

철도터널의 환기특성에 관한 연구

The Characteristics of Ventilation in Railway Tunnel



유 지 오*¹
Yoo, Ji-oh



신 현 준*²
Shin, Hyun-Jun



이 호 석*³
Lee, Ho-Seok

Abstract

This study aimed at investigating the influence of tunnel length and area, drag coefficient, train velocity on the characteristics of ventilation in railway tunnel. The modified Subway Environment Simulation(SES) computer program has been used to calculate the flow velocity and longitudinal emission concentration with various condition. According to a series of numerical simulation, the influence of various parameter on maximum air flow velocity, purging length and emission concentration are estimated

Key words : Rail road tunnel ventilation, Purging time, Rail road tunnel, Emission concentration

요지

철도터널에서 오염물질의 거동은 열차의 운행조건 및 터널의 구조 등과 같은 다양한 인자에 의해 영향을 받아 매우 복잡한 양상을 보이게 된다. 본 연구에서는 SES프로그램을 수정하여 해석한 농도계산을 이용하여 철도터널에서 오염물질의 거동특성을 구명하고, 터널의 단면적, 길이 및 열차의 항력계수, 주행속도가 터널의 최대풍속 및 오염농도에 미치는 영향에 대한 분석결과를 제시하였다.

주요어 : 철도터널환기시스템, 공기교체시간, 철도터널, 배기농도

*¹ 정회원, 신홍대학 건축설비과 교수

*² 정회원, 한국건설기술연구원 건설설비연구그룹장

*³ (주)범창종합기술 대리

1. 서론

최근 들어 산업과 생활수준의 향상에 따라 도로나 철도 등의 기간산업에 대한 고속화 및 대용량화가 요구되면서, 특히 철도에 있어서는 신규노선 공사 및 선형의 직선화 및 복선화가 활발히 이루어지면서 터널건설이 증가하고 장대터널이 요구되고 있는 실정이다.

이에 따라 철도터널의 환기시스템의 설계기법에 관심이 고조되고 있으나 현재의 국내에는 철도터널 환기설계를 위한 기술의 축적이 거의 없는 상태로 현재 발주되는 대부분의 공사를 외국의 용역사의 설계 및 자문에 의존하고 있는 실정이다.

일반적으로 철도터널의 환기는 차량의 발열을 처리하기 위하여 터널내 온도상승을 억제·제어하는 목적과, 차량에서 배출되는 오염물질의 제거하여 쾌적한 환경을 확보하기 위한 환기로 구분되며, 또 장대터널에서는 화재시를 대비한 배연 및 방재시설이 환기시스템과 관련하여 설계되고 있다.

철도 터널에서 환기 시스템은 터널을 운행하는 차량의 구성(사용연료, 운행조건) 및 터널의 제원(터널길이, 터널 단면적)에 따라서 크게 변할 수 있다.

철도 터널환기방식은 터널의 특성상 열차가 통과한 후에 오염공기를 효율적으로 신선공기로 교체(purging)할 수 있는 방식이 적용되고 있으며, 다수의 터널에 채택된 방식은 사카르트(saccrdo)방식, 수직갱 송배기방식, Portal Door방식 및 서비스(또는 파이롯트)터널을 이용한 송배기방식이 있다.⁵⁻⁸⁾

또한 오염물질 제거를 목적으로 하는 환기의 경우에도 철도 터널에서는 도로터널과는 달리 차량이 궤도를 일정한 시간 간격을 두고 운행하기 때문에 가시거리가 크게 문제시되지 않는다. 따라서, 인간에게 생리적 작용에 영향을 주는 가스상 물질(CO, NOx)이 환기의 대상이 되게 된다. 특히 디젤 기관차에서의 오염물질 배출량은 차량에 비해 상당히 크기 때문에 이에 대한 처리가

요구되고 있다.

그러나 이에 대한 국내의 기술축적은 전무하며, 또한 도로터널과는 달리 터널내 기류의 형성이 열차의 운행에 의해서 급격하게 변하기 때문에 비정상 상태의 계산이 수행되어야 하는 점에서 수계산을 통한 환기설계에 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 철도터널의 환기설계를 위한 기본개념의 정립을 위하여 미국의 운수성(DOT)에 의해서 개발되어 전 세계적으로 지하철환기설계에 사용되고 있는 SES 프로그램을 이용하여 터널내 오염농도를 계산하기 위한 프로그램을 개발하였으며, 터널길이, 단면적 열차의 운행속도, 항력계수등이 터널내 풍속변화 및 오염농도분포에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 철도터널내 풍속 계산

본 연구에서는 터널에서의 풍속은 SES프로그램에 의해서 구하였으며, SES에서는 터널전구간 및 계단이나 환기구를 섹션으로 분할하여 압력평형식을 구하고 Loop System Method에 의해서 풍속을 구하고 있다.^{1,2)}

터널내 풍속에 가장 큰 영향을 미치는 교통환기력에 대해서 알아보면 다음과 같다.

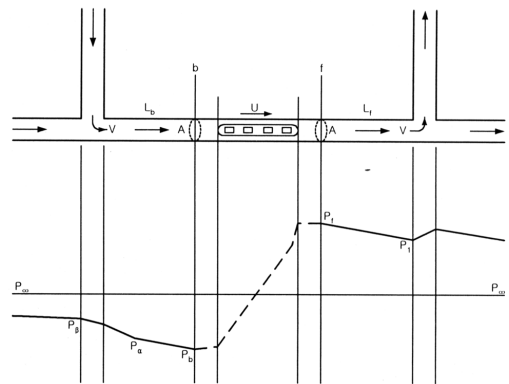


그림 1. 터널내 열차의 피스톤 효과

그림 1은 두 환기구 사이를 주행하고 있는 열차 주변의 압력분포를 보여주는 그림이다.

터널의 기류는 교통환기력이라고 표현하는 구간 b 와 f 사이에서의 압력차에 의해서 발생하게 된다. 열차 주변 (near-field)의 유동현상은 터널전체 (far-field)의 유동현상으로 대체되어 계산되며, 열차의 견인력은 식(1)과 같다.

$$C_D = \frac{\Delta P}{\frac{\rho}{2g} V^2 \sigma} - f_t \left(\frac{|\sigma - \beta| (\sigma - \beta)}{(1 - \delta)^2} \right) \left(\frac{\ell}{d \sqrt{\sigma}} \right) \quad (1)$$

열차 앞에서의 압력 P_f 는 식(2)와 같이 터널에서의 마찰저항과 환기구에 의한 압력손실로 표현된다.

$$P_f = P_1 + f \frac{L}{D} \rho \left(\frac{U^2}{2g} \right) \quad (2)$$

또한 열차 앞에서의 교통환기력(driving force) 계수는

$$C_{\Delta p_o} = \frac{P_1 - P_\infty}{\frac{\rho}{2g} U^2} \quad (3)$$

열차 뒷부분의 압력강하도 같은 방법으로 표현할 수 있다. 다만 환기구에서 터널로 들어오는 기류는 초기에 환기구 상류점의 압력에 따른다는 것만 다르다. 따라서 환기구를 통하여 들어오는 공기의 난류 혼합에 의한 압력차를 고려해야 한다. 이는 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$P_b = P_a + f \frac{L}{D} \rho \left(\frac{U^2}{2g} \right) \quad (4)$$

$$C_{\Delta p_{xi}} = \frac{P_b - P_a}{\frac{\rho}{2g} U^2} \quad (5)$$

$$C_{\Delta p_i} = \frac{P_\infty - P_\beta}{\frac{\rho}{2g} U^2} \quad (6)$$

위의 식들을 종합하여 압력차를 구하면 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\frac{\rho}{2g} V^2 \sigma} &= \frac{\beta^2}{\sigma} \left[C_{\Delta p_o} + \frac{f}{D} (L + \ell) + C_{\Delta \pi} + C_{\Delta p_{xi}} \right] \\ &= \beta^2 Q \end{aligned} \quad (7)$$

일정한 기하학적 특성(ℓ/d)을 가지는 열차의 견인저항 계수는 다음 식으로 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$C_D = \frac{\Delta P}{\frac{\delta}{2g} V^2 \sigma} C_{D\infty} (1 - \beta^2) \quad (8)$$

상수 $C_{D\infty}$ 는 $\beta=0$ 일 때 무한대로 긴 터널에서의 견인저항을 근사한 값이다. 여기서, β 는 Table에 의해서 σ 의 함수로 구해진다.¹⁾

3. 철도터널에서 오염물질 확산

3.1 철도터널에서 오염물질 배출특성

철도터널에서의 오염물질 배출특성은 터널을 통과하는 차량에 따라서 현저한 차이를 나타낸다. 즉 터널을 전기기관차만 주행하는 경우에는 오염물질의 배출이 전혀 없다고 볼 수 있으나, 디젤기관차가 통과하는 경우에는 기관의 출력이 자동차에 비해서 대형이기 때문에 오염물질 배출량이 현저하게 증대하며, 주 오염물질은 CO, NOx, 매연 등이 된다.

특히, 기관차는 NOx의 발생량이 많기 때문에 단 한대가 통과하더라도 터널내 농도가 허용농도를 초과하는 경

우가 발생할 수도 있다.

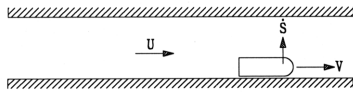
오염물질배출량은 표1 과 같다. 본 연구에서는 송의 연구³⁾에 의해서 제시된 배출량을 적용하였다.

표에 의하면 CO와 NO_x가 거의 동일한 수준이기 때문에 상대적으로 허용농도가 엄격한 NO_x가 문제시되는 경우가 많다.

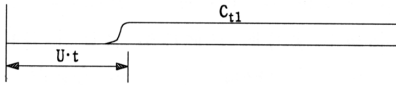
표 1. Notch별 오염물질 배출량

(단위 : g/HP · h)

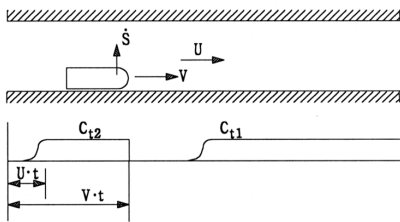
대상	Notch	RPM	HP	KNR	SONG	EMD	UIC	EPA
NO _x	idle	260	17	9598	-	86.13		
	8	894	2953	42.67	18.58	10.40		
	평균	-	-	47.37	19.17	21.68	12.00	9.5
CO	idle	260	17	37.95	-	33.36		
	8	894	2953	26.32	17.71	1.87		
	평균	-	-	17.74	14.26	4.75	3.00	5.00



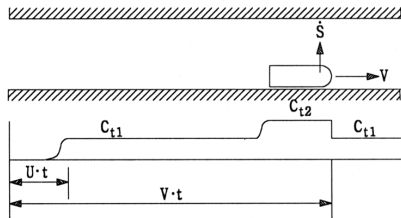
(a) 한대의 열차가 운행중인 경우



(b) 열차가 터널출구를 통과한 시점



(c) 일정시간후에 다음열차가 진입한 경우



(d) 열차가 오염물질이 배출되지 않은 지점을 통과하는 경우

그림 2. 철도 터널에 오염농도에 대한 개념도

3.2 철도터널에서 오염물질의 농도 계산

철도터널에서 오염물질은 열차의 이동에 따라서 이동하는 점 소스(point source)가 되므로 열차의 속도와 터널내 풍속이 일정하면 열차가 지나간 지점의 농도는 일정한 값을 나타내게 된다.⁴⁾

또한 열차가 터널을 주행할 때 열차의 화통(exhaust stack)에서 오염물질이 배출되면 오염물질은 열차주위를 흐르는 공기흐름이 난류이기 때문에 급속하게 터널내 공기와 혼합되며, 터널내 오염물질의 농도는 확산체적에 의존하게 되는데, 이 확산체적은 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 열차와 터널내 공기의 상대속도에 의해서 결정되게 된다

초기오염농도가 C₀인 터널을 열차가 일정한 속도(V)로 통과하고 터널내 풍속(U)이 일정하다는 가정 하에 그림.2와 같이 한 대의 열차가 진입하여 t 초 동안 주행하는 경우에 터널내 오염농도를 계산하면 다음과 같다.

t초 동안 열차의 이동거리 :

$$L_t = V \cdot t \tag{9}$$

t초 동안 터널입구에서 신선공기 유입하는 거리 :

$$L_a = U \cdot t \tag{10}$$

오염공기의 확산 체적 :

$$V_a = |V - U| \cdot A_r \cdot t \tag{11}$$

오염농도의 변화량 :

$$\Delta C = \frac{S \cdot t}{V_a} = \frac{S}{|V - U| \cdot A_r} \tag{12}$$

오염농도 :

$$C_t = C_o + \Delta C \quad (13)$$

따라서, 열차가 터널을 주행하고 있는 동안에 터널내 농도는 열차가 통과한 구간에서는 거의 일정한 값을 보이게 되며, 이 값은 터널길이와는 무관하며, 상대속도와 오염물질 배출량에 의해서만 결정된다.

본 연구에서는 시간에 따른 국부농도는 농도변화는 식 (14)를 차분하여 계산하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_r \frac{\partial C}{\partial x} = S_u \quad (14)$$

4. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 각종인자(터널길이, 단면적, 주행속도, 열차의 항력계수)를 갖는 철도터널에서 오염물질의 환기 특성을 검토하는 것을 목적으로 SES프로그램을 터널내 오염농도분포를 계산할 수 있도록 수정하였으며, 표 2와 같은 조건에서 계산을 수행하여 풍속 및 농도특성을 비교·검토하였다.

표 2. 각종 인자별 계산조건

변 수	계 산 조 건
터널길이	2000, 4000, 6000, 8000, 10000m
항력계수	0.24, 0.45, 0.64
터널단면적	38, 43, 48m ² (단선터널)
	52, 55, 58m ² (단선터널 확대단면) 64, 67, 70m ² (복선터널)
주행속도	40, 60, 80, 100, 120 km/h
마찰계수	0.025

그림은 열차가 1대가 터널에 진입한 후 1시간동안의 농도변화를 나타낸 것으로 열차가 터널내에 있는 동안에는

열차의 위치에서 최대 농도를 보이게 되며, 신선공기의 유입으로 공기 교체가 이루어진 부분은 농도가 저하하지만 그렇지 못한 부분의 농도는 거의 일정한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림에서 신선공기가 유입하는 교체거리(purging length)는 시간이 경과하면 증가하고 있으나 이 경우에 1시간이 지나도 완전히 공기교체가 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

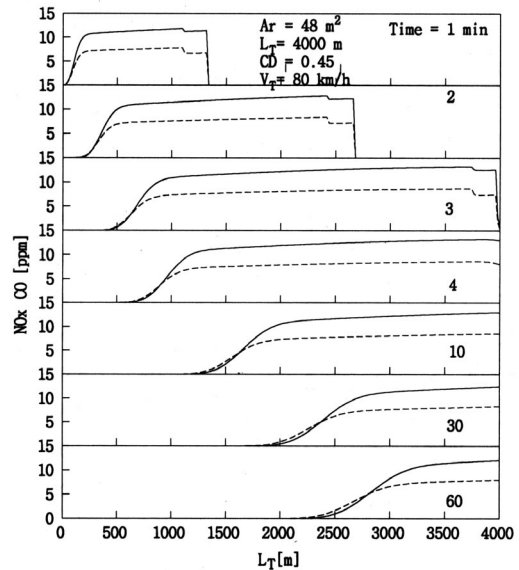


그림 3. 터널내 농도분포

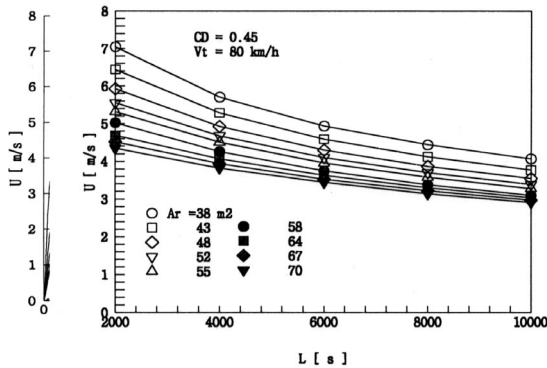
또 그림에서 점선 및 실선은 각각 NOx와 CO농도를 나타내고 있다. 오염물질의 농도는 CO, 13 ppm, NOx, 8 ppm으로 CO농도가 높게 나타나고 있으나, CO에 대한 허용농도는 100~150 ppm인 반면에 NOx의 허용농도는 25 ppm이므로 NOx가 보다 치명적인 것으로 판단된다.

그림 3은 터널축방향의 농도변화를 시간에 따라서 나타낸 것이다.

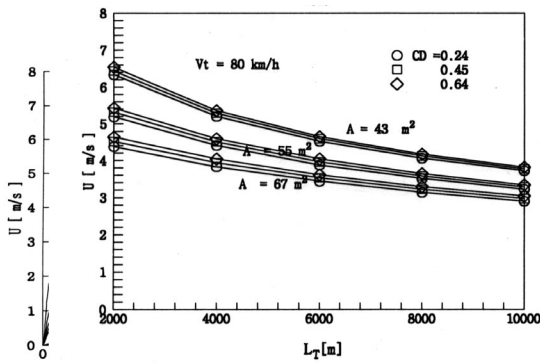
그림 4은 주행속도가 80 km/h이고 항력계수가 0.45인 열차 통과시 시간에 따른 터널내 풍속(U)변화와 공기 교체거리(purging length, L_p)를 나타낸 것이다.

그림 4(a)는 터널 단면적이 43 m²인 단선터널로 터널내

풍속은 열차가 터널에 진입한 후 초기에 급격하게 증가하며 열차가 빠져나간 후 급격하게 감소하고 있다. 이와 같은 경향은 터널길이가 짧을수록 현저하게 나타나고 있으며, 터널길이가 10,000 m로 긴 경우에는 초기에 급격한 풍속증가를 보이며 열차가 터널내에서 운행하고 있는 경우에는 어느 정도 시간동안 일정한 풍속을 보이고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 시간에 따른 터널풍속 및 공기교체거리

즉 열차의 진입으로 인한 피스톤효과에 의해서 풍속이 급격하게 증가하여 피스톤효과와 터널내 마찰손실의 균형이 유지되면 풍속은 거의 일정한 값을 보이며, 열차가 터널을 빠져나가게 되면 교통신기력의 소멸로 급격한 풍속 감소현상이 나타남을 알 수 있다. 풍속의 감소는 터널

길이가 긴 경우보다 터널길이가 짧은 경우에 현저하게 나타나는데 이는 공기의 관성에 의한 것으로 생각된다.

또 그림에서 공기교체거리(Lp)는 열차가 터널을 통과하는 시간동안에는 터널길이가 짧을수록 길게 나타나고 있으나 열차가 터널을 통과한 후에는 터널길이가 길수록 증가하는 하는 것으로 나타나고 있다. 이는 터널길이가 길수록 공기의 관성이 증대하므로 열차 통과 후에 풍속의 감소가 완만하게 일어나기 때문이다.

그림 4(b)는 터널 단면적이 67 m²로 복선터널에 해당하며, 단면적이 43m² 인 경우와 거의 동일한 경향을 보이고 있으며, 최대풍속은 단면적이 작은 경우보다는 작게 나타나고 있다.

또한 그림 5는 단면적 변화에 따른 터널내 풍량을 나타낸 것으로 터널길이가 동일한 경우에는 터널 단면적이 증가면 풍속은 감소하나 터널내 풍량은 증가하는 것으로 나타나고 있다. 즉 터널단면적의 증가율보다 풍속의 감소율이 작다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 터널길이 및 터널 단면적, 항력계수, 주행속도가 터널내 풍속에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

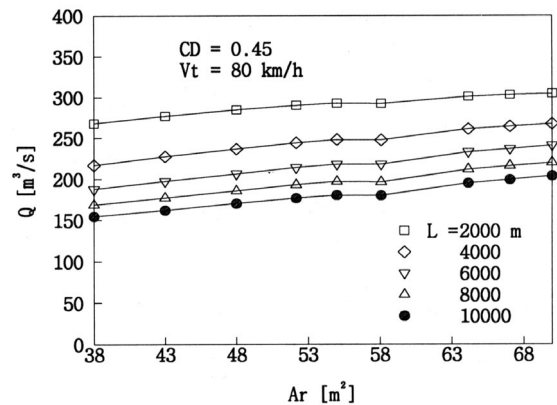


그림 5. 터널내 풍량

그림 6(a)는 터널길이와 터널내 풍속을 나타낸 것으로 터널의 길이가 증가하면 터널내 풍속은 마찰저항의 증대로 감소하는 것을 알 수 있다. 이때 터널길이의 증가에 따른

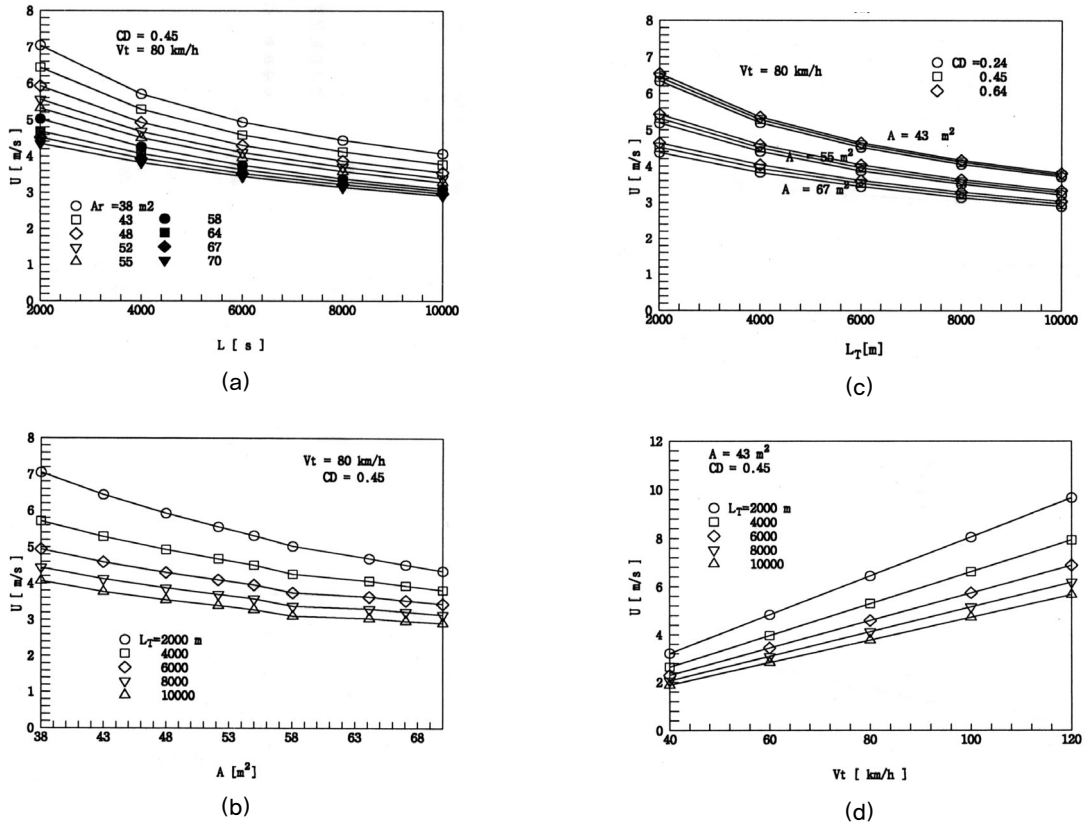


그림 6. 각종 인자가 주행속도에 미치는 영향

터널풍속의 감소율은 터널 단면적이 작을수록 크게 나타나고 있으며 터널 단면적이 38 m²일 때 2000m인 경우에는 풍속이 7.1 m/s에서 10000 m 인 경우에는 4.1 m/s로 42.3% 감소하며, 70 m²일 경우에는 터널길이가 2000 m에서 10000 m로 증가하면 4.3 m/s에서 2.9 m/s로 약 32% 감소하고 있다.

그림 6(b)는 터널 단면적과 풍속의 관계를 나타낸 것으로 터널길이가 동일할 때 터널 단면적이 증가하면 터널내 풍속은 감소하고 있다.

이때 감소율은 터널 길이가 짧을수록 크게 나타나고 있으며, 복선단면터널의 경우에는 단면적 증가에 따른 풍속 감소율은 그다지 크게 나타나지 않고 있다.

그림 6(c)는 열차의 항력계수가 미치는 영향을 검토하

기 위한 것으로 단면적이 동일한 경우에 항력계수의 영향은 터널길이에 관계없이 거의 같은 정도로 나타나고 있으며, 일반적으로 지하철에 해당하는 $CD=0.64$ 에서부터 고속전철의 형상과 비슷한 $CD=0.24$ 의 범위에서 검토한 결과, 항력계수(CD)가 증가하면 터널내 풍속은 증가하나 0.24에서 0.64로 증가하는 경우에 풍속의 증가율은 길이나 단면적에 관계없이 거의 같은 정도로 나타나고 있으며, 항력계수가 0.24에서 0.64로 증가하는 경우에 풍속 증가율은 대략 10%정도인 것으로 나타나고 있다.

그림 6(d)는 주행속도에 따른 풍속변화를 나타낸 것으로 터널길이가 동일할 때 주행속도가 증가하면 터널내 풍속은 거의 비례해서 증가하는 것으로 나타나고 있다.

이때 증가율은 터널길이가 짧을수록 크게 나타나고 있

으며, 2,000 m일 때는 3배, 10,000 m일 때는 2.5배로 나타나고 있다.

그림 7은 각종 인자가 터널내 NO_x의 최고농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 CO농도는 허용농도에 비해서 상대적으로 작기 때문에 NO_x의 농도를 분석대상으로 하였다.

그림 7(a)는 길이에 따른 최고농도를 단면적을 변수로 하여 표시한 것으로 단면적이 동일할 경우에 터널내 농도는 주행속도와 단면적이 동일하면 터널내 농도는 길이가 길수록 약간 감소하는 경향을 보이고 있으나 터널길이가 2,000 m에서 10,000 m로 증가할지라도 감소율은 10% 이내인 것으로 나타나고 있다. 이는 터널내 농도가 상대

속도에 반비례하는 관계를 갖기 때문에 길이가 증가하면 터널내 풍속이 감소하여 오히려 열차와의 상대속도는 증가하기 때문이다. 그러나 그림에서는 열차가 한 대만 지나가는 경우에 한정하고 있으므로 열차가 두 대이상 통과하여 중첩현상이 발생하는 경우에는 터널길이가 증가하면 터널농도는 2배로 증가한다.

따라서 철도터널의 경우에는 터널내 오염물질의 제거는 다음열차의 운행 스케줄에 따라서 오염공기를 여하히 신선공기로 교체 하나가 관건이라 할 수 있다.

또 그림 7(b)에서는 터널 단면적 변화에 따른 터널내 오염농도의 영향을 길이를 parameter로 하여 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 길이의 영향은 그다지 크지 않으며,

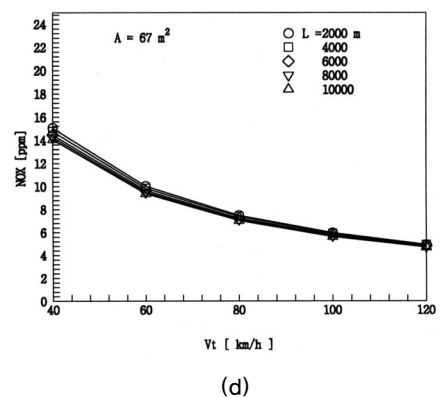
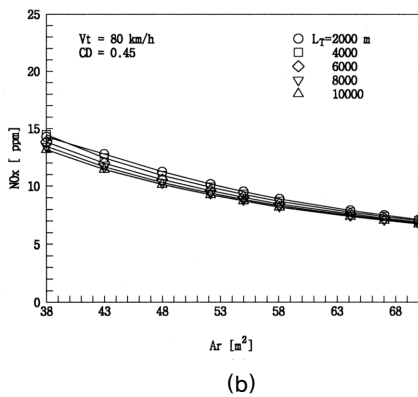
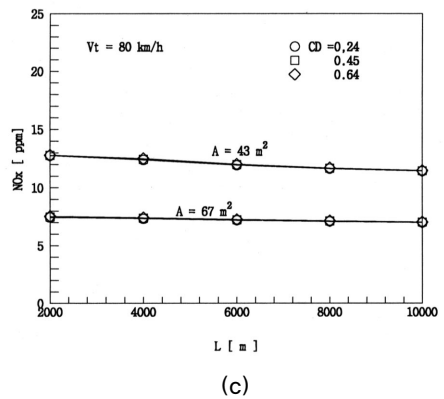
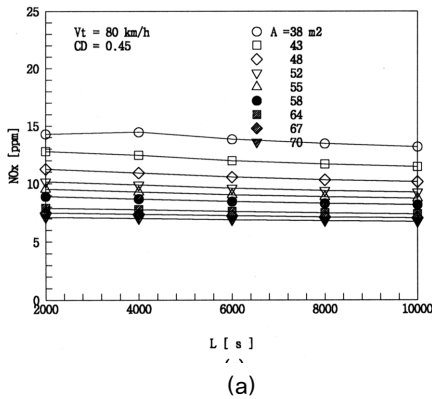


그림 7. 각종인자가 터널내 최대 농도에 미치는 영향

단면적이 증가할수록 터널내 농도는 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 터널 단면적 증가로 터널내 풍속이 감소하여 상대속도가 증가하는 반면에 Fig.5에 나타난 바와 같이 단면적이 증가하여 풍속이 감소할지라도 터널내 풍량은 증가하기 때문이다.

그림 7(c)는 항력의 변화가 터널내 오염농도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 풍속의 경우와 마찬가지로 항력의 영향은 거의 무시할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

그림 7(d)는 주행속도의 변화가 농도에 미치는 영향을 나타내고 있는 것으로 주행속도가 증가할수록 오염농도는 감소하고 있다. 이는 주행속도가 증가할수록 터널내 풍속도 증가하나 풍속의 증가보다 주행속도의 증가가 크므로 터널내 오염농도에 영향을 미치는 상대속도 보다 크게 나타나기 때문이다.

그림 8은 터널길이와 주행속도가 공기교체거리에 미치는 영향을 나타낸 것으로 공기교체거리는 터널에 열차 진입한 후에 10분이 경과한 시점에서 구해진 값이다.

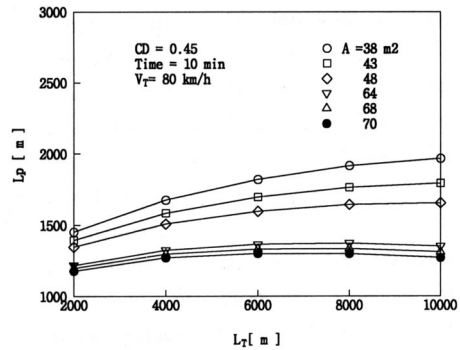
그림 8(a)는 터널길이에 대한 영향을 나타낸 것으로 주행속도는 80 km/h일 때이다.

그림에서 터널길이가 동일한 경우에는 단면적이 작은 단선터널의 경우가 단면적이 큰 복선터널보다 공기교체거리가 크게 나타나고 있다. 이는 단선터널의 경우에는 상대속도가 상대적으로 작기 때문에 터널내 최고농도는 증대하지만 터널 풍속이 크기 때문이다. 또 터널길이 가 증대할수록 교체거리는 증대하는 것으로 나타나고 있다. 이는 그림 4 에서 설명한 바와 같다.

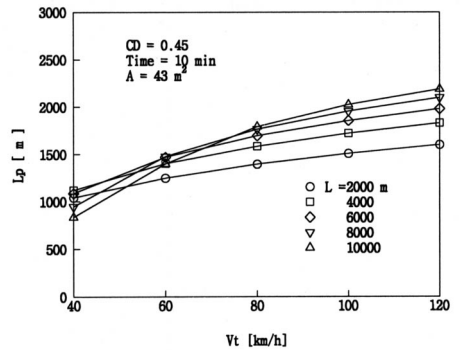
또 복선터널의 경우에는 공기교체거리는 단면적의 변화에 그다지 크게 영향을 받지 않으며, 터널길이가 6,000 m일 때 가장 공기교체효과가 좋은 것으로 나타나고 있다. 계산결과에 의하면 10분 경과시 교체거리는 단선터널의 경우에는 1,400~2,000 m의 범위에 있으며, 복선터널의 경우에는 1,200~1,300 m의 범위에 있는 것으로 나타났다.

이상의 검토에서 터널내 농도에 가장 크게 영향을 미치

는 인자는 터널의 단면적과 주행속도이며 터널길이에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 철도터널에서의 오염물질제거는 도로터널과는 달리 풍속의 증가만으로는 실현될 수 없으며, 오염된 공기를 교체하는 수단이 강구되어야 할 것으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 8. 주행속도와 터널거리에 따른 공기교체거리

5. 결론

본 연구에는 철도터널에서 환기개념을 정립하고 설계를 위한 자료 도출을 목표로 터널의 단면적, 길이 및 열차의 항력계수, 주행속도가 터널의 최대 풍속 및 최대 오염농도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 SES프로그램을

이용하여 터널풍속을 구하고 또 이를 수정하여 터널내 오염농도를 구하였다.

터널내 오염농도 및 풍속에 대한 검토결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 터널내 풍속은 열차진입초기에 급격히 증가하여 열차의 진출시 급격히 감소하는 경향을 이와 같은 현상은 터널길이가 짧을수록 현저하게 나타난다.
- (2) 터널내 최대 풍속은 단면적이 증가하면 감소하는 경향을 보이나 풍량은 증가하는 경향을 갖는다.
- (3) 터널에서 오염농도는 열차와 기류의 상대속도에 의존하며, 열차가 터널을 운행하는 동안에는 신선공기가 영향을 미치지 않는 영역에서는 거의 일정한 값을 갖는다.
- (4) 터널내 최대 오염농도는 터널길이 및 항력계수와는 거의 무관하며 주행속도가 증가할수록 터널 단면적이 증가할수록 감소하는 경향을 갖는다.
- (5) 공기교체거리는 터널 단면적이 작을수록 증가하며 단면적이 64 m²이상인 복선터널의 경우에는 터널길이가 6,000m일 때 가장 증가하나 10분 경과후의 교체거리는 1,200~1,300 m로 큰 차이가 없는 것으로 나타나고 있다.

Vehicle Tunnels 4th International Sym., pp. 353-366.

5. W. D. Kennedy and S.J. Patel, 1988, "The mount Lebanon tunnel ventilation system", Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym., pp. 235-272.
6. B. Bopp, R. Mauron and M. Zwiskyl, 1994, "Ventilation and cooling of the Lotschberg Base Tunnel", Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym., pp. 489-521.
7. M.A. Berner, J.R. Day and G. Bagnoud, 1994, "Ventilation and cooling studies for the Gotthard Base tunnel", Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym., pp. 523-576.
8. D.A. Henson, et.al, 1982, "Aerodynamic and ventilation of proposed Channel tunnel", Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 4th International Sym., pp. 1-14.

참고 문헌

1. Pasons, Brinkerhoff, Quade & Douglas. Inc. Subway Environmental Design Handbook, Volume 2, Principles & Application 2nd Ed., 1976.
2. Pasons, Brinkerhoff, Quade & Douglas. Inc. Subway Environmental Simulation(SES) Programmer's Manual, 1998
3. 송문섭, 1997, "철도차량 Diesel Engine의 배출가스 현황 및 저감방안에 관한 연구", 철도대학 논문집 별책, 제 13집
4. A.E. Vardy and A. Anandara, 1982, "Initial design considerations for rail tunnel Aerodynamics and Thermodynamics", Aerodynamics & Ventilation of