

# 道路터널의 換氣

趙元喆

건설안전 기술사

공학박사

연세대학교 토목공학과 교수

## 1. 서론

제한된 교통공간의 활용도를 높이기 위한 교통시설의 증설중 도로터널의 증설은 매우 중요한 수단이 되고 있어 그 수가 해마다 증가하고 있다. 이러한 도로터널의 증가와 터널을 이용하는 교통량의 증가로 인해서 심각하게 대두되는 문제중의 하나가 터널내부에서는 물론이고 터널에서 배출되는 오염된 공기로 인한 출·입구 부근에서의 공기질(오염) 문제이다.

서울의 남산 1, 2, 3호터널, 북악터널 등의 기존터널은 물론이고 현재 계획중인 지하고속도로 등 전국에 산재한 도로터널에서 발생하는 또는 예견되는 심각한 공기질 문제는 무엇보다도 터널내부의 空氣흐름의 動的인 特性을 이해하여 접근함으로써 공기질 문제에 대한 해결의 실마리를 찾아야 하겠다.

도로터널의 안전한 설계와 유지관리는 터널내부의 공기질의 적정수준 유지와 배출공기에 의한 출·입구 부근에서의 환경문제가 유발되지 않도록 할 것, 그리고 터널내부에서 화재가 발생하였을 때 연기의 확산을 제어할 수 있어야 하는 것이 기본적인 과제이다. 이를

위해서는 자연적인 환기 방법에 의존하거나 아니면 기계적인 환기방법을 추가하여야 한다. 이러한 것을 공기질 관리(AQM: Air Quality Management)라 한다. AQM을 위해서는 첫째로, 현존의 AQM 기법을 면밀하게 분석하고, 둘째로, 기존터널에서의 공기흐름과 공기질을 관측하여야 하며, 끝으로 AQM 시스템을 위한 실시간 제어가 가능한 컴퓨터 모형의 확립과 사용, 그리고 대체할 수 있는 AQM방안을 강구하는 것이 필요하다.

앞에서 언급하였듯이 도로터널의 환기목적은 터널내부의 空氣質(汚染水準)과 出·入口 부근의 空氣質을 자연적인 혹은 인위적인 換氣에 의해서 받아들일 수 있는 水準으로 維持하며 터널내부에서 화재가 발생하였을 때 연기의 확산을 제어할 수 있도록 하기 위하여 도로터널을 安全하게 運轉管理하는 것을 목적으로 한다.

터널을 통과하는 자동차는 燃燒過程의 副産物로 熱과 水分을 생성한다. 이러한 뜨거운 연소는 터널내부의 온도를 상승시킴, 발생한 열의 대부분은 터널의 連結構를 통해서 혹은 환기설비를 통해서 터널밖으로 배출되어 전달되며 나머지 일부는 터널벽면을 통해서 주

변의 媒質속으로 傳導된다. 이러한 과정에서 이루어지는 質量均衡과 熱均衡을 나타내는 支配方程式을 構成하고 그 解를 구하는 과정이 AQM에서는 꼭 필요한 과정이요 수단이다.

## 2. 道路터널의 基本構成

도로터널의 일반적인 기본 構成體는 아래와 같다.

- 車道(roadway)
- 換氣施設：給·排氣設備, 換氣構(duct), 連結構(port or slot)
- 車輛運行 安全設備：信號體系, 照明, 非常待避空間
- 消防 및 通信設備：火災感知器, 消火栓, 非常電話機, 區間遮斷機
- 排水設備 및 非常通路

여기서 환기시설의 한부분인 연결구는 환기구와 차도를 연결하여 환기용 공기가 통과하는 통로로 그 크기와 배열(위치)에 따라서

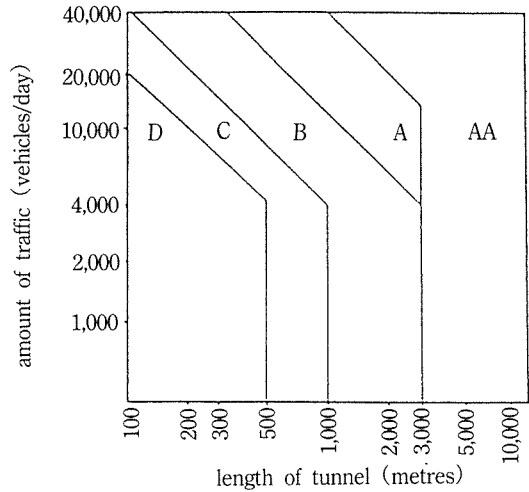


그림 1. 도로터널의 등급

기계적인 환기시설의 성패를 좌우하는 매우 중요한 부분이다. 터널길이 짧은 경우에는 차도만 있는 경우도 있으며, 터널의 길이와 이용차량수(설계차량수)에 따라서 등급이 구별되어 필요한 시설을 하도록 하고 있다. 다음 그림 1은 국제도로협회(PIARC)에서 제안하고

그림 2. 道路터널의 等級別 施設物

安全裝備와 防火裝備		터널等級				
		AA	A	B	C	D
통신 및 警報裝置	電話機	■	■	■	■	
	警報用 버튼	■	■	■	■	
	火災感知器	■	□			
	警報信號機(터널利用者用)	■	■	■	■	
消火裝置	消火器	■	■	■		
	消防用 호스 施設	■	■			
標識板 및 救難裝置	非常出口 標識板	■	■	■	■	
	煤煙排出裝置 또는 터널 利用者 脫出裝置	■	□			
其他 裝置	消火栓	■	□			
	無線通信裝備	■	□			
	라디오 中繼施設 또는 擴聲器	■	□			
	消火用 撒水機	■	□			
	閉回路 TV	■	□			

■ 기본장비, □ 필요에 따라 설치

있는 터널길이와 설계차량수에 따라 구분되는 터널의 등급을 나타내며 그림 2는 도로터널 등급별 필요시설물을 나타내고 있다.

### 3. 道路터널 内部에서의 空氣運動 特性

#### (1) 흐름 성분

터널내부와 출·입구 부근에서 요구되는 또는 필요한 공기질을 유지하는 기본적인 수단은 空氣汚染物質을 稀釋시키는 것이다. 터널 내부에서 연속적으로 발생하는 자동차 배기가스와 발생 폐열을 오염농도가 낮은 맑은 공기(fresh air)를 주입(급기)하여 희석시켜야 하며 오염물질 농도가 높은 오염된 공기(vitiated air)를 배기(배출)시켜야 적절한 공기질을 유지할 수 있는 것이다. 경우에 따라서는 차

도내의 오염된 공기를 배기하여 淸淨過程을 통과시킨 후 대기중으로 방출시키는 방법도 있다.

이러한 급기와 배기과정의 공기흐름은 기본적으로 다음과 같이 5가지의 공기역학적 기구에 의해서 이루어지게 된다.

- ① 터널내부에서의 자동차 운행에 의한 피스톤 작용
- ② 공기부력의 영향
- ③ 터널외부의 대기압의 영향
- ④ 터널외부의 바람조건
- ⑤ 환풍기(급기용, 배기용, 증압(가속)용)를 기본으로 하는 환기설비의 작용

이상과 같은 기본적인 5가지의 공기역학적 기구는 컴퓨터 모형으로의 확립이 가능하게 되어 기존터널에서의 환기상태에 대한 분석은 물론이고 새로운 터널을 효과적으로 손쉽게

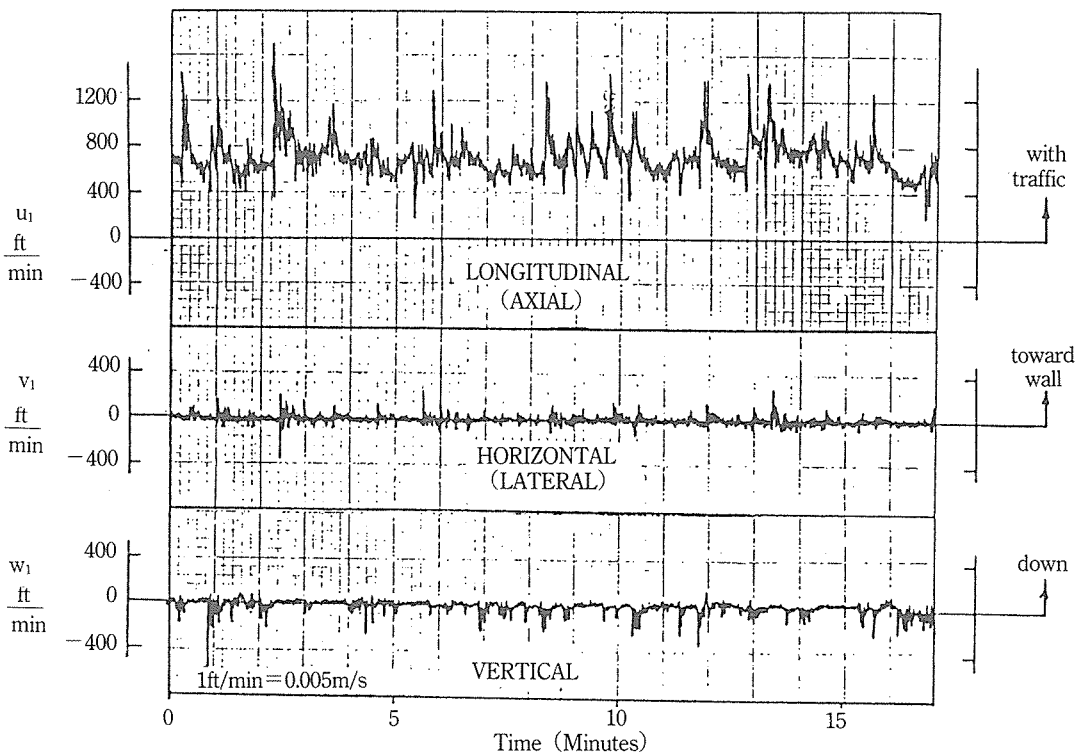


그림 3. 2차선 1방향의 기존터널에서 측정된 공기흐름 속도의 직교성분

계획·설계할 수 있게 하고 있다.

공기는 기본적으로 Newton 유체이고 理想氣體法則으로 나타낼 수 있다. 또 터널의 기하학적 특성으로 보아 터널내부에서의 공기 흐름은 1차원의 종(축) 방향흐름으로 볼 수 있다. 다음의 그림 3은 기존의 2차선 1방향 터널에서 연속적으로 15분간 측정된 공기흐름 속도성분을 보이고 있다.

이 기록은 관성성분이 적은 프로펠러형 공기유속계 3개를 서로 직교하게 배치하여 측정한 것이다. 횡방향 성분과 연직방향 성분의 (측정)시간에 대한 평균값을 구해보면 거의 0이 된다. 반면 터널의 축방향 공기흐름성분은 자동차의 운행에 따른 피스톤 효과와 환기설비에 의한 공기흐름 때문에 매우 높은 강도의 亂流를 나타내고 있다. 그림의 연직방향 속도 성분 기록에서 보면 상향속도 성분이 하향성분보다 강하게 자주 나타나고 있으며, 종방향 속도 성분에서 차량진행방향 성분이 강한 난류성을 보이며 나타나는 것과 연관되어 있음을 볼 수 있다. 약 4.6m/sec(=15ft/sec) 정도의 속도인 경우에도 Reynold數(Rn)는 10<sup>6</sup>대에 이

르고 있으며, 종방향 속도가 0.03m/sec(=0.1 ft/sec)라 할지라도 완전한 난류영역인 10<sup>4</sup>대의 R<sub>n</sub> 값을 나타내고 있다.

이처럼 높은 R<sub>n</sub> 값의 축방향 흐름과 자동차와 환기설비에 의한 유체의 혼합효과의 결합은 터널의 한 단면에서의 축방향 흐름성분의 분포를 상대적으로 거의 균일하게 나타나게 하고 있다. 뿐만아니라 터널의 단면형상은 대개 원형의 일부분(圓弧 또는 馬蹄形) 혹은 形象比(=높이/폭)가 낮은 사각형으로 단면에서의 축방향 속도분포는 원형단면의 그것과 비슷하다. 공기역학적 분석을 통해서 보면 R<sub>n</sub>이 10<sup>6</sup>일 때 터널단면에서의 종(축)방향 공기유속의 평균값은 단면의 중심(최고) 유속의 87% 정도에까지 이르는 것을 알 수 있다. 또 터널에서의 공기흐름을 準定流狀態로 보는 것은 매우 실용적이다. 왜냐하면, 축방향 흐름성분의 평균값은 교통량, 기계적인 환기량, 그리고 터널외부의 풍력 등의 작용력에 대해서 느리게 반응하고 있기 때문이다. 이러한 현상은 터널내부의 공기체적이 가지는 상대적으로 큰 질량관성에 기인하고 있기 때문이다. 그림

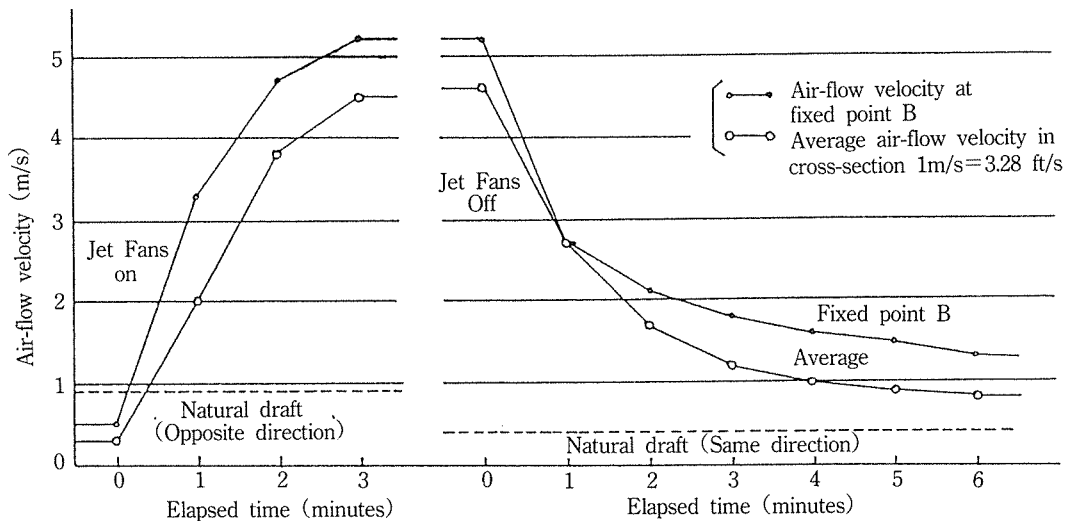


그림 4. 日本 fukushima 터널에서의 jet fan의 단계적 변속에 대한 축방향 공기흐름 속도성분의 動的反應

4.는 일본의 Fukushima 터널에서 측정한 것으로 jet fan을 단계적으로 가속시킨 경우와 단계적으로 감속시킨 경우에 대응하여 나타나는 축방향 공기흐름 속도성분의 動的反應을 보여주고 있다. 이자료에 의하면 반응시간의 遲滯係數는 약 1분 30초정도로 作用力에 대해서 늦은 動的反應을 보이고 있다.

이상에서 분석해본 정상적인 흐름 특성에 기초하여 터널의 각 구성부위별의 흐름성분과 대표적인 측정기구를 정리하면 다음과 같다.

① 車道(roadway) 内部 :

- 縱(軸)方向 速度成分(longitudinal or axial velocity component)
- 水平(橫)方向 速度成分(horizontal or lateral velocity component)
- 鉛直方向 速度成分(vertical velocity component)

② 換氣構(ventilation ducts) 内部 :

- 縱(軸)方向 速度成分

③ 連結構 : 換氣方式에 따라 다름(5節 道路터널 換氣方式 參照)

\* 測定機器 :

- propeller anemometer 혹은 hot-wire anemometer

다시 정리하면 道路内の 흐름은 非壓縮性的 1次元 準定流 狀態의 흐름(incompressible, one dimensional and quasi-steady state)이 卓越하며,  $Re \geq 10^6$ 의 亂流로, 車輛흐름과 관련된 局地的인 變動渦流가 강하게 發生한다.

(2) 支配方程式

터널내부에서의 공기흐름과 차량으로부터 배출된 혹은 차량의 운행과 더불어 유입된 각종 오염물질의 이동상태를 나타내는 지배방정식은 다음과 같다.

① 連續方程式

터널내부의 공기질량의 보존에 기초한 연속방정식은 다음과 같다(그림 5. 참조).

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

여기서, U는 터널축방향의 임의의 지점에서의 단면적에 대한 평균공기(밀도= $\rho$ ) 속도로 차량진행방향을 (+)로 한다. 단위는 m/s를 사용한다. 또  $\rho_i$ 는 給氣密度,  $\rho_e$ 는 排氣密度,  $q_i$ 는 터널중(축)방향의 단위길이당의 換氣量(體積)으로  $q_i$ 는 給氣量,  $q_e$ 는 排氣量이며 단위는  $m^3/s$ 를 사용한다. A는 터널의 유효단면적으로 기하학적인 단면적 ( $A_g$ )보다 약간 작은 값을 가진다. 이는  $A_g$  가운데서 차량이 차지하는 면적이 있기 때문이다.  $Q_i$ 는 터널축방향의 단위길이당의 터널단면적 전체에 대한 환기량으로  $Q_i$ 는 給기량,  $Q_e$ 는 排기량으로 단위는  $\ell /sec$ 를 사용한다.

A와  $A_g$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{A}{A_g} = 1 - \left( \frac{N_+}{V_+} + \frac{N_-}{V_-} \right) \{ (1 - \psi_i) v_i + \psi_i v_i \} / A_g \quad (2)$$

여기서,  $N_+$ 는 (+) 방향으로의 단위시간당의 차량수 [ $v_{ph} = veh/hr$ ],  $N_-$ 는 (-) 방향으로의 단위시간당의 차량수 [ $v_{ph}$ ],  $V_+$ 는 (+) 방향으로서의 차량속도 [ $kph$ ],  $V_-$ 는 (-) 방향으로의 차량속도 [ $kph$ ],  $\psi_i$ 는 교통량에 포함된 대형차량(디젤유 사용)을,  $v_i$ 는 (소형)자동차의 평균체적 [ $m^3$ ],  $v_i$ 는 대형차량의 평균체적 [ $m^3$ ]이다.

② 運動量 方程式

도로터널에서의 축방향 공기흐름은 터널외

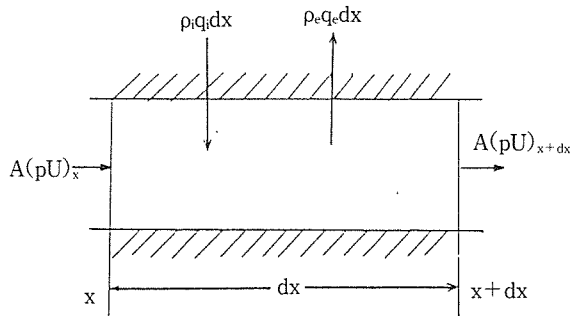


그림 5. 터널의 제어체적에서의 질량보존 성분도

부의 조건과 더불어 터널길이방향으로의 動的平衡狀態를 이루는데 작용하는 모든 空氣動力學的 힘들의 均衡에 의해서 결정된다. 이러한 힘들의 균형은 다음과 같은 식으로 나타내어질 수 있다(그림 6. 참조).

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Accel}} = & F_{\text{Vent}} + F_{\text{Jet Fans}} + F_{\text{External}} - F_{\text{Gravity}} \\
 & \text{환기시스템에 의한 힘} \quad \text{외부조건에 따르는 힘} \\
 & + F_{\text{Piston}} - F_{\text{Friction}} \quad (3) \\
 & \text{차량에 의한 힘} \quad \text{내부의 흐름손실}
 \end{aligned}$$

각 分力들을 구하는 방정식과 해법에 대해서는 생략하기로 한다. 이러한 分력들을 구하는 식들을 식 (3)에 대입하면 연속연결구를 가진 터널에 대해서는 다음과 같은 축방향 공기흐름의 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\rho} \frac{A}{2} (U_L^2 - U_0^2) = & \\
 2\bar{\rho} \int_0^L [(1-k_i)q_i - (1-k_e)q_e] dx & \\
 - \bar{\rho} \frac{AU_L}{4} [\xi_i(|U_L| - U_L) + \xi_e(|U_L| + U_L)] & \\
 - \bar{\rho} \frac{AU_0}{4} [\xi_e(|U_0| - U_0) + \xi_e(|U_0| + U_0)] & \\
 + \frac{\bar{\rho}}{2} \int_0^L [(C_D A_v) + \frac{N_+}{V_+} (V_+ - U) |V_+ - U| & \\
 - (C_D A_v) - \frac{N_-}{V_-} (V_- + U) |V_- + U|] dx & \\
 - \bar{\rho} \frac{A\lambda}{2D} \int_0^L U |U| dx & \\
 + F_{\text{Jet Fans}} + F_{\text{Chimney}} + A\Delta P_{\text{Atm}} - A\Delta P_{\text{Wind}} & \quad (4)
 \end{aligned}$$

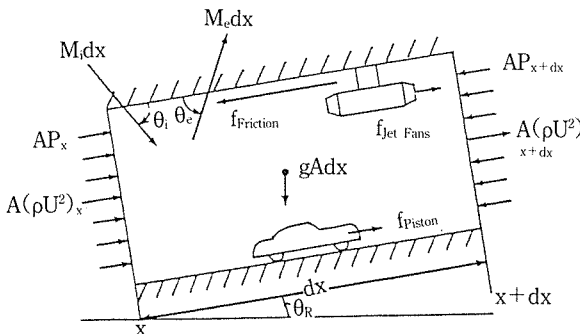


그림 6. 터널의 제어체적에서의 축방향 운동량보존 성분도

여기서 하첨자 0는 터널의 입구를 나타내며, L은 출구를 나타낸다. λ는 터널내부표면과 공기 흐름사이에서 일어나는 마찰손실의 계수이다. ξ<sub>i</sub>는 급기시의 흐름의 입구에서의 손실계수이고, ξ<sub>e</sub>는 배기시의 흐름의 출구에서의 손실계수이다.

그런데 대개의 경우 연결구의 운동량계수는 터널전구간에 걸쳐서 일정(k<sub>i</sub>=k<sub>e</sub>=k)한 것으로 볼 수 있으며, 항력계수도 일정하게 볼 수 있다. 따라서 각 주행방향별로 (C<sub>D</sub>A<sub>v</sub>)<sup>+</sup>=(C<sub>D</sub>A<sub>v</sub>)<sup>-</sup>=C<sub>D</sub>A<sub>v</sub>이다. 또 교통량 (N<sub>+</sub>, N<sub>-</sub>)과 차량속도 (V<sub>+</sub>, V<sub>-</sub>)도 터널전구간에서 일정한 것으로 가정할 수 있다. 이러한 가정들과 연속방정식 식 (1)을 사용하면 식 (4)는 다음과 같은 식 (5)로 변환된다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\rho} \frac{A}{2} (2k-1)(U_L^2 - U_0^2) = & \\
 - \bar{\rho} \frac{AU_L}{4} [\xi_i(|U_L| - U_L) + \xi_e(|U_L| + U_L)] & \\
 - \bar{\rho} \frac{AU_0}{4} [\xi_e(|U_0| - U_0) + \xi_e(|U_0| + U_0)] & \\
 + \bar{\rho} \frac{C_D A_v}{2} \frac{N_+}{V_+} \int_0^L (V_+ - U) |V_+ - U| dx & \\
 - \bar{\rho} \frac{C_D A_v}{2} \frac{N_-}{V_-} \int_0^L (V_- + U) |V_- + U| dx & \\
 - \bar{\rho} \frac{A\lambda}{2D} \int_0^L U |U| dx & \\
 + F_{\text{Jet Fans}} + F_{\text{Chimney}} + A\Delta P_{\text{Atm}} + A\Delta P_{\text{Wind}} & \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서 C<sub>D</sub>는 자동차의 항력계수이고, A<sub>v</sub>는 자동차의 전방투영면적이다.

식 (4) 또는 식 (5)와 연속방정식 식 (1)은 터널운영조건 또는 설계조건에 따라 발생할 수 있는 터널내부의 공기흐름을 해석하는 지배방정식으로 사용된다.

### ③ 에너지 方程式

터널의 제어체적에 대한 에너지 보존방정식은 다음과 같다(그림 7. 참조).

$$\begin{aligned}
 A[\rho U (h + \frac{U^2}{2} + gz)]_x + \rho_i q_i (h_i + \frac{q_i^2}{2a_i^2} + gz_i) dx & \\
 + e^* V_{eh} dx + e^*_{jet} dx + e^*_{Equip} dx & \\
 \text{제어체적속으로 유입되는 에너지를} &
 \end{aligned}$$

$$= A[\rho U(h + \frac{U^2}{2} + gz)]_{x \times dx} + \rho_e q_e (h_e + \frac{q_e^2}{2a_e^2} + gz_e) dx + e_{H.T.} dx$$

제어체적으로부터 배출되는 에너지

이식을 미분식으로 변환하여 터널전구간에 대해서 적분하면 다음과 같은 터널에서의 에너지 보존방정식을 구할 수 있다.

$$\int_0^L e_{veh} dx + \int_0^L e_{jet} dx + \int_0^L e_{equip} dx$$

$$= A[\rho_i U_i (h_i + \frac{U_i^2}{2} + gz_i) - \rho_o U_o (h_o + \frac{U_o^2}{2} + gz_o)] + \int_0^L [\rho_e q_e (h_e + \frac{q_e^2}{2a_e^2} + gz_e) - \rho_i q_i (h_i + \frac{q_i^2}{2a_i^2} + gz_i) dx + \int_0^L e_{H.T.} dx$$

(8)

이식의 좌변 첫 항은 자동차로 부터 전체 터널내부의 공기로 전달되는 에너지이고 두번째 항은 Jet Fans의 가동으로 부터 방출되는 에너지이다. 또 세번째 항은 조명기구 등으로 부터 터널내부의 공기로 유입되는 에너지이다. 우변의 첫 항은 터널의 출입구에서 교환되는 유체(공기,

수분, 오염물질 등) 흐름에 의한 에너지교환량이고, 두번째 항은 환기설비를 통한 유체흐름에 의한 에너지교환량이다. 세번째 항은 터널 벽체를 통해서 교환되는 에너지 교환량과 출입구에서의 열복사에 의한 교환량을 나타낸다.

④ 物質輸送 方程式

터널에서의 오염물질의 수송을 나타내는 지배방정식은 터널의 공기질을 해석하는데 꼭 필요한 것으로 기체상태의 오염물질은 물론 粒相汚染物質, 매년 및 안개현상에 대해서도 적용할 수 있어야 한다.

터널에서의 오염물질의 수송을 나타내는 지배방정식을 유도하는데 필요한 기본가정은 무엇보다도 공기흐름이 개별오염물질에 대해서도 질량보존이 성립한다는데 기초하고 있다. 터널에서의 오염물질은 주로 자동차의 배기가스에 의해서 유입되지만 출입구와 급기에 의해서도 유입된다. 이렇게 유입된 오염물질은 移流, 擴散, 그리고 重力의 작용에 의해서 수송된다. 移流輸送은 가장 주된현상으로 공기흐름식과 오염물질보존식의 결합으로 해석할 수 있다. 즉 먼저 공기흐름식을 해석하고 이를 기초로 해서 공기질을 해석하여 오염농도를 구할 수 있다.

오염물질의 농도(체적기준의 ppm 단위)는 압력과 온도변화에 기인한 밀도변화에 영향을

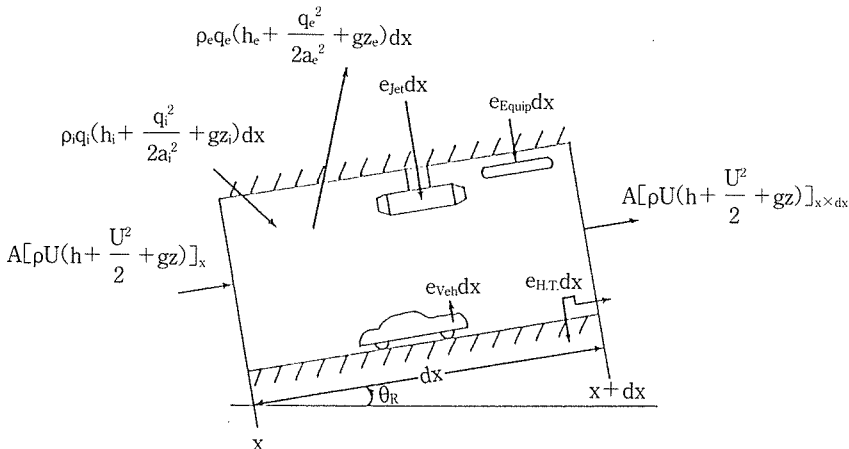


그림 7. 터널의 제어체적에서의 에너지보존 성분도

받지 않으며 오염물질의 질량은 터널내부의 공기질량에 비해서 상대적으로 매우 작은 양이기 때문에 평균적인 공기밀도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho = \frac{1}{V} \int_0^L \rho dV \quad (9)$$

여기서,  $V$ 는 터널체적,  $\rho$ 는 국지적인 공기밀도 [ $g/cm^3$  또는  $l\ b/ft^3$ ], 터널의 한단면에서의 오염물질의 농도  $C$ 도 그 단면 전체에 걸쳐서 균일한 것으로 볼 수 있으며 이는 현장관측에서 확인되어 있다. 이러한 균일성은 높은  $R_n$  數의 공기흐름과 자동차의 주행으로 발생하는 대규모의 난류발생, 그리고 Jet Fans와 같은 환기시스템의 효과등에 의한 혼합의 결과이다.

횡류식 환기방식 터널의 한단면의 여러 위치에서 측정된 오염물질의 농도를 그림 8에서 볼 수 있다. 이 터널은 차도바닥면 부근의 양쪽 측벽에서 급기하여 각 차선의 천정으로 배기하는 환기방식이다. 천정부근의 6개 위치에서 1시간

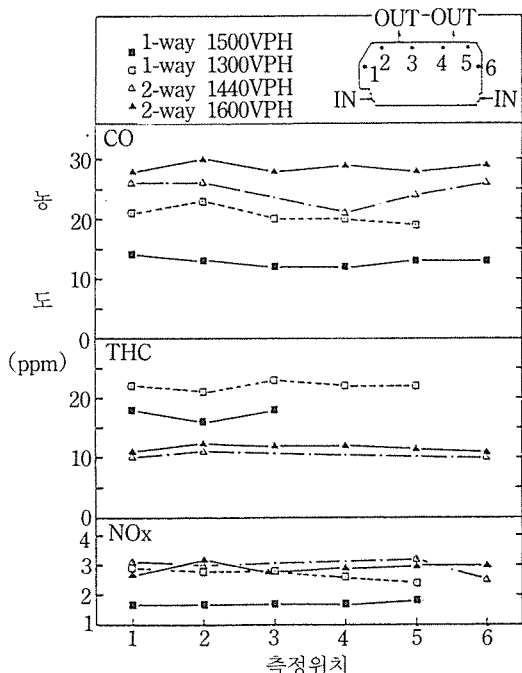


그림 8. 횡류식환기 터널의 천정 부근에서 측정된 오염물질(CO, NOx, THC)의 농도분포

동안 표본을 채취하여 CO, NOx, THC를 측정하였으며, 이러한 측정은 다른 단면에서도 반복되었으며 운행차량조건을 달리하며 측정되었다. 결과를 보면 모든 단면에서 각종 오염물질의 농도가 거의 균등하게 분포하고 있음을 볼 수 있다.

그림 9. a는 반횡류식 환기터널에서 일정한 환기조건인 오전기간동안에 연속적으로 측정된 CO 농도를 보이고 있다. CO 농도는 대체적으로 교통량(900vph가 최고임)에 비례하고 있음을 보이고 있다. 또 그림 9. b는 역시 반횡류식 환기방식의 다른 터널에서 측정된 CO 농도를 보이는 것으로 교통량은 800vph~1700vph였으며 환기율을 변화시켜가며 측정된 결과이다. 이를 보면 초기의 2.5시간 까지는 최고의 환기율을 유지한 결과 약 30ppm의 CO 농도를 보였으나 그후 환기율을 낮춘결과 CO 농도는 50%정도가 증가되어 약 45ppm에 이르게 되었다. 시험관측 시작 5.3시간후에 환기율을 0(환기시설 가동중지)으로 한 결과 CO 농도는 7분정도만 120 ppm까지 상승하였다. 이러한 상태를 1시간정도 유지한 후 다시 환기설비를 최고율로 가동한 결과 CO농도는 급격하게 줄어들어 전과 같은 수준에 이르게 되었다.

이러한 사실에 기초하여 터널에서의 오염물질수송 지배방정식을 유도한 결과는 다음 식과

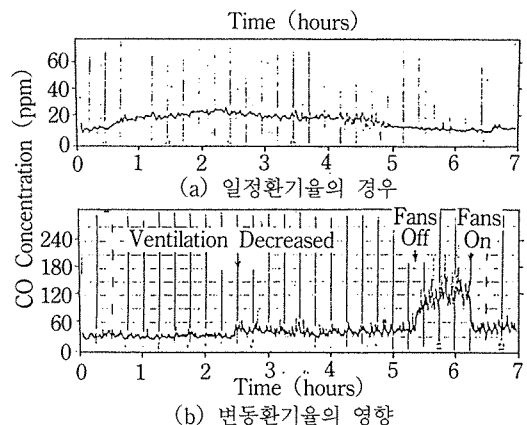


그림 9. 기존터널에서 측정된 CO농도(ppm)



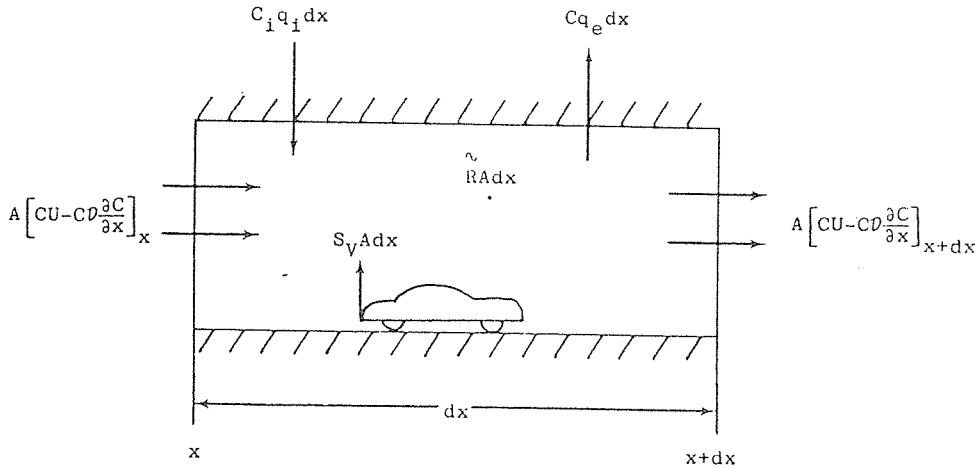


그림 10. 터널의 제어체적에서의 오염물질의 질량균형 성분도

같다(그림 10. 참조).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (C_i - C) \frac{q_i L}{UA} + \frac{LS_v}{U} \quad (10)$$

$t = \frac{U_i}{L}$  : 무차원 시간

$x = \frac{x}{L}$  : 무차원 거리(위치)

$P_e = \frac{UL}{D}$  : Peclet數

여기서, C는 오염물질의 농도(ppm), C<sub>i</sub>는 급기의 오염물질 농도(ppm), q<sub>i</sub>는 급기량, L은 터널길이, S<sub>v</sub>는 자동차의 오염물 발생율[ppm/s], D는 전체확산량 [m<sup>2</sup>/s]으로 일정한 것으로 가정한다.

P<sub>e</sub>는 Peclet數와 移流效果과 擴散效果의 비를 나타내는 無次元 값으로 큰값(P<sub>e</sub> ≫ 1.0)은 이류 효과가 훨씬 탁월한 경우를 나타내는 것으로 축방향의 확산효과는 무시할 수 있는 경우이다. 반면에 작은 값은 축방향의 확산효과는 탁월한 경우를 나타내는 것이다. 실제로 도로터널의 경우에는 P<sub>e</sub> ≫ 1.0으로 축방향의 확산효과는 무시하는 것이 실용적이다. 이식에 기초해서 터널내부의 공기흐름의 오염물질의 이동이 (준)정류 상태임을 고려하면 다음식을 구할 수 있다.

$$\frac{d(UC)}{dx} = \frac{C_i q_i}{A} - \frac{C q_e}{A} + S_v \quad (11)$$

또는 다른 형태로

$$U \frac{dC}{dx} = (C_i - C) \frac{q_i}{A} + S_v \quad (12)$$

이식을 터널의 입구의 위치 x(터널의 입구 위치는 x=0)에 대해서 적분하면 x 위치에서의 오염물질 농도 C<sub>x</sub>는 다음과 같다.

$$C_x = C_0 + \int_0^x \frac{S_v}{U} dx - \frac{1}{A} \int_0^x (C - C_i) \frac{q_i}{U} dx \quad (13)$$

여기서 C<sub>0</sub>는 환기구와 차도사이의 연결구에서의 급기의 오염물질 농도이다. 우변의 둘째항은 자동차가 터널입구로부터 x 위치에 이르기까지 배출한 그 오염물질의 총량을 나타내며, 셋째항은 오염물질 농도 C를 가진 급기량에 의한 농도의 희석효과를 나타내는 것이다.

### (3) 分析項目

앞에서 정리한 支配方程式들을 이용하여 다음과 같은 設計資料를 분석해 낼 수 있다. 마찰손실, 차도연결구를 통한 給·排氣 空氣質量과 관련하여 이동차량, 공기흐름 변화, 압력변화, 유속변화의 상호관계, booster(jet) fan에 의한

압력변화, 그리고 오염물질의 濃度分布 등을 분석한다.

그런데 오염물질의 이동은 오염물질의 濃度傾斜에 따르는 分散(diffusion)항 보다는 空氣動力學的 對流에 의한 移流(advection)항이 지배적이다.

(4) 環境關聯 測定項目 :

도로터널에서 문제가 될 수 있는 공기질을 나타내는 중요성분은 다음과 같이 구분하여 정리할 수 있다.

① 汚染濃度(concentration) 관련 물질

- 一酸化炭素(CO : carbon monoxide)
- 窒酸化物(NO<sub>x</sub> : nitrogen oxides)
- 全水素(THC : total hydrocarbon)

이들 오염성분들은 다음과 같이 측정하고 있다.

○ 측정방법 :

- 터널단면과 縱(軸) 방향으로 각 단위에서 1시간동안 捕集布를 이용하여 捕集한다.
- 單一位置에서 24時間 連續測定한다.
- 오염물질의 縱方向 분산과 출·입구 부근에서의 순환을 관측하기 위해서 化學追跡物(chemical tracer, 예 : sulfur hexafluoride [SF<sub>6</sub>])을 사용한다.

② 交通騒音(traffic noise level) : 騒音의 진폭(amplitude level)과 octave band를 측정하여 분석한다.

③ 縱方向의 온도 및 습도 변화 : psychrometer 사용하여 측정한다.

④ 浮游粉塵과 可視距離(visibility level) : 측정방법이 규격화 되지 않은 상태라서 각종 측정기마다 값이 다르게 나타나고 있다.

4. 換氣方式의 選擇基準

選擇한 換氣方式이 安全(設計)基準\*을 준수할 수 있는 능력을 분석하여 적절한 환기방식을

선택하고 있으며 이러한 안전기준으로는 일반적으로 다음과 같은 성분들을 택하고 있다.

\* 안전기준

① 공기오염물질(CO, NO<sub>x</sub>, THC)의 최대허용농도

② 浮游粉塵 및 可視距離

③ 縱方向 最大空氣流速

냄새가 나지않을 정도의 깨끗한 터널공기를 유지하기 위해서는 CO 농도를 100~150ppm으로 유지하여야 한다. 이 정도의 CO 농도를 유지하면 NO<sub>x</sub>는 정상적으로 충분하게 희석되어진다. CO는 인체에 즉각적인 작용을 하여 250ppm 정도의 농도에서 1시간정도 체류하면 두통이 발생한다.

한계(허용) 可視能(visibility : 이를 매연농도 [K<sub>lim</sub> : m<sup>-1</sup>]라고도 한다)은 침투교통량 상태에서의 가시거리의 역수로 높은 교통밀도의 도시 고속터널에서는 허용가시능을 0.005 정도로 유지하여야 한다. 또 설계속도가 60~80km/h 일 때는 0.0075 정도의 가시능을 유지하도록 하여야 하며, 교통정체가 심하게 되면 가시능은 감소되며 가시능은 0.009m<sup>-1</sup> 정도까지 증가한다. 가시능이 0.012m<sup>-1</sup>에 이르면 반드시 터널을 차단하여 교통량의 유입을 막아야 하며 터널내부에서 작업을 할 때는 가시능을 0.002~0.003m<sup>-1</sup>를 유지하도록 하여야 한다. 縱方向 最大空氣流速은 차량주행의 안전성과 경제성을 고려해서 10m/s를 한계값으로 사용하고 있다.

5. 道路터널 換氣方式

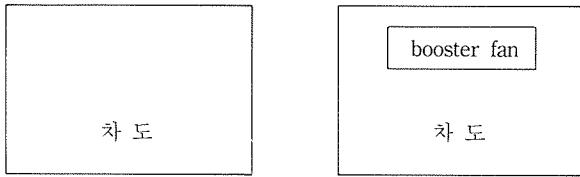
도로터널의 환기방식은 공기흐름의 특성에 기초해서 일반적으로 다음과 같이 분류한다.

- ① 自然式(natural ventilation)
- ② 縱(軸)流式(longitudinal ventilation)
- ③ 半橫流式(semi-transverse ventilation)
- ④ 橫流式(transverse ventilation)
- ⑤ 空氣膜式(air curtain ventilation)

이들 가운데서 특히 굴뚝 및 空氣淨化機(air purification)의 병용은 많은 용량의 공기가 低濃度의 여러 종류의 汚染物質을 포함하고 있을 때 사용하는 것이 일반적이다. 분류한 각 환기

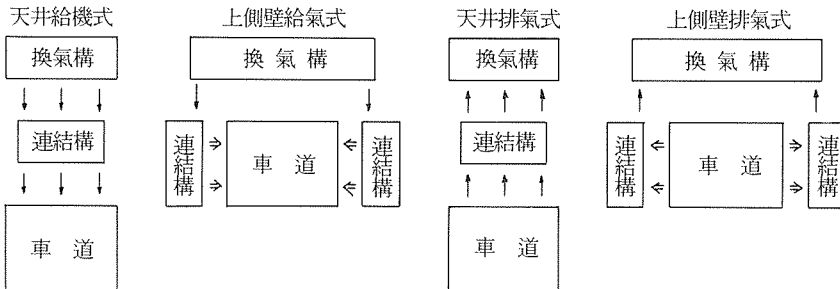
방식에 따른 터널의 기본구성체에서의 공기흐름방향은 다음 모식도와 같다(그림에서 화살표가 공기흐름방향을 나타낸다).

[1] 自然式 또는 縱流式

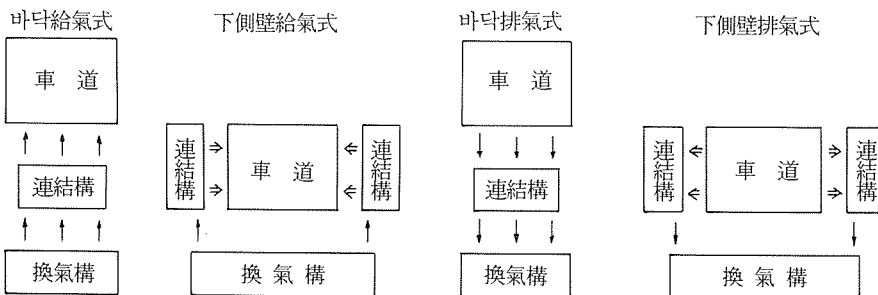


[2] 半橫流式 換氣

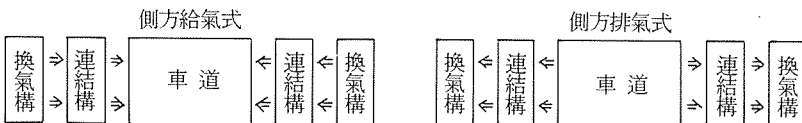
(1) 天井 給/排氣式 :



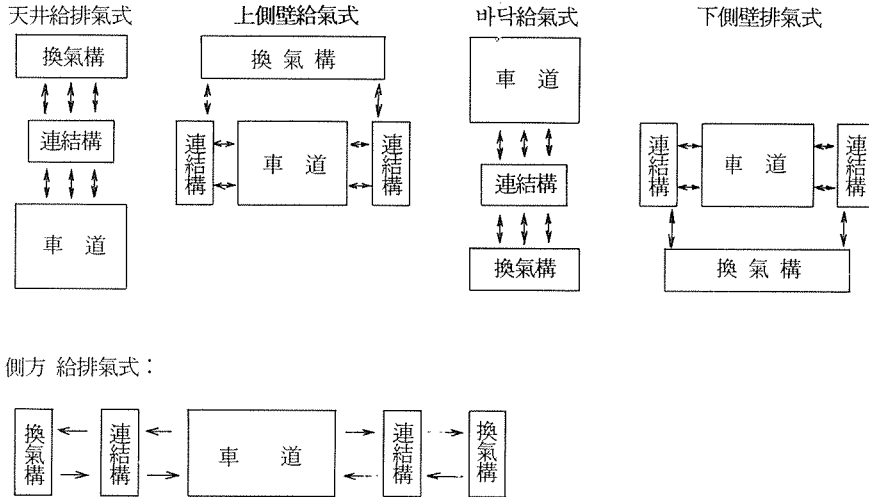
(2) 바닥 給/排氣式 :



(3) 側方 給/排氣式 :



[3] 横流式 換氣



6. 道路터널 換氣方式의 特性比較

6.1 自然式 換氣(natural ventilation)

자동차의 피스톤 작용력과 자연력(굴뚝효과와 기압배치에 의한 흡입력)에 의한 환기방식으로 길이 250m 이하의 도로터널과 길이 450m 이하의 교통량이 작은 산악터널에서 주로 사용한다.

6.2 縱流式(longitudinal ventilation)

환기설비에 의해서 종방향 공기흐름량, 즉 종방향 공기유속을 증가시켜 오염물질의 농도를 저하시킨다. 사용되는 설비의 종류에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ① Portal fan 방식: 터널 입구(급기용)나 출구(배기용)에 fan을 설치하여 종방향 공기유속을 증가시킨다.

표 1. 여러가지 변수들이 자연환기 요소에 미치는 영향

변 수	피스톤 유속	오염 원	출구 오염농도
교통량	증 가	증 가	증 가
차량의 유효단면적	증 가	NC	감 소
경사(상향)	NC	증 가	증 가
차량속도	증 가	CO, THC 감소 NO <sub>x</sub> 증가	CO, THC 감소 NO <sub>x</sub> 약간감소
터널단면적	감 소	NC	감 소
풍속(차량진행방향)	증 가	NC	감 소
터널길이	약간 증가	증 가	증 가
마찰계수	감 소	NC	증 가
고도	NC	CO, THC 증가 NO <sub>x</sub> 감소	CO, THC 증가 NO <sub>x</sub> 감소
양방향 교통흐름	대량 감소	NC	대량 증가

NC : No Change(변화없음)

- ② jet fan 방식 : 터널내부의 천정부근에 Booster(Jet) Fan을 설치하여 종방향 공기 유속을 증가시킨다.
- ③ central shaft 방식 : 터널 중앙부에 급기장치 혹은 배기장치 또는 두가지 장치 모두를 가진 방식으로 fan이 있는 경우와 fan이 없는 경우로 구분할 수 있다. fan이 없는 open shaft 방식은 차량통과에 따른 압력을 감소시키는 효과는 크기 때문에 지하철 환기에 많이 이용하고 있다.

### 6.3 半橫流式(semi-transverse ventilation)

Portal fans 방식의 종류식 환기법과 비슷하지만 차도내로의 공기유입이 Portal fan 방식에서는 한점에서 급기 또는 배기되지만 반횡류식에서는 환기기로 공급된 공기가 여러개의 연결구를 통해서 차도내로 균등하게 공급되던지 아니면 다음과 같은 4가지의 기본방식이 있다. 즉, 급기식, 배기식, 급기/배기식, 배기/급기식으로 구분할 수 있으며 이들중 『급기식』이 가장 보

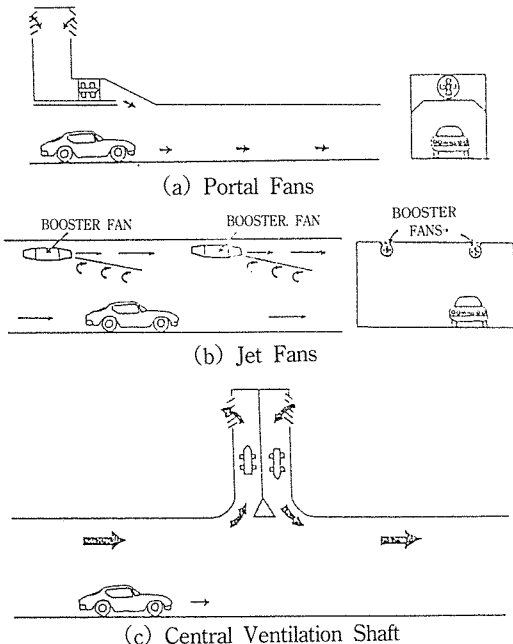


그림 11. 縱流式 換氣方式

편적으로 사용되는 것으로 환기구의 적절한 위치(통상 중앙점)에다 격벽(Bulkhead)을 설치하여 급기되는 공기흐름의 교란이 발생하지 않도록 한다. 『배기식』은 앞의 급기식과는 정반대의 공기흐름 현상을 이루는 방식으로 차도내의 공기를 배기시킴에 따라 차도내의 정압이 감소하여 출입구를 통한 공기유입이 과다하게 될 수도 있어서 차량의 안전운행에 영향을 줄 수 있어 미국 Alabama주 Mobile시에 있는 Bankhead Tunnel 외에는 사용예를 찾기가 힘들다. 혼합방식인 『급기/배기식』은 차량진행의 입구부분에서 급기하고 출구부분에서 배기하는 방식으로 이론적으로는 가능하나 유지관리면에서의 효율성이 낮아서 아직까지는 실예가 없는 실정이다. 『배기/급기식』은 『급기/배기식』과는 정반대의 공기흐름방식으로 미국의 펜실바니아주 Pittsburg시에 있는 Squirrel Hill Tunnel이 좋은 예가 되

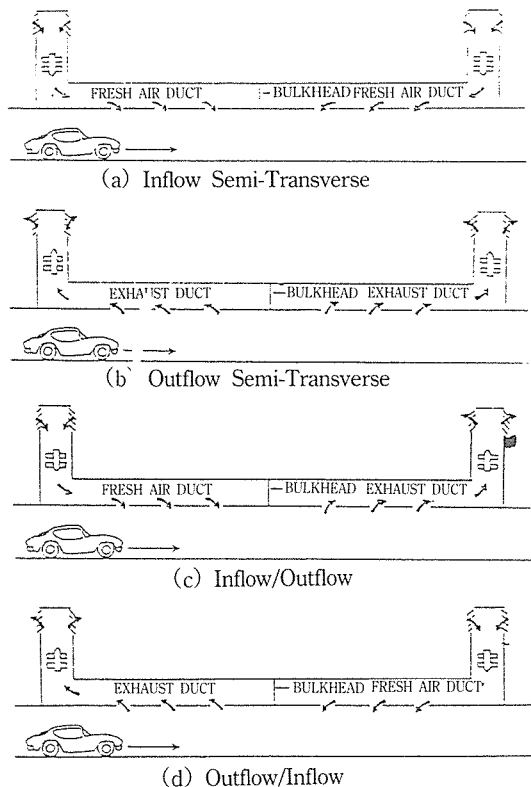


그림 12. 半橫流式 換氣方式

왔다.

### 6.4 横流式(transverse ventilation)

급기와 배기가 차도를 중심으로 하여 병렬로 동시에 이루어 지는 방식으로 급기용 fan(blower)과 배기용 fan(exhaust fan), 그리고 두개의 換氣構가 필요하다. 맑은 공기는 차도바닥 부근에서 급기하고 오염된 공기는 터널의 천정으로 배기하는 것이 전형적이다. 이 방식은 가장 경비(시설비 및 유지관리비)가 많이 드는 방식이지만 장대터널의 경우에 많이 사용되고 있다. 실제 사용예로서 Lincoln Tunnel의 경우에는 횡류식과 반횡류식의 중간형태로 처음 5개 환기구간에는 배기용 fan만 작동하고 있으며, Elbe River Tunnel에서는 순수 횡류식을 설치하였으나 처음 4개 환기구간에는 급기식 반횡류방식으로 운용하고 있으며, 출구쪽 환기구간에서는 횡류식을 채택하고 있다.

### 6.5 空氣膜式(air curtain ventilation)

장대터널에서 횡류식과 반횡류식 환기방식의 환기설비를 하는 경우에 매우 긴 환기구를 필요로 하는 경우가 많다. 이런 경우에는 건설비뿐만 아니라 환기설비의 유지관리비가 차지하는 비율이 상당히 크게 된다. 이러한 문제점에 대한 대안으로써 장대환기구를 필요로 하지않는 공기막(air curtain)을 이용하는 방법이 있다. 이는

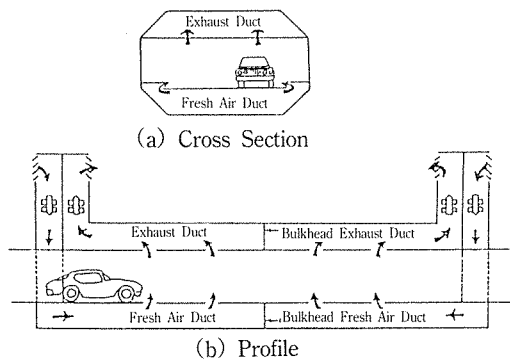


그림 13. 横流式 換氣方式

central shaft 방식과 비슷하지만 터널길이방향으로 일정한 간격을 두고 여러개의 fan을 설치하여 사용하는 것이 다르다. 각 fan의 위치에는 배기구간에 이어서 급기구간이 설치되어 차도내의 공기오염수준을 낮추는 것이다(그림 14. 참조). 이 방식에서는 종(축)방향 공기유속이 공기막사이의 구간에서는 일정하며 터널길이 방향의 오염물질 농도분포는 톱니형상을 이루게 되며 공기막 직후부분에서 최저농도를 유지하게 되며 선형적으로 증가하여 이어지는 다음 공기막 직전부분에서 최고의 농도를 나타낸다. 이러한 높은 오염농도의 공기는 공기막에서 배기되며 급기에 의해서 교환(희석)되어 적정수준이하로 유지된다.

공기막의 수와 위치는 허용농도의 수준과 차량에 의해서 터널내부로 유입되는 공기량에 대한 fan의 환기능력에 의해서 결정된다.

가장 효율적인 방식은 각각의 공기막 직전에서의 오염농도가 터널출구에서의 오염농도와 같도록 하는 것이다.

## 7. 환기방식들 간의 상대적인 효율성 비교

채택가능한 환기방식들에 대한 비교는 최대 허용 오염농도수준과 정상운영 및 비상운영시의

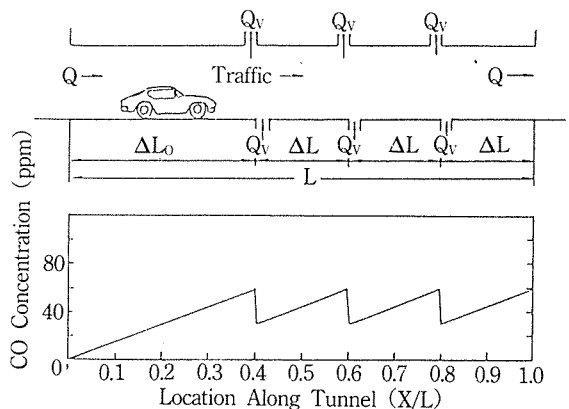


그림 14. 공기막식(3구간) 환기방식의 예

안전성, 설비의 설치의 제한성, 그리고 급·배기용 fan의 효율성 등에 대한 요소들을 반드시 포함하여 평가하여야 한다.

### 8. 터널환기 분석 및 설계용 프로그램 TUNVEN

컴퓨터 프로그램 TUNVEN은 정류상태의 공기동력학 방정식(연속방정식과 1차원 운동량 방정식)과 오염물질 이류방정식을 결합하여 해를 구하는 것으로 주어진 터널설계조건, 교통량, 환기량 및 터널외부의 바람, 공기오염도 등의 조건들에 대해서 터널내부의 공기속도, 압력(동압 및 정압) 및 오염물질(CO, NO<sub>x</sub>, THC)의 농도를 계산할 수 있는 것이다.

프로그램 TUNVEN을 이용하면 설계자는 필요한 환기량과 환기방식을 손쉽게 결정할 수 있어서 새로운 터널을 계획·설계하거나 기존 터널의 개수, 그리고 기존의 AQM 계획을 개선하고자 할 때 매우 편리하게 사용될 수 있다.

터널환기 방식의 결정은 기본적으로 터널의 길이, 첨두(설계) 교통량, 최대차량속도 같은 요소들에 달려 있다. 이 때 설계자는 안전조건들을 반드시 만족시켜야 한다.

일반적으로 설계교통량에 따라 터널의 차선수가 결정된다. 미국의 예를 보면 일방향 교통흐름에서는 차선당 1200vph~1500vph, 2방향 교통흐름에서는 차선당 1000vph가 평균적인 첨두교통량 기준으로 사용되고 있다. 이러한 첨두교통량 상태에서의 최고 차량속도는 30~40mph (=48~64kph)로 터널에 연결된 도로에서의 제한속도보다 약간 낮은 편이다.

현재 사용하고 있는 일산화탄소의 농도에 대한 규정은 미국 환경청(US-EPA)이 다음과 같이 규정하고 있다. 즉 “도로터널 사용자가 해수면 표고에서 CO 농도 125ppm을 초과하지 않으며 노출시간이 60분 이상을 초과하지 않는 적절한 안전수준”으로 규정하고 있다. 이 규정을 미국

연방도로공사(US-FHWA)에서는 “터널을 통과하는 동안에 최대 CO 농도 125ppm과 최대노출시간 60분”으로 강화하여 규정하고 있다. 그러나 Rocky 산맥을 통관하는 Eisenhower Tunnel(길이 : 약 3.4km)의 경우에는 최대 CO 농도를 100ppm으로 제한하고 있으며 장기간 평균 CO 농도 50ppm을 기준하여 건설되었다. 자동차는 약 10kph의 속도일 때 최대의 CO를 배출한다. 자동차 엔진과 연료의 개선으로 CO 배출량은 감소하고 있으나 디젤차량의 증가에 따라서 최근에 와서는(특히 유럽지역에서) 터널의 “可視能”에 더 관심을 가지게 되고 있으며 이에 대한 기준을 규정하려고 하나 可視能을 측정하는 장비의 규격화가 어려워 국제적인 표준화가 이루어지지 않고 있다.

터널내부의 공기유속은 영국에서 12m/sec까지 관측된 보고가 있으며 미국에서는 9m/sec까지 관측된 보고가 있다. 일반적으로 경제성과 안전성을 고려하여 10m/sec를 터널 내부의 공기유속의 한계값으로 채택하고 있다. 마찰손실은 공기유속의 제곱에 비례하기 때문에 보다 높은 속도를 유지하려면 훨씬 큰 fan을 필요로 하기

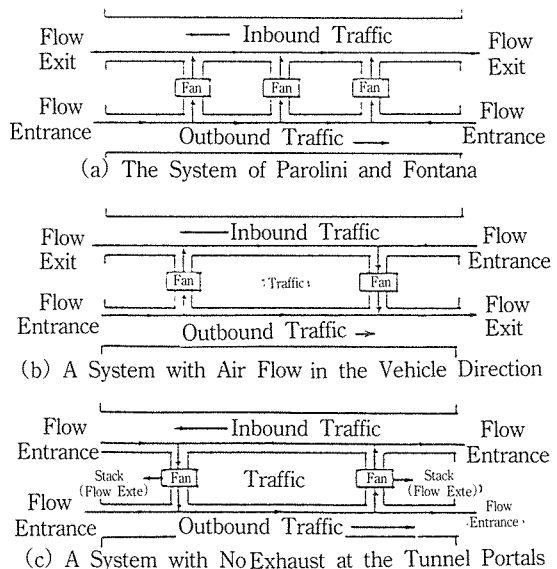
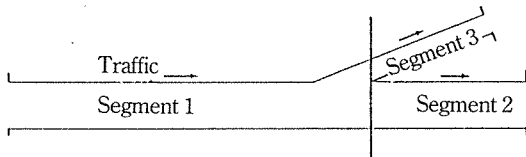
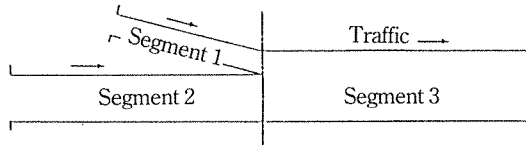


그림 15. 통합환기방식의 예



(a) Tunnel with an Exit Ramp



(b) Tunnel with Entrance Ramp and Additional Lane

그림 16. Ramp를 가진 도시터널의 예

때문에 비경제적이다.

최근에 와서는 해저터널과 같이 터널중심부가 출입구보다 낮은 장대터널의 경우에는 두개의 나란한 터널을 설치하여 각각을 1방향통행으로 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 이런 경우에는 개별적으로 독립된 환기설비를 운용할 수 있으나 統合方式(Integrated Ventilation System)으로 운용하는 것이 훨씬 효율적일 수가 있다(그림 15. 참조).

이러한 통합방식의 주목적은 장대터널에서의 횡류식 환기방식에 대한 대안을 찾는 데 있다. 이 방식에서는 차도자체가 환기구의 역할을 하는 것이다. 특히 쌍굴의 경우에는 출입구 부근에서 배출된 오염된 공기가 다른 굴로 유입되지 않도록 하여야 한다. 출입용 ramp를 가진 도시터널(그림 16. 참조)의 경우에는 TUNVEN을 이용하여 각 구간(segments : ramp 전·후 및 ramp

자체 구간)별로 필요한 환기량을 축차해법으로 구할 수 있다.

## 9. 맺는 말

도로터널에서의 공기흐름과 공기질의 변화를 나타내는 지배방정식들을 정리하여 보았으며 이들을 이용하여 각종 환기방식들이 갖는 특성들을 개략적으로 분석하였다. 이러한 분석을 위한 컴퓨터 프로그램 TUNVEN에 대해서도 소개하였다.

터널의 공기흐름이 갖는 동적특성을 알고 이를 이용하여 도로터널에서의 환기문제를 해결하도록 해야 하겠다. 정량적으로 총량(환기량)을 구하여 평면적인 균등배분을 하고 있는 현재의 기법들을 하루빨리 개선하여야 할 것으로 믿는 바이다. 이러한 기법에 의한 설계대로 만들어진 터널구성체에서는 공기의 흐름이 균등하게 흐르지 않기 때문이다.

이상에서 개략적으로 소개한 개념과 기법을 이용하여 서울의 북부간선도로의 터널구간(홍제동~국민대학 구간으로 약 3760m 길이의 3차선 쌍굴)의 환기설비를 계획하는데 적용한 바 있으며 이터널에서의 AQM 계획도 수립한 바 있다. 이에 대한 것과 환기구내에서의 공기흐름과 연결구에서의 공기흐름, 그리고 터널에서 오염된 공기를 정화하는 기법에 대해서는 다음 기회에 소개하기로 한다. ⊙

