

복선전철 구간 내 디젤차량 운행시 환기특성 예측에 관하여

홍석우[†], 김효규^{*}, 김남영^{**}, 이상범^{**}, 권태성^{***}

서울대학교 기계항공공학부, ^{*}(주)세익MEC, ^{**}(주)삼보기술단, ^{***}대양이앤이기술(주)

On the Prediction of Ventilation Characteristics in case Diesel Trains Run in Double Track Subway Tunnels

S.W. Hong[†], H.G Kim^{*}, N.Y. Kim^{**}, S.B. Lee^{**}, T.S. Kwon^{***}

ABSTRACT: Pollutants emitted by Diesel trains seriously affected on the ventilation characteristics in the subway or railway tunnel network systems. Thus, numerical prediction results and analyses are required to engineers who should design ventilation facilities. So here, this paper presents some numerical results about the ventilation characteristics, such as pollutants distributions and a suitability of the ventilation facilities pre-designed in case that diesel trains use the same railway track with normal passenger trains

Key words: Ventilation(환기), Subway(전철), Diesel Train(디젤차량)

기호 설명

- BHP: Brake Horse Power
- h : hour, 시간
- \dot{S} : 오염물질 생성률
- C_s : mass fraction, 질량분율
- C_f : 터널벽면 마찰계수
- $C_{f,tr}$: 열차벽면 마찰계수

그리스 문자

- γ : 비체적

상첨자

- $\dot{}$: dot, 시간변화율

하첨자

- m : 질량

1. 서론

최근 PSD 설비가 도입된 복선전철 사업이 추진되면서 네트워크형 터널 내 환기특성에 대한 관심과 함께 디젤화물차량의 운행시 환기용량의 적정성 여부에 관한 의문이 제기되었다. 그러나 네트워크형 터널 내 디젤차량이 경유하는 경우 오염물질을 방출하므로 발열량을 기준으로 하는 기존의 지하철 환기설비 용량산출 방식을 그대로 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 PSD 설비를 갖춘 복선전철 노선을 분석 대상으로 선정하였으며 네트워크형 터널 내 디젤차량 운행시 환기특성에 대해 관찰하였다.

본 연구에 사용한 수치해석 기법과 현상 모델은 A.Baron⁽⁴⁾이 제안한 유한체적법(FVM)에 기초하였으며 네트워크형 유체시스템의 분기관이 만나 는 Junction에서는 질량보존법칙과 에너지보존법

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-1903; fax: +82-2-887-2662

E-mail address: episode7star@hotmail.com

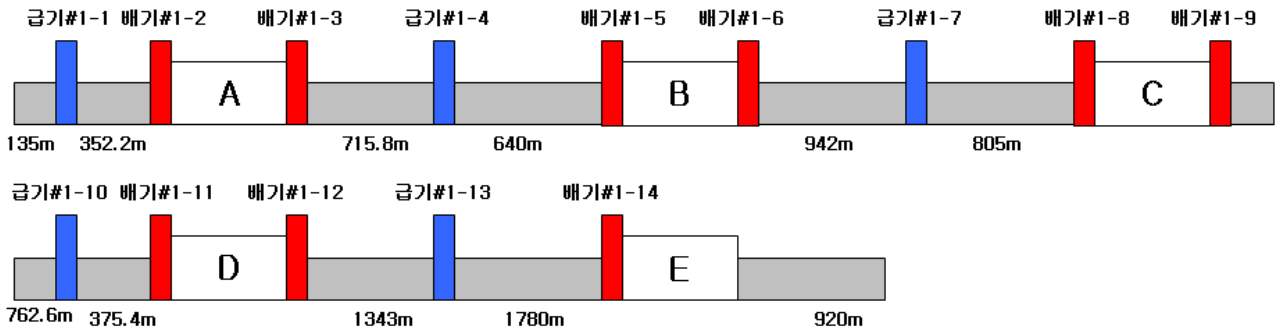


Fig. 1 Schematic of Tunnel Ventilation System

칙을 적용하였으며 분기관의 조합에 따른 손실계수를 반영하였다. 수치해석 기법과 개발된 해석 프로그램에 대한 자세한 논의는 본 논문에서 생략하고 다음의 3가지 검토안에 중점을 두고 분석하였다. 디젤차량의 오염물질 배출량은 Song⁽³⁾의 연구결과를 적용하였고 철도터널 내 디젤차량 운행시 환기특성에 관한 이론은 Yoo, et.al⁽¹⁾의 연구결과를 참고하였다.

- ① 디젤차량 운행에 따른 환기특성
- ② 일반차량 혼용시 환기특성
- ③ 환기용량 증설 후 결과 비교

Table 1 Design Specification of Tunnel and Ventilation Flowrates

본선터널	총연장[m]	단면적[m ²]
	9,859	66
본선환기구	환기방향	설계풍량[CMM]
#1-1	급기	3000
#1-2	배기	3000
#1-3	배기	4950
#1-4	급기	9900
#1-5	배기	4950
#1-6	배기	4950
#1-7	급기	9900
#1-8	배기	4950
#1-9	배기	4950
#1-10	급기	9900
#1-11	배기	4950
#1-12	배기	4950
#1-13	급기	9900
#1-14	배기	4950

2. 시스템 제원 및 해석조건

2.1 시스템 제원

해석대상은 열차가 서로 교행하는 복선전철로 선정하였으며 Fig. 1 은 시스템의 구조를 간략화하여 표현한 것이다. 전체 철도노선은 A~E 5개의 역사와 급기구 5개, 배기구 9개로 구성되어 일반 복선 지하철의 구조와 같다. 그리고 마지막 920m 터널구간은 환기시설을 갖추지 않았으며 터널의 시점부와 종점부는 외기로 개방된 구조로 되어있다. Fig. 1 과 Table 1에서 터널의 총연장과 구간별 길이, 단면적, 그리고 환기실별 풍량을 나타내었다. 구간 내 열차의 운행시각과 주행속도는 Table 2에 정리하였으며 디젤화물열차 주행시 환기특성을 먼저 살펴보고 일반전동차와 혼용시 환기특성을 비교해 보았다.

Table 2 Information about Trains

	일반전동차	디젤화물열차
총길이[m]	180	260
시간당 운행회수	10[대/hr]	1~3[대/hr]
운행속도[km/h]	최고 60	평균 44
감가속도[km/h/s]	감가속도 3	-
오염물질 [g/s]	-	CO : 1.75 NOx: 5.46
허용기준	외기온도 + 4℃	CO 100ppm NOx 25ppm
분석대상	-	O

Table 3 Pollutant Emission by Diesel^{(1),(3)}

Notch	BHP	CO	NOx
		[g/(BHP · h)]	[g/(BHP · h)]
Idle		-	-
1	179.06	4.41	16.84
2	423.19	3.78	15.06
3	805.05	4.81	18.00
4	1,064.45	5.97	18.59
5	1,438.98	9.63	20.29
6	1,830.16	14.45	20.37
7	2,431.60	21.84	19.31
8	2,991.10	17.71	18.58

2.2 오염물질 발생량과 검토기준

철도터널의 환기는 차량의 발열을 처리하기 위하여 터널 내 온도상승을 억제, 제어하는 목적과 차량에서 오염물질 배출시 허용농도 기준을 만족할 수 있도록 오염물질을 제거하기 위한 환기로 구분되며 철도터널에서의 환기시스템은 터널을 운행하는 차량의 구성에 따라 크게 달라질 수 있다. 즉, 전기관차만이 통과하는 경우, 평상 운행 시에는 온도제어를 목적으로 하는 환기시설을 계획하지만 현재 국내에서 계획되는 것과 같이 디젤차가 통과하는 경우 오염물질을 터널 밖으로 배출하는 것을 추가로 고려하여 환기시설이 계획되어야 한다.⁽¹⁻²⁾

$$S_{NOx} = q_o^{NOx} \cdot \frac{1}{V_{NOx}} \cdot \frac{1}{3600} \cdot BHP_N \quad (1)$$

q_o^{NOx} : 운행 Notch 기준 배출량 (g/BHP-hr)

BHP_N : 운행 Notch 제동 마력 (BHP)

디젤열차의 운행에 의한 오염물질 배출량은 식 (1)로 나타낼 수 있으며 제동마력 당 배출량은 Table 3에 나타내었다. Table 3에 의하면 CO와 NOx의 생성량은 8 notch 기준 큰 차이가 없으나 NOx의 허용기준이 엄격하므로 NOx의 농도를 낮추는 것이 관건이다.⁽¹⁾ 한 편 일방향 단선터널의 경우 열차운행으로 인한 Piston 효과로 오염물질 배기가 원활하게 이루어지지만 대면교통하는 복선터널에서는 Piston 효과에 의한 기류의 방향이 급격하게 변하기 때문에 오염물질의 배기

Table 4 Standard of pollutant admission⁽¹⁾

오염물질	국내	영국			
		8 hour limit		15 minute limit	
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
CO	100	50	55	400	440
NOx	25	-	-	-	-

가 불리하므로 설계 초기단계에서 수치해석에 의한 이론해를 근거로 환기시설의 적정성 여부를 검토하는 것이 요구된다. Table 4의 오염물질 농도의 허용기준은 각 나라별 상이한 기준을 적용하고 있으며 현재 국내에서는 도로터널 설계기준을 참고로 하고 있다.

본 연구에서는 디젤차량의 운행속도를 44[km/h]로 하였으며 오염물질 발생량은 4 notch 기준으로 하였고 Table 2에 표기하였다.

3. 수치해석 이론

3.1 지배방정식과 수치기법

터널 내 압축성 공기역학을 지배하는 방정식은 유한체적법(FVM)을 기초로 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} W d\Omega + \oint_{\Sigma} f d\Sigma = \int_{\Omega} S d\Omega \quad (2)$$

$\Omega(t)$ 유효체적, $\Sigma(t)$ 유효체적에 대한 면적

위 지배방정식에서 W 보존 물성치, F 유한체적면 유속, 그리고 S 소스에 대한 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$W = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ E^t \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (E^t + p)u + k \frac{\partial T}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{pmatrix} \sum \dot{S}_m \\ \frac{1}{A} \left[p \frac{\partial A}{\partial x} - C_{f1} \frac{1}{2} \rho u |u| P_t - C_{ftr} \frac{1}{2} \rho (u - V_t) |u - V_t| P_{tr} \right] \\ \frac{1}{A} \left[-p V_t \frac{\partial A_t}{\partial x} - C_{ftr} \frac{1}{2} \rho (u - V_t) |u - V_t| P_{tr} V_t \right] + \dot{Q} \end{pmatrix}$$

ρ 공기밀도, u 터널내 공기속도, V_t 열차속도, $E^t = \rho e + \frac{1}{2} \rho u^2$ 토탈에너지, e 내부에너지, p 공

기압, T 공기온도, P_t 터널단면 접촉길이, P_{tr} 열차단면 접촉길이, A 터널유효단면적, A_t 열차단면적, C_f 터널마찰계수, C_{ftr} 열차마찰계수, \dot{Q} 열발생율을 나타낸다

오염물질 농도 방정식은 다음과 같다

$$\frac{\partial(\rho C_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_s U_j) = \dot{S}_m \quad (4)$$

여기서 C_s : 오염물질의 mass fraction

\dot{S}_m : 오염물질 생성률

공간차분은 Roe의 FDS 기법을 개량한 RoeM⁽⁶⁾을 적용하였고, 2차 정확도를 갖는 MUSCL⁽⁷⁾을 사용하였다. 한 편 시간적분은 계산의 효율성과 시간에 대한 수치해의 3차 정확도를 갖는 TVD Runge-Kutta 기법⁽⁷⁾을 사용하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 급,배기구와 디젤열차 주변 관찰

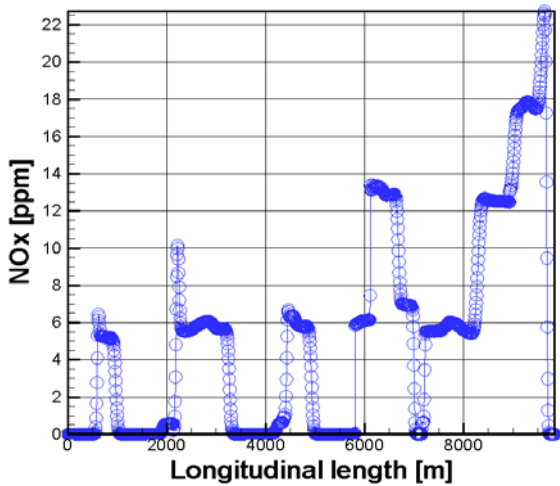


Fig.2 NOx distribution after 4800 seconds

Fig.2는 디젤열차가 편도기준 시간당 2대(교행 포함 4대) 운행하는 경우, 오염물질 농도의 분포를 나타낸다. Fig.3 은 배기구가 위치한 곳에서 농도가 상승분포를 보이고 급기구가 위치한 곳에서는 신선한 외기의 유입으로 급격히 저하되는 분포 경향을 잘 나타낸다.

Fig.4는 디젤열차가 종점부에서 시점부로 주

행하는 경우(그림에서 왼쪽으로 주행) 기관차가 위치한 열차머리에서부터 오염물질 농도가 중첩되는 경향을 잘 보여주고 있다. Fig.4에서 유효단면적은 터널단면적에서 열차단면적을 제외한 면적을 의미한다.

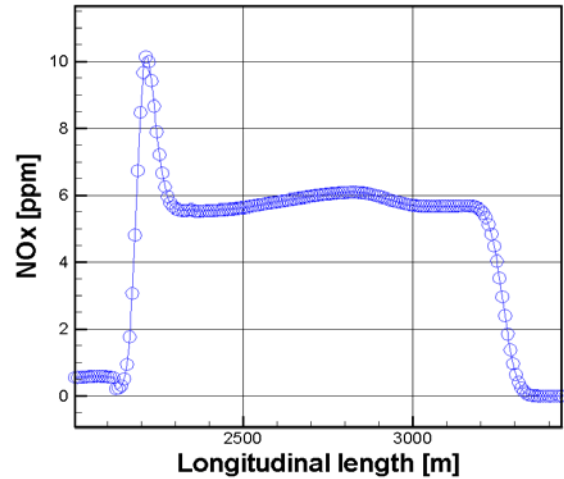


Fig.3 Around Supply and Exhaust

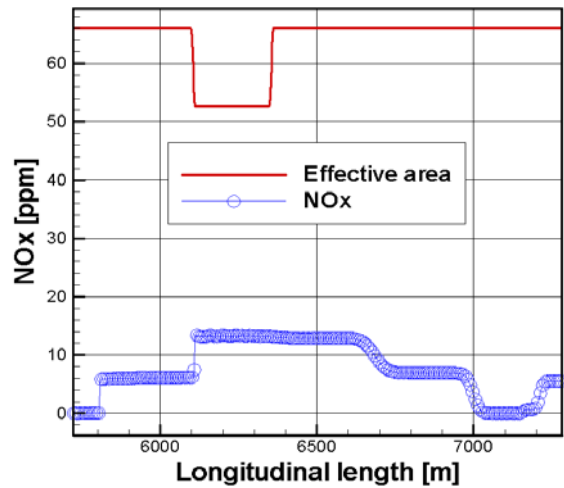


Fig.4 Around train

4.2 디젤차량의 운전시각에 따른 환기특성

디젤열차 운행시각에 따른 환기특성을 비교해 보기 위해 기본 검토안에서 E역사~종점 구간인 환기용량을 작게 설정하였으며 Fig.5의 결과는 시간당 3대 운행시 E역사~종점 구간까지 환기량이 부족한 것을 잘 보여주고 있다. 문제의 구간을 제외한 나머지 영역에서는 허용기준 25 ppm을 초과하지 않는 것으로 나타났으며 이는 운전

시격 20분(대면교통을 고려하면 10분)인 경우 오염물질의 중첩시 증가량이 약 6 ppm 인 것을 감안하면 3회의 중첩을 허용하고 있으나 E역사~중점 구간에서 나타난 것처럼 대면교통의 경우, 환기량이 부족하게 되면 오염물질 농도가 급격히 증가할 수 있음을 의미한다. 이러한 현상은 Fig.6에 잘 나타나고 있으며, 이는 대면교통 철도터널의 환기특성으로 Yoo, et.al⁽¹⁾가 언급한 바 있다.

환기용량 증대로 인한 효과는 4.4에서 검토하였다. 열차의 시간당 운행대수는 편도기준으로 표기하였으며 NOx 농도는 3시간의 시간 경과 후 터널 종방향 분포를 표현하였다. 열차의 운행은 터널구간의 시점과 중점에서 등 시간간격 교대로 진입하도록 하였다.

4.3 일반차량 혼용시 환기특성

일반열차를 6분시격(시간당 10대)으로 터널 시점부와 중점부에서 교대로 진입시키고 디젤열차와 선로를 혼용하는 경우에 대하여 검토하였다. 디젤열차 시간당 2대 운행시(편도 30분시격) E역사~중점부 구간에서 오염물질 농도가 허용기준을 초과함이 Fig.7에서 나타났고, 이는 Fig.5의 디젤열차만을 운용한 결과에 비해 환기용량이 부족하게 됐음을 나타낸다. 대면교통의 경우, 열차의 Piston 효과에 의한 환기력은 서로 상쇄되어 긍정적으로 작용하지 못하게 되며 환기성능의 저하는 터널 내 운행차량수의 증가로 유효단면적과 유효체적이 감소한 결과다. 즉 환기시스템에 대한 저항 증가로 환기효율이 저하된다.

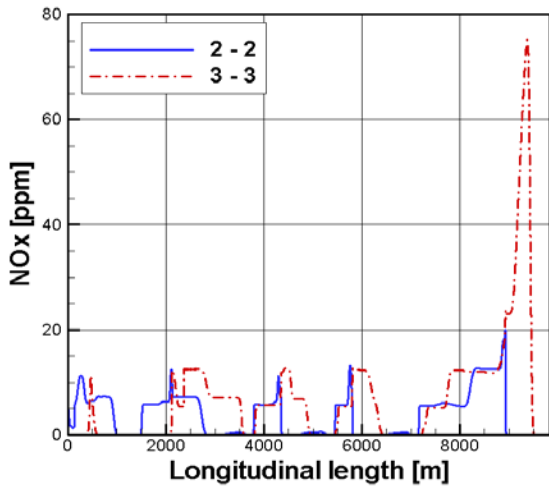


Fig.5 NOx concentration after 3 hour

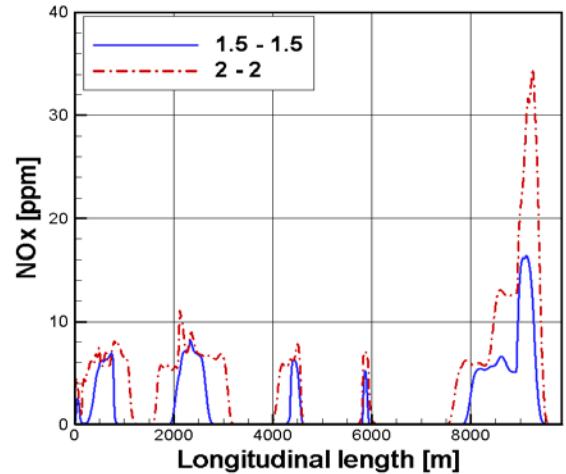


Fig.7 NOx concentration after 3 hour

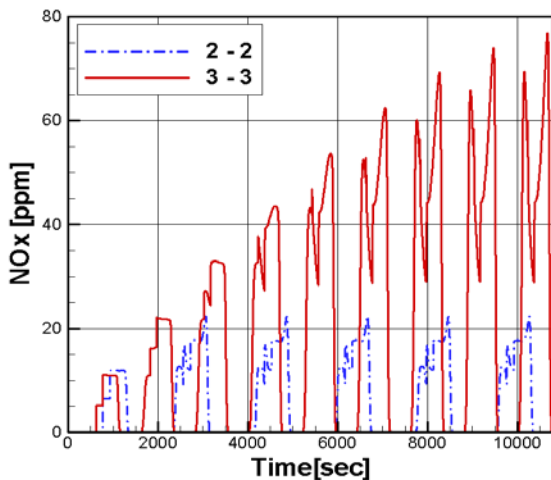


Fig.6 Transient profiles of NOx [ppm]

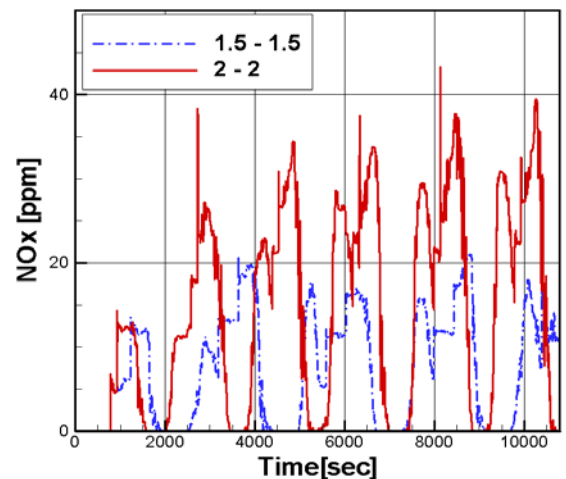


Fig.8 Transient profiles of NOx [ppm]

4.4 환기용량 증설시

Table 5 Capacity of Ventilation facilities

환기실		검토안	용량증설
#1-12	배기	4950	8000
#1-13	급기	9900	20000
#1-14	배기	4950	12000

역사D~역사E 구간의 환기용량을 Table 5와 같이 변경하고 디젤열차와 일반열차를 모두 운행하였을 경우, 디젤열차 시간당 2회 운행시(편도기준) Fig.7에 나타난 NOx 농도의 증가경향이 사라졌다. 아울러 디젤열차 시간당 3회 운행시 Fig.5에서 최고 75ppm 을 보였으나 용량증설시 23ppm 으로 나타났다. Fig.5 의 해석결과는 일반차량을 운행하지 않은 경우이므로 실제 오염물질 배출효과의 개선은 두드러진 것으로 확인되었다.

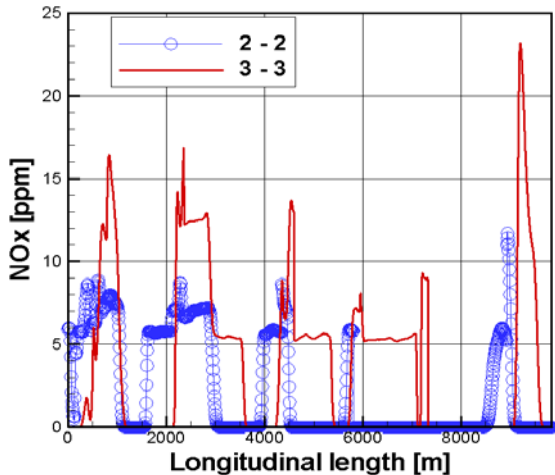


Fig.9 NOx concentration after 9000 seconds

Fig.9 의 결과는 오염물질이 누적되는 위치를 적절히 예측할 경우, 큰 비용을 들이지 않고도 오염물질 농도를 허용기준 아래로 유지할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

디젤차량에 의해 배출된 오염물질이 터널 내 분포하는 특성을 관찰하였으며, 기본 검토안에 대한 수치해석 결과로 디젤열차 운행시각에 따른 환기특성을 관찰하였다. 또한 일반열차와의 혼용

시 환기특성을 관찰하였고 마지막으로 환기용량 증설이 문제 구간의 환기여건을 개선할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 터널내 공기는 급기 환기실을 지나면서 신선한 외기의 유입으로 오염물질의 농도가 저감되며, 반대로 배기 환기실은 오염물질의 배출이 이루어지므로 주변의 농도가 높게 형성된다.
- (2) 디젤열차의 시간당 운행 회수가 증가할수록 오염물질 농도가 급격히 증가할 수 있다.
- (3) 디젤열차와 일반열차가 선로를 혼용하는 경우, 환기효율이 저하되는 것으로 예측하였다.
- (4) 디젤열차의 시간당 운행회수와 환기용량은 밀접한 상관관계를 갖고 있으나 오염물질이 누적되는 문제의 구간을 예측하여 환기시설 용량 증설을 가정해본 결과 오염물질 농도가 허용기준 아래로 유지될 수 있음이 확인되었다.

참고문헌

1. Ji Oh Yoo, et.al, 2000, The Characteristics of Ventilation in Railway Tunnel, Proceedings of the SAREK, pp.1171-1179.
2. H.J.Shin, J.O.Yu, 1999, Railway tunnel ventilation system design, Proceedings of SAREK, Vol. 28, No. 6, pp.464-475.
3. M.S.Song, 1997, 철도차량 Diesel Engine의 배출가스 현황 및 저감방안에 관한 연구, 철도대학 논문집 별책, 제13집.
4. A.Baron, et.al, 2001, The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 89, pp.365-401
5. B.E.Larock, et.al, 2000, Hydraulics of Pipeline Systems, CRC Press LLC
6. Sung-soo Kim, et.al, 2003, Cures for the shock instability : Development of a shock-stable Roe scheme, J.Computational Physics, vol 185, pp342-374
7. S.H.Yoon, 2005, Multi-dimensional Limiting Process for Three-dimensional Flow Physics Analyses, M.D.thersis, Seoul National Univ.