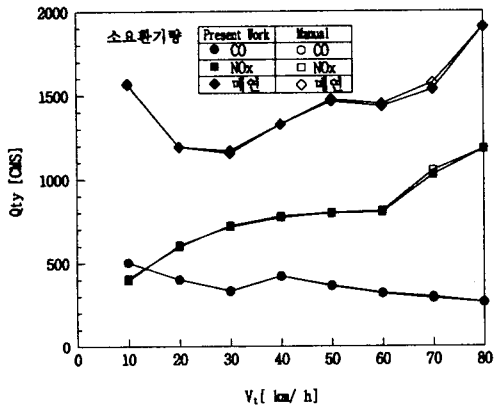

Fig. 6 Comparison of Fresh air requirement

Fig. 7은 자연환기량(Q_r) 및 차량에 의한 Piston 속도(V_r)를 비교하여 나타낸 것이다.

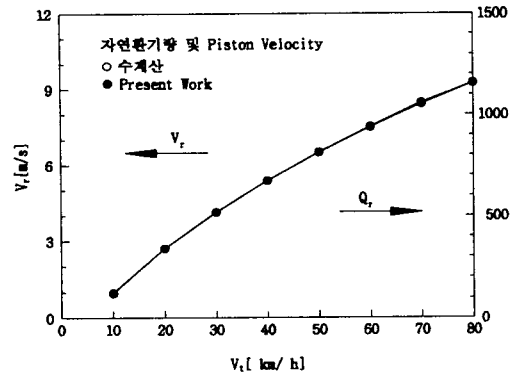

Fig. 7 Air flow rate and pistion velocity in natural ventilation

그림에서 주행속도(V_t)에 따른 피스톤 속도는 저속일 때 기울기가 고속일 때 보다 약간 크게 나타나고 있는데 이는 피스톤속도가 터널내 풍속에 대한 차량의 상대속도의 제곱에 비례하기 때문이며 수계산 결과와 비교한 결과, 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 설계속도(80 km/h)에서 350 CMS용량의 집진기 2대를 가동하는 경우에 젯트팬 수에 따른 터널내 풍속을 비교한 것이다.

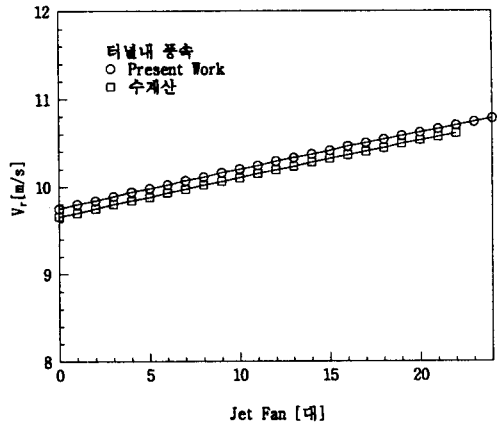

Fig. 8 Comparison of tunnel air velocity

터널내 풍속은 젯트팬수가 증가하면 선형적으로 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 수계산의 경우가 본 프로그램에 의해서 구해지는 값보다 다소 크게 나타나고 있으나 오차는 1%정도로 잘 일치하는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 조건에서 젯트팬 수에 따른 매연농도(K)를 비교하고 있는 것으로 전체적으로 수계산의 경우가 본 프로그램에 의해서

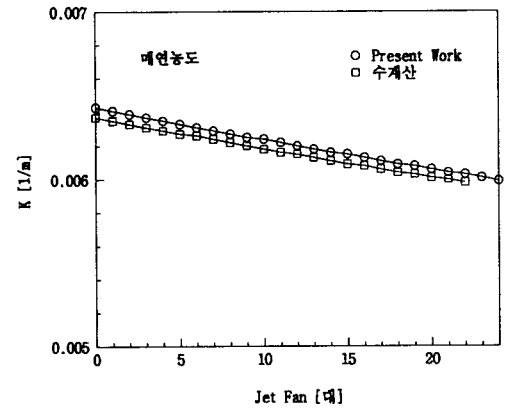

Fig. 9 Comparison of extinction coefficient

계산된 값보다 낮게 나타나고 있으나 오차는 1% 정도로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 미국의 TUNVEN 프로그램에 적용하여 그 타당성이 입증된 Control Volume Method를 적용하여 터널내 풍속을 계산하고 또한 국 도로공사 기준안의 기준배출량을 기준으로 오염물질발생량을 계산하여 이에 따른 소요환기량 및 환기기용량을 계산하고 환기방식별로 최적의 환기기 용량을 계산하는 프로그램을 개발하였다. 또 프로그램의 검증을 위해서 모델터널에 대한 수계산 결과와 비교 검토한 결과, 현행 설계기법에 의한 계산결과와 환기량 및 터널내 풍속, 오염물질의 농도를 정확하게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

또한 Control Volume Method를 수정 보완하여 기존의 환기방식을 조합한 조합형 환기방식에 대한 적용성을 높임으로서 현장설계자의 편리성을 최대한 도모할 수 있을 것으로 생각된다.

기 호 설 명

U : 풍속(m/s)
Q : 풍량(m^3/s)
K : 노즐계수 및 포트운동량계수
A : 단면적(m^2)
C : 오염농도(ppm, m^{-1})
L : 길이(m)
P : 압력(kg/m^2)
f : 보정계수
β : 송기노즐 각도
ρ : 공기밀도
λ : 벽체의 마찰계수

첨 자 설 명

r : 터널
e : 배기갱
b : 송기노즐
t : 차량,교통류
i : 구배
h : 고도
v : 속도보정계수

참 고 문 헌

1) John O. Bickel, Tunnel Engineering Handbook 2nd Ed., Chapman and Hall, New York, 1996
2) GEO Consult, Yuksibryung tunnels-Basic Ventilation Design, 1992.
3) 財団法人首都 高速道路技術センター, トンネル換氣設計基準に關する調査研究報告書 [トンネル換氣設計指針(案)], March, 1984.
4) 財團法人 高速道路調査會, 東京灣横斷道路トンネル換氣檢討 總括報告書, 1993.
5) 財團法人 首道高速道路技術センター, トンネル換氣設計基準に關する調査研究報告書 [トンネル換氣設計指針(案)], 1993.
6) Permanent International Association of Road Congress, XIX World Road Congress, Marrakech, 91 Report, 1991.
7) Huber, Richtlinien fur die Ausstattung und den Betrieb von Strabentunneln, RABT., 1994.
8) 한국도로공사, 터널환기시설에 관한 연구, 1996.
9) 한국도로공사, 고속도로 터널설계 기준, October, 1998.
10) 코오롱건설기술연구소, 차량터널 환기시스템 최적설계 방안 연구-오염물질 농도 예측 모델개발, September, 1996.
11) Federal highway adminstration, Washington, DC, Aerodynamics and air qulity management of highway tunnel, April, 1979.
12) Bain Dayman, Luis D. Rubenstein, "Concentration of exhaust emissions inside s series of highway tunnel". Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym., pp. 471~542, 1985.
13) P. Chasse, et. al., "Validating and optimi-

zing 2D & 3D computer simulations for the Ofenegg Tunnel fire tests.", Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym., pp. 357~382, 1994.
14) T. Konda, T. Mizutani, "Application of the longitudinal ventilation system for long tunnels.", Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 2nd International Sym., pp. D1-18, 1976.
15) T. Baba, K. Okano, "Ventialtion system of tsuruga tunnel.", Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 4th International Sym., pp. 367~382, 1982.
16) I. Yoshizawa, "Atmospheric dispersion characteristics of polluted air from the portal of an urban road tunnel.", Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym., pp. 791~808, 1994.
17) Charles Nadel, et. al., "Physical modelling of dispersion of a tunnel portal exhaust plume.", Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym., pp. 847~870, 1994.