

장대형 터널 내 제트 팬 위치에 따른 환기해석

강 신 형, 변 주 석*, 이 진 호**

건양대학교 기계공학과, *기술보증기금, **연세대학교 기계공학부

Ventilation Analysis according to Jet Fan Location in Long Tunnel

Shin-Hyung Kang, Ju-Suk Byun*, Jinho Lee**

Department of Mechanical Engineering, Konyang University, Nonsan 320-711, Korea

*Songpa Technology Appraisal Center, Kibo Technology Fund, Seoul 138-803, Korea

**School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received September 18, 2006; revision received March 22, 2007)

ABSTRACT: This paper studies the ventilation characteristics according to the jet fan location at the long road tunnel using the CFD software 'FLUENT' which is based on the finite volume method. The tunnel model used in the analysis has a length of 1600 m, a cross sectional area of 120 m³, and is composed of 3 lanes and one way. The velocity profile, the distribution of CO concentration and the ventilation flow rate within the tunnel are analyzed, respectively. In the analysis, it is found that the dependence of the ventilation flow rate upon the jet fan location is small, but the CO concentration in the tunnel is at the lowest when the jet fans are installed near the tunnel outlet. An air stream right below the jet fan is almost inactive due to the strong stream injection near the jet fan. Thus, the pollution level below the jet fan must be higher than the other area.

Key words: Long tunnel(장대터널), Ventilation(환기), Mono-dioxide carbon(일산화탄소), Jet fan(제트 팬)

기 호 설 명

그리스 문자

- D : 확산계수 [m²/s]
- f : 압력계수
- J : 질량 확산 유속 [kg/(s·m²)]
- k : 열전도도 [W/(m·°C)]
- m : 질량분율
- ΔP : 제트 팬 입출구 압력차 [Pa]

- ρ : 밀도 [kg/m³]
- μ : 동점성계수 [kg/m·s]

1. 서 론

최근 급속한 경제 성장으로 인해 인구와 물자의 수송량이 늘어남에 따라 사회 중추적 기반시설인 도로의 중요성이 증대되고 있으며 운행 차량의 경제성과 운전자의 안전성을 확보하기 위하여 도로의 직선화가 요구된다. 따라서 국토의 70% 이상이 산악 지형인 우리나라의 경우에는 장대형 터널의 건설이 절실하다. 이와 같이 터널이 장대

† Corresponding author
Tel.: +82-2-2142-1231; fax: +82-2-2203-7548
E-mail address: sn1972@yonsei.ac.kr

형화 됨에 따라 터널 내부에서의 환기 및 제연에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 터널은 외부의 맑은 공기가 자연환기에 의해 지속적으로 공급되기 어려운 구조를 가지고 있다. 도로 터널에서의 환기시설은 차량에 탑승한 승객을 차량에서 배출된 오염 물질로부터 보호하고 터널 내의 쾌적성을 확보해주는 장치이다.

차량에서 배출되는 배기가스의 구성 물질은 수백 종류에 달하며, 배출량 및 농도가 규정치 이상이 되면 인체에 유해한 영향을 미치게 된다. 이러한 배기가스는 가시거리에 영향을 미치는 입자상 물질인 매연과 인체에 직접적으로 피해를 주는 가스상 물질인 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx) 등으로 이루어져있다. 가스상 물질 중 일산화탄소는 인체에 치명적인 영향을 주어 터널 내의 사고로 직결되는 유해 물질로, 배기가스 중 가장 많이 배출되어 일산화탄소를 규제값 이하로 유지하면 그 외의 가스상 유해물질에 대해서도 안전을 확보할 수 있는 환기해석의 대표적인 고려대상이 된다.⁽¹⁾

터널 내의 효율적인 환기에 관련된 여러 논문이 발표되었는데 Buraczynski et al.⁽²⁾은 미국의 켄터키주에 있는 Cumberland gap 터널에서 오염물질의 거동을 분석하여 일산화탄소가 오염물질의 대표성을 갖고 있음을 보였다. 또한, Saika et al.⁽³⁾은 제트 팬의 속도와 터널 내의 기류속도를 측정하여 제트 팬 설치에 따른 터널 내의 승압에 관한 이론식을 고찰하여 적절함을 밝혔다. 신현준 등⁽⁴⁾은 TUNVEN 프로그램을 이용하여 종류식 장대터널에서의 환기량과 오염물질의 농도를 해석하였으며, 이재현 등^(5,6)은 종류식 장대터널에서의 공기속도, CO, NOx 및 소광계수의 분포를 예측하여 설계기준치의 적합성을 검토하였다. 이창우 등⁽⁷⁾은 터널내의 부유분진을 입도와 농도 중심으로 분석하여 부유분진의 성분 및 교통량과 부유분진의 농도와의 상관관계를 연구하였으며 그 외에도 많은 연구가 진행되고 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾ 현재 국내 터널의 환기 및 제연 시설 설계시 환기량 계산은 유럽 방식(PIARC)⁽¹²⁾과 일본 방식을 사용하여 수행하고 있고, 제연 시설의 환기량 계산을 위해 Kennedy 식을 사용하고 있다.^(13,14) 이러한 계산 방식은 세계적으로 널리 인정을 받고 있는 방식이지만, 전체 대상을 하나의 제어체적으로 고려한 단일제어체적 계산법으로 계산된 식이므로 이러한 방식으로 계산된 환기량은 실제 터널과 같은 3차

원적인 형상에 적용하여 검증해 보아야 한다.

터널 내에서 발생하는 오염 물질의 유동에 영향을 미치는 요소로는 지형조건에서 기상조건에 이르기까지 여러 가지의 변수가 있다. 이 중에서도 환기 방식, 외기 온도, 터널 구배, 오염물질 발생량 등의 상관관계를 충분히 검토하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 상용 수치해석 프로그램인 Fluent를 이용하여, 3차원 직선 형상의 터널에서 제트 팬의 설치를 입구부, 중간부, 출구부에 집중 배치한 세 경우와 분산 배치한 한 경우의 총 네 경우에 대해 제트 팬 설치 위치에 따른 환기성능을 비교 검토해 보았다. 환기량만을 기준으로 환기성능을 평가하는 기존의 연구와는 달리 본 연구에서는 환기량과 터널 내 차량에서 배출되는 일산화탄소의 오염농도 분포를 동시에 고려하여 보다 정확한 성능평가를 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

터널 내의 기류 유동은 기본 유체 지배 방정식인 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식을 만족시킨다. 이때 유체 및 에너지의 이동 현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존 법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 편미분 방정식이다. 터널 내 기류를 비압축성 유체로 가정하여 정상 상태로 고려한다.

터널 내 기류의 난류 효과를 해석하기 위해서는 난류 현상 및 난류 모델에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 여러 난류 모델들 중에 표준 k-ε 난류 모델을 사용하였으며 이 모델에 관한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{m_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b) \\ - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$

Table 1 Jet fan location for each CASE

CASE	Jet fan location from entry
CASE I	200 m, 400 m, 600 m
CASE II	600 m, 800 m, 1000 m
CASE III	1000 m, 1200 m, 1400 m
CASE IV	200 m, 800 m, 1400 m

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$G_b = -g_i \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

터널 내 환기 모델에서의 일산화탄소를 해석하기 위해서는 화학종 보존 방정식에 대한 고려가 필요하다. 화학종 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_{i'}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_{i'}) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (J_{i,i}) + S_i \quad (5)$$

난류 모델에 대한 질량 확산은 식 (6)과 같다.

$$J_{i,i} = - \left(\rho D_{i,i} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i} \quad (6)$$

2.2 해석모델 및 경계조건

본 연구에서는 부산과 포항을 연결하는 고속도로 중의 총연장 1600 m의 무거터널을 대상으로 하였다. 이 터널은 단면적 120 m³의 3차선 일방향 터널로써 환기를 위해 제트 팬을 설치한 종류식 환기 터널이다. 제트 팬의 배치에 따른 환기 성

능을 비교하기 위해 총 6대의 제트 팬을 터널 입구부, 중앙부, 출구부에 집중 배치한 세 경우 (CASE I, CASE II, CASE III)와 입구, 중간, 출구에 각각 2개씩 분산 배치한 경우 (CASE IV)의 네 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 각 경우를 비교하기 위해 CASE별 환기량과 유속분포, 자동차의 배기가스에서 나오는 일산화탄소 (CO)의 농도 분포를 살펴보았다. 각 CASE별 제트 팬의 위치는 Table 1에 제시한 것과 같다.

제트 팬의 작동 압력은 PIARC 기준에 따라 환기량을 계산하여 200 Pa로 하였으며, 팬의 위치는 터널 중앙부에서 높이 5 m, 반경방향 2 m로 하였다. 실제 터널의 차량 혼입률 자료와 차량 대수를 고려하여 일산화탄소의 발생량을 계산하였다. 계산 방법은 Table 2와 같이 차량 혼입률과 총 차량대수(144대/차선)를 곱하여 차선 당 차의 대수를 구하고, 그 값에 PIARC에서 제시하는 일산화탄소 배출량을 곱하였다. 이 때 각각의 차량에 대한 총 발생량이 나오며, 이 값들을 모두 더한 값이 일산화탄소의 최종 발생량 0.02265 m³/s이 되며 이를 차량대수로 나누어 차량당 일산화탄소 발생량을 계산하였다. 차량 속도는 일산화탄소를 가장 많이 배출하는 10 km/h를 기준으로 하였다. 그러나, 수치해석상에서 차량은 정지하였다고 가정하여 교통 환기량의 영향은 고려하지 않았다.

경계조건으로 터널 입구와 출구는 대기 압력조건으로 놓았으며, 차량 후면부에서 일산화탄소가 배출된다고 가정하였다. 격자수는 각 CASE 별로 약간의 차이가 있으나 20만개 내외로 하였다. Fig. 1은 해석 대상이 되는 터널의 격자망 구성을 나타낸다.

팬 모델의 적절한 설정은 팬 용량 산정의 적절

Table 2 CO Production Rate (10 km/h, 1.6 km long)

	Inflow Percentage of Vehicle (%)	Number/Lane	CO Production Rate		Total CO Production Rate (m ³ /s)
			m ³ /(sec · Number)	g/(km · Number)	
Passenger car	56.29	82	0.00002244	2.11	0.005489003
Minibus	3.67	5	0.00013555	1.27	0.000216012
Large-sized Bus	3.63	5	0.000144888	13.58	0.000934387
Light Truck	13.26	19	0.000016222	1.52	0.002877435
Mid-sized Truck	9.31	13	0.000071111	6.67	0.002288071
Heavy Truck	7.93	11	0.000160222	15.02	0.005521891
Special Truck	5.9	9	0.000207333	19.44	0.005324311

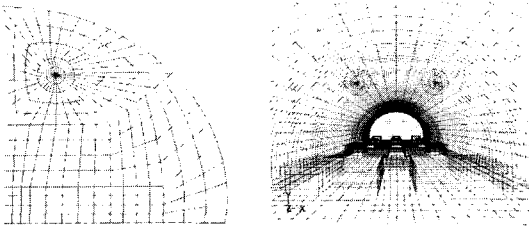


Fig. 1 Grid system for numerical analysis.

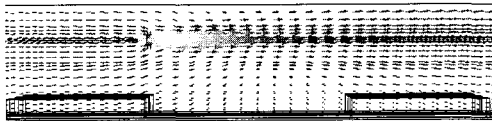


Fig. 2 Velocity vector in the longitudinal section near the first jet fan(CASE I).

성 및 이에 따라 유동 조건이 설계조건에 적합한지를 판단하는 기준으로서 중요한 역할을 할 수 있다. 팬 모델은 특성을 알고 있는 팬이 유동장에 미치는 영향을 계산하는 lumped parameter 모델이다. 팬 경계조건은 팬 전후의 유량(또는 속도)과 수두(또는 압력상승)에 대한 실험데이터를 입력하여 계산한다. 또한 반경방향과 접선방향의 속도도 고려 될 수 있다. 이 모델은 팬의 블레이드 주변의 상세한 결과를 얻을 수는 없지만, 팬을 통과하는 유동을 예측할 수 있다. Fluent에서 팬은 두께가 없는 영역으로 고려되며 계산은 팬 전후의 압력 상승을 팬을 통과하는 속도의 함수로써 계산을 할 수 있다. 팬 전후의 압력상승이 속도의 다차 함수로 정의되는 경우에 압력상승은 다음과 같다.

$$\Delta P = \sum_{n=1}^N f_n v^{(n-1)} \quad (7)$$

Table 3 Ventilation flow rate and velocity in entrance for each CASE

CASE	Ventilation Flow Rate (m ³ /s)	Velocity in Entrance (m/s)
CASE I	274.9	2.3
CASE II	276.3	2.3
CASE III	277.1	2.3
CASE IV	274.4	2.3

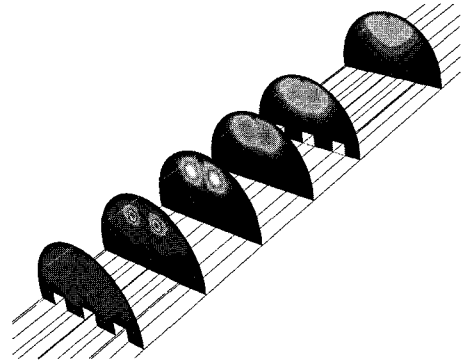


Fig. 3 Velocity contour in the cross section near the first jet fan(CASE I).

3. 실험결과 및 고찰

Table 3은 터널 내 제트 팬 설치 위치에 따른 터널 입구에서의 기류속도, 환기유량을 나타낸다. Table 2에서 보는 바와 같이 환기량을 기준으로 환기성능을 평가해보면 CASE III이 다른 경우보다 2%이내에서 우수하지만 환기유량은 제트 팬에 의한 터널 내부의 승압효과에 의해 주로 영향을 받으므로 제트 팬의 승압력이 모두 같은 4가지 CASE 모두 비슷한 환기량을 나타낸다.

Fig. 2와 Fig. 3은 CASE I에 대하여 각각 200m 지점에 있는 제트 팬 근처에서 터널길이방향에 대한 속도분포와 수직단면에서의 속도분포를 나타낸다. 제트 팬에서 분사된 기류가 터널을 통해 빠르게 진행하다가 터널 단면 전체로 확산되면서 약화되는 것을 알 수 있다. 또한, 호흡면에서의 속도분포를 나타낸 Fig. 4를 살펴보면, 터널 내 차량으로 인해 차량이 있는 지역에서는 속도가

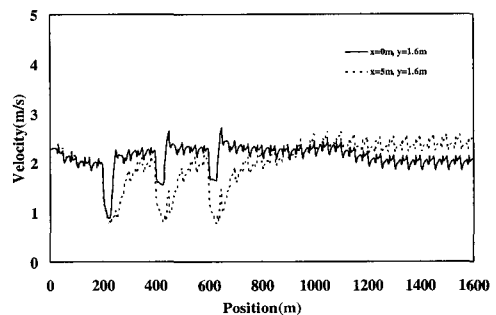


Fig. 4 Velocity profile in the breath area (CASE I).

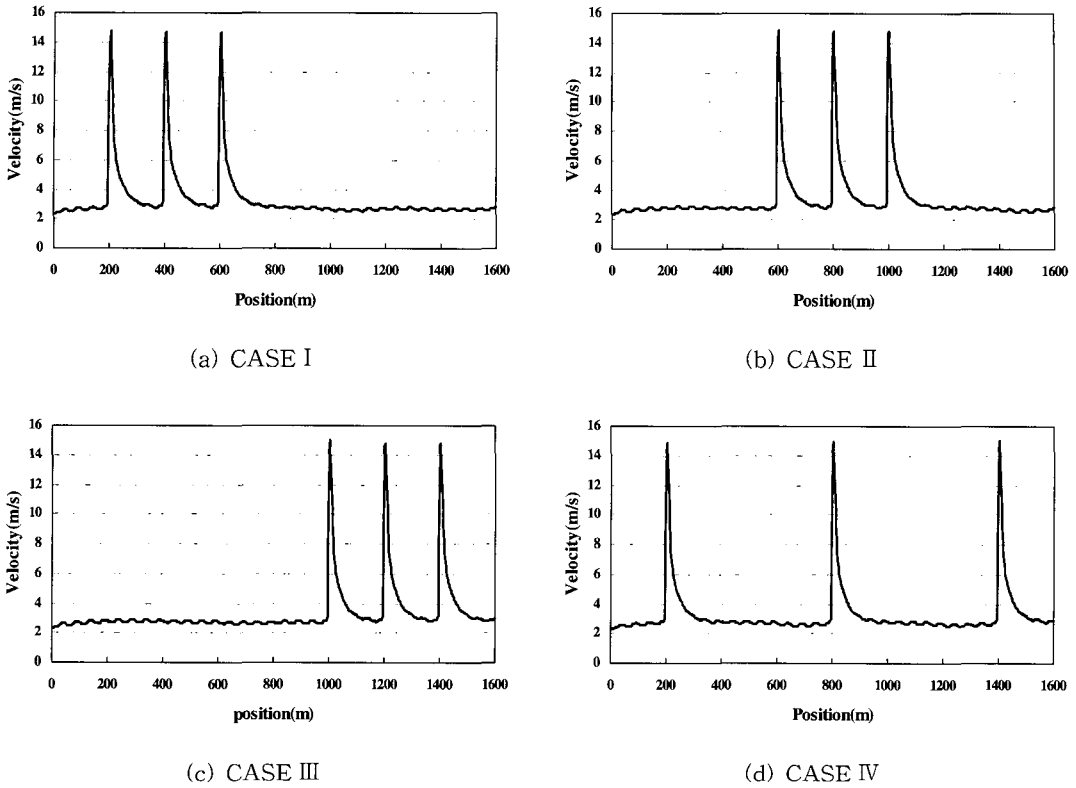


Fig. 5 Velocity distribution in the center-line of jet fan depending on CASE.

약간 증가하다가 차량 지역을 지나면 감소하게 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 각 CASE 별 제트 팬 중심위치($x = 2\text{ m}$, $y = 6\text{ m}$)에서 길이 방향에 대한 터널 내 기류 속도분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 팬이 설치

된 지역에서 속도가 급격히 상승하고 이후로 급격한 감소를 보이다 서서히 유동이 확산되어 약 150~180 m 정도를 지나면 안정된 속도 분포를 가지며, 차량이 있는 지점에서는 약간의 증감을 반복한다.

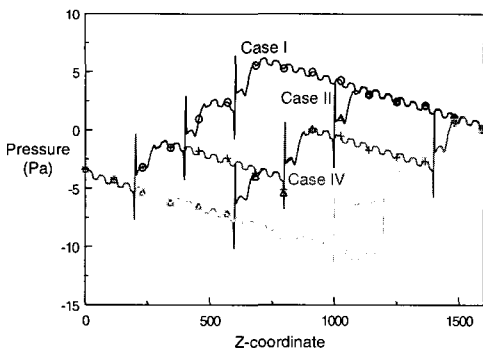
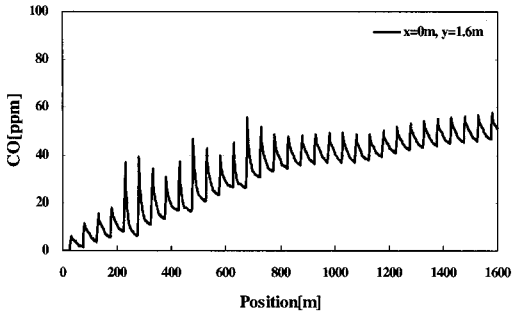


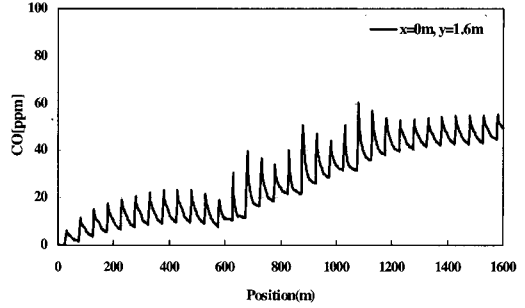
Fig. 6 Pressure distribution in the center-line of jet fan depending on CASE.

Fig. 6은 제트 팬 중심 위치에서 길이 방향에 대한 압력분포를 각 CASE 별로 나타낸다. CASE I의 경우 200 m 지점에 있는 제트 팬에서 기류가 강하게 분사되어 압력은 급격히 상승하고, 터널 단면 전체에 걸쳐 기류가 형성되면서 압력은 감소한다. 이 때 400 m, 600 m의 제트 팬은 압력을 다시 상승시키며 터널 출구까지 충분한 기류의 전달이 이루어지도록 돕는다. 다른 경우 역시 CASE I과 같이 제트 팬이 설치되어 있는 지점에서 압력이 상승하며 이러한 승압효과는 터널 내 오염물질을 배출시킬 수 있는 환기력을 제공한다.

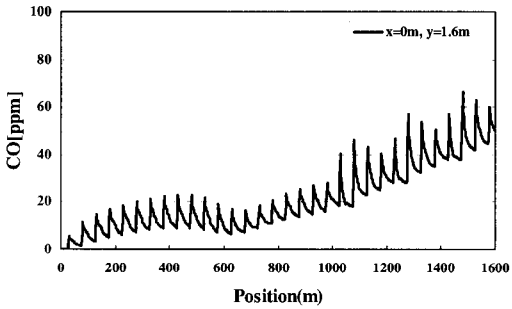
Fig. 7은 호흡면에서의 터널 길이 방향에 대한 일산화탄소 농도분포를 나타낸다. 일산화탄소의 농



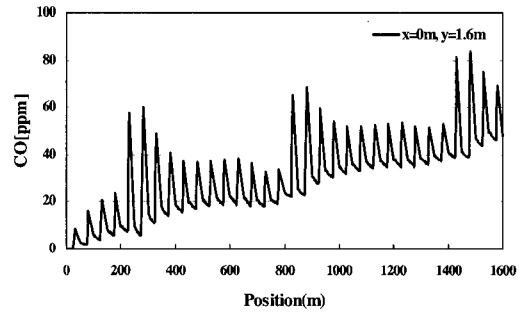
(a) CASE I



(b) CASE II



(c) CASE III



(d) CASE IV

Fig. 7 CO distribution in the breath-line depending on CASE.

도는 터널 출구로 갈수록 축적되어 높아지며, 최대 농도는 제트 팬이 있는 영역근처에서 발생한다. 이는 강하게 분사되는 제트 팬의 영향으로 터널하부에 충분한 기류가 전달되지 못하기 때문으로, CASE I의 경우 제트 팬 설치 위치로부터 출구부 방향 80m지점에서 일산화탄소의 농도가

급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 차량 사이에서 유동이 미약하여 일산화탄소 농도가 국부적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 네 CASE 모두 비슷하지만 각 경우의 일산화탄소 농도의 분포는 차이를 나타낸다.

터널 길이 방향으로의 제트 팬 중심위치에서의 일산화탄소 농도의 분포를 나타낸 Fig. 8을 살펴보면, 모든 CASE에 대해 입구 근처와 출구 근처에서는 비슷한 값을 갖지만 CASE III이 다른 경우에 비해 전체적으로 더 낮은 것을 알 수 있다. CASE III의 경우 제트 팬이 CASE I, CASE IV보다 출구쪽에 더 가까이 설치되어 있기 때문에 터널 내 유동의 혼합이 잘 이루어지며, 일산화탄소의 확산을 돕게 된다. 이로 인해 터널 내 차도 바닥면을 따라 흐르던 일산화탄소는 천장 상층부까지 확산된다. CASE II의 경우도 제트 팬이 설치된 600 m 이전까지 CASE III과 비슷한 정도의 일산화탄소 농도를 유지하는 것으로 불 때 위의 내용을 확인할 수 있다.

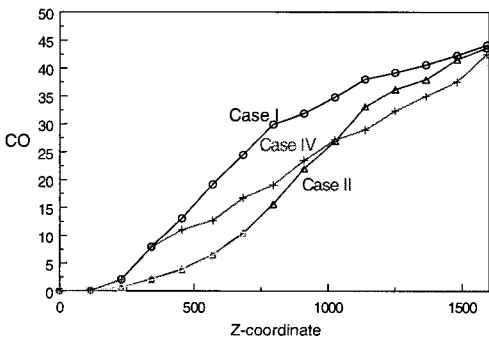


Fig. 8 CO distribution in the center-line of jet fan depending on CASE.

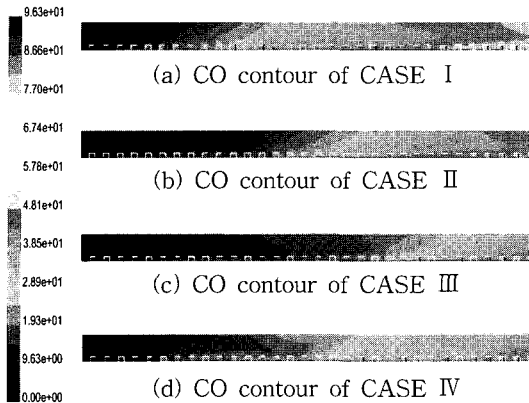


Fig. 9 CO contour in the longitudinal section depending on CASE.

Fig. 9는 터널 내 일산화탄소 농도장의 분포를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 신선한 공기가 CASE I, CASE IV보다는 CASE II, CASE III에서 터널 내 안쪽까지 유입되어 일산화탄소의 농도가 낮게 형성됨을 알 수 있다. 특히 CASE III의 경우는 다른 경우와 비교해서 터널 내 일산화탄소 농도가 낮게 형성됨을 확인할 수 있다. 터널 내 기류 유입속도, 유출속도, 환기유량은 각 CASE별로 차이가 작아 각 경우에 대한 환기성능을 평가하기가 어렵다. 그러나 오염물질의 분포를 고려하였을 경우 터널 내에서 일산화탄소 농도가 낮은 CASE III이 다른 경우에 비교해서 좋은 것으로 판단한다.

4. 결 론

본 연구에서는 종류식 환기방식을 적용한 장대형 터널에 대해 제트 팬의 설치 위치에 따른 환기성능을 비교 검토해 보았다. 해석에 있어서는 차량의 교통 혼입률을 고려하여 발생된 일산화탄소를 대상으로 소요 환기량을 적용하였을 때, 각 CASE에 대한 일산화탄소 농도, 확산경로, 터널 내의 압력분포 및 기류속도 분포를 조사하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 제트 팬의 설치위치에 따른 환기량은 모든 CASE에 대해 2% 내외로 차이가 거의 없다. 그러나, 터널 내 일산화탄소의 농도 분포를 고려하면 제트 팬을 출구부에 집중 설치한 CASE III의 경우가 터널 전체에서 일산화탄소의 농도가 낮게

나타나며 환기특성이 가장 좋다.

2) 제트 팬을 이용한 터널의 경우 제트 팬에서 분사하는 강한 기류의 영향으로 제트 팬이 설치된 터널 하부에서는 유동의 순환이 원활하게 이루어지지 못한다. 따라서 제트 팬 근처 터널 하부에서는 다른 지역에 비교해서 오염농도가 높게 나타난다.

참고 문헌

1. Jafari, M. J. and Moghaddam, H. K., 2000, Ventilation of talon tunnel, 10th Int'l Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 849-861.
2. Buraczynski, J. J. and Patel, S. J., 1999, Cumberland gap road tunnel control of jet fan ventilation system, First Int'l Conference on Long Road and Rail Tunnel, Basel, Switzerland, pp. 283-292.
3. Saika, T., Nakajima, K. and Setoyama S., 2000, Jet fan thrust performance evaluation installed in road tunnel, 10th Int'l Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, BHR group, pp. 1079-1088.
4. Shin, H. J., Kim, J. Y., You, J. O. and Yoon, C. U., 1999, Study on the design technique of the road tunnel ventilation system, '99 Conference on Air-Conditioning Refrigerating, pp. 329-336.
5. Yang, P. S., Lee, J. H. and Oh, M. D., 1997, A study on design criteria for the ventilating flow rate of a long longitudinal tunnel, Proceedings of the KSME Spring Annual Conference B, pp. 663-668.
6. Yang, P. S., Cho, Y. J. and Lee, J. H., 1998, A study on the ventilation in a long road tunnel, Transactions of KSME B, Vol. 22, No. 8, pp. 1091-1100.
7. Lee, C. W. and Lee, S. H., 1996, Characteristics study of floating material in road tunnel for vehicle, Korea Mineral & Energy Resources Journal, Vol. 33, pp. 332-339.
8. Casale, Eric, 1996, Fire risk response in tunnel semi-transverse ventilation systems,

- First International Conference Korsor, Denmark, pp. 321-331.
9. Martegani, A. D., Pavesi, G. and Barbetta, C., 2000, Experimental investigation of interaction of plain jet fans mounted in series, 10th Int'l Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, BHR group, pp. 1055-1078.
 10. Kim, K. J., Hur, Nahmkeon, Kim, S. R. and Kim, Y. I., 2001, Ventilation simulation of jet fan in the road tunnel, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 779-783.
 11. Chen, T. Y., Lee, Y. T. and Hsu, C. C., 1998, Investigations of piston-effect and jet-effect in model vehicle tunnel, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 73, pp. 99-110.
 12. PIARC, 1991. Committee on Road Tunnels, Report, XIXth World Road Congress, Marrakesh September, 1991.
 13. Tetzner, D., Pollak, R., Foit, W. and Sippel, M., 1999, Critical velocity comparative assessment of test results and CFD simulation, Proceedings of the first international conference on tunnel fires and one day seminar on escape from tunnel, Lyon, France, pp. 181-190.
 14. U.S., Department of transportation urban mass transportation administration office of technology development and deployment washington DC 20590, 1980, Subway Environment simulation (SES) computer program.