

도로터널내 화재 발생시 매연 제거를 위한 모델 해석

윤성욱¹⁾ · 이희근²⁾

A Model-Analysis for Removal of Fire Fumes in a Road Tunnel during a Fire Disaster

Sung-Wook Yoon and Hi-Keun Lee

ABSTRACT In case of a fire outbreak in a uni-directional road tunnel, the flow of traffic immediately behind the fire disaster will be stalled all the way back to the entrance of the tunnel. Furthermore, when the vehicle passengers try to flee away from the fire toward the entrance of the tunnel, the extremely hot fume that propagates in the same direction will be fatal to the multitudes evacuating, but may also cause damage to the ventilation equipments and the vehicles, compounding the evacuation process. This paper will present the 3-dimensional modelling analysis of the preventive measures of such a fume propagation in the same direction as the evacuating passengers. For the analysis, the fire hazard was assumed to be a perfect combustion of methane gas injected through the 1 m×2 m nozzle in the middle of the tunnel, and the product of CO₂ as the indicator of the fume propagation. From the research results, when the fire hazard occurred in middle of the 400 m road tunnel, the air density decreased around the fire point, and the maximum temperatures were 996 K and 499 K at 210 m and 350 m locations, respectively, 60 seconds after fire disaster occurred, when the fumes were driven out only towards the exit-direction of the tunnel. By tracing the increase of CO₂ level over 1% mole fraction, the minimum longitudinal ventilation velocity was found to be 2.40 m/sec. Furthermore, through Analysis of the temperature distribution graphs, and observation of the cross-sectional distribution of CO₂ over 1% mole fraction, it was found that the fume did not mix with the air, but rather moved far in a laminar flow towards exit of the tunnel.

1. 서 론

지하공간과 같은 밀폐공간에서는 인위적인 환기 시스템이 필요한데 이러한 인위적인 환기 시스템 하에서 화재가 발생했을 경우 질식으로 인한 인명피해를 줄이기 위해서는 화재시 발생하는 매연을 효율적으로 제거하기 위한 대책이 필요하다. 이러한 대책을 구체적으로 수립하기 위해서는 많은 기초적인 연구노력이 필요한데 우선 지하환경과 가장 근접한 도로터널에서 화재시 매연의 효율적인 제거를 연구의 대상으로 하였다.¹⁾

Fig. 1에서 나타나 있는 것과 같이 일방향 도로터널 내에서 화재가 발생하면 차량진행방향이 아닌 화재의 뒤쪽, 즉 터널입구방향으로는 차들이 정차함으로 인해 막히게 된다. 이러한 경우 화재지점으로부터 나온 매연이 사람이 피해 나오는 입구방향으로 역류하게 되면 많

은 인명피해가 발생할 뿐만 아니라 팬과 같은 환기시설 및 차량 등도 파손될 수 있다.²⁾

이에 따라 본 연구에서는 이러한 방재 시스템의 적용에 대한 모델링 연구로서 화재시 시간의 흐름에 따른 터널내 온도, 밀도, 풍속의 변화 및 CO₂의 농도변화, 확산경로, 확산거리 등을 3차원 모델을 통해 연구하였다. 특히, 본 연구에서는 기존의 연구와는 달리 연소반응 생성물인 CO₂를 매연의 확산 지표로 삼았으며, CO₂의 몰농도를 추적함으로써 매연이 차량 진행방향으로만 빠져나갈 수 있는 최저 환기 속도를 구하였다.

이러한 모델링 연구의 목적은 안전대책의 수립 및 큰 사고로 인한 최악의 결과를 예방하기 위한 것이다. 만약 큰 화재로 인해 발생하는 매연이 기존의 환기 시

1) 학생회원, 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

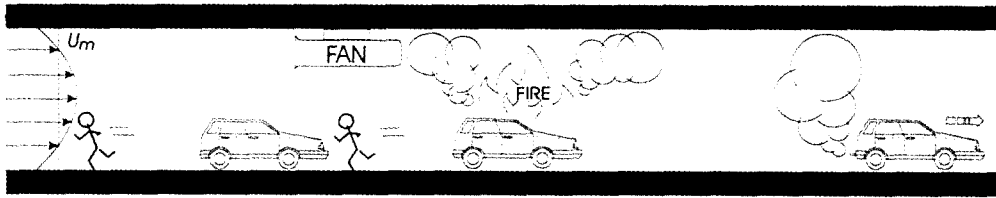


Fig. 1. Illustration of the fire emergency in the road tunnel with longitudinal ventilation system.

템이나 새로이 설계된 화재 방재 시스템에 의해 조절될 수 있다면 커다란 재난을 막을 수 있을 것이다.

2. 이론적 고찰

3차원 모델내의 열유동장, 화학종(매연)의 발생 및 이동경로를 예측하기 위하여 난류 연소반응 모델을 이용하였고, 난류모델은 RNG κ - ϵ 모델을 사용하였으며 화학 반응식은 4종의 화학종에 대해 완전연소를 가정하였다.

2.1. 유동의 수학적 모델

기상에서의 지배 방정식은 질량 보존식, 운동량 보존 방정식, 엔탈피 보존 방정식을 기초로 하여 다음 식(1), (2)와 같이 난류에 의한 운동량의 전달과 물질확산을 고려하였다.

질량 보존식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 보존 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

각 기호에 대한 설명은 사용부호에 나타나 있다.

화재로 인해 발생하는 난류 현상은 혼합과 반응과정 에 추가되어야 하며, 난류에서 속도, u_i 는 평균 속도, \bar{u}_i 와 교란(fluctuation)속도, u_i' 의 합으로 표시할 수 있다. 즉,

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (3)$$

이 식을 식(2)에 대입하여 시간에 대한 평균을 구하면

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j u_i'}) \quad (4)$$

로 쓸 수가 있다.

식(4)를 모델링 하기 위하여 본 연구에서는 RNG κ - ϵ 모델을 사용하였는데 이 모델에 의하면 유효점도개 념을 거쳐 모델화된 난류응력(Turbulent stresses)과 함께 Reynolds Averaged Navier Stokes 방정식을 사 용하여 식(4)를 식(5)와 같이 표현할 수 있게 된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [v_{eff} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (5)$$

운동량 방정식인 식(5)의 종결을 위하여 사용된 유효 점도 v_{eff} 는 식(6)으로부터 계산된다.

$$v_{eff} = v_{mol} [1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{v_{mol}} \frac{k}{\epsilon}}]^2 \quad (6)$$

식(6)에서 k 는 난류운동 에너지, ϵ 은 난류운동 에너 지 소산율, v_{mol} 은 물점도(molecular viscosity) 그리고 C_μ 는 경험상수로 0.0845이다.

RNG이론은 또한 다음 식과 같은 k 와 ϵ 에 대한 이동 방정식인 식(7)과 식(8)로도 표현된다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = v_t S^2 - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha v_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} v_t S^2 - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R + \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha v_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \quad (8)$$

여기서, S^2 는 $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$ 인 변형률 텐서계수, R 은 변 형률(rate of strain), α 는 식(9)를 통해 계산되는 난류 이동의 역Prandtl수, 상수는 경험상수로 RNG이론에 서는 각각 $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$ 을 사용한다.

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \times \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{v_{mol}}{v_{eff}} \quad (9)$$

여기서 α_0 는 1이다.

변형률항인 R 은 다음 식(10)에 의해 주어진다.

$$R = 2v_{\text{mol}} S_{ij} \frac{\partial u_i'}{\partial x_i} \frac{\partial u_j'}{\partial x_j} \quad (10)$$

이 항은 RNG κ - ϵ 모델에서 다음 식(11)의 형태로 사용된다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

여기서, $\epsilon = Sk/\epsilon$, $\eta_0 \approx 4.38$, β 는 상수이다.

그리고, 엔탈피 보존 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\delta_h} \right) \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \right] + S_h \quad (12)$$

식(12)의 S_h 는 화학 반응에 의한 열 발생과 계면에서의 열교환을 포함한 생성항이고, 엔탈피 h 는 다시 다음의 식(13)으로 표현할 수 있다.

$$h = \sum_j m_j h_j \quad (13)$$

식(13)에서 m_j' 는 j 성분의 질량 분율이고, h_j 는 다음의 식으로 구한다.

$$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p,j} dT \quad (14)$$

여기서 C_p 는 비열이다.

그리고, 화학종 보존 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} J_i + R_i + S_i \quad (15)$$

위의 식에서 m_i' 는 i '의 질량 분율, R_i' 은 화학반응에 의한 i '의 생성, S_i' 은 분산된 상(dispersed phase)에 의한 생성항이고 특히, 난류에서 질량 확산(mass diffusion)항인 J_i' 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \quad (16)$$

여기서 Sc_t 는 effective Schmidt number로 $\frac{\mu_t}{\rho} D_i$ 를 나타내며, 본 연구에서는 0.7로 두었다.

기체 유동의 경우, 압력과 부피 상관관계식은 다음과

같은 이상기체 방정식을 적용하였다.

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_j \frac{m_j}{M_j}} \quad (17)$$

여기서 ρ 는 밀도, p 는 부분압, M_j 는 분자량을 나타낸다.

2.2 화학 반응 모델

화학반응속도식에서 화학종 i '에 대한 속도, R_i' 를 다음의 아레니우스 반응 속도(Arrhenius reaction rate) 식으로 표현할 수 있다.

$$R_{i,k} = -\nu_{i,k}' T^{\nu_{i,k}'} A_k \times \prod_{j=\text{reactant}} C_j^{\nu_{i,k}'} \exp(-E_k/RT) \quad (18)$$

식 (18)에서 ν 는 양론 계수, T 는 절대온도, A 는 아레니우스 상수, C 는 각 화학종의 농도, E 는 활성화 에너지를 각각 나타낸다.

난류에서 반응이 일어날 경우 반응속도식에 난류혼합에 의한 영향이 고려되는데, 본 연구에서는 Magnussen and Hjertager model을 적용하였다. 즉,

$$R_{i,k} = C \rho \frac{\epsilon}{k} \sum \frac{m_i}{V_{i,k}} \quad (19)$$

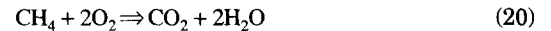
(C : 2 for products and 4 for reactants)

로 쓸 수 있다.

식 (18)을 $A + B + M \rightarrow C + D + M$ 인 반응에 적용하면

$$-r = A_k T^{\beta} \exp(-ERT) C_A^{\alpha} C_B^{\beta} C_M^{\gamma} \quad (M: \text{third body}) \quad (18)$$

로 쓸 수 있으며, 본 연구에서는 메탄의 연소 반응을 적용하였으며, 완전반응을 가정하였다. 반응식은 식(20)과 같다.



3. 해석 모델

3.1 모델의 구성

본 연구에서는 상업적 유체역학 코드인 Fluent 4.3을 사용하였으며 3차원 모델링을 수행 하였다. 해석 대상인 종류식 환기터널의 크기는 가로 10 m, 높이 7 m, 길이 400 m로서 반원통 모양이다. 직교좌표계로 모델링을 하기 위해 직육면체모양의 셀을 실제모형과 가

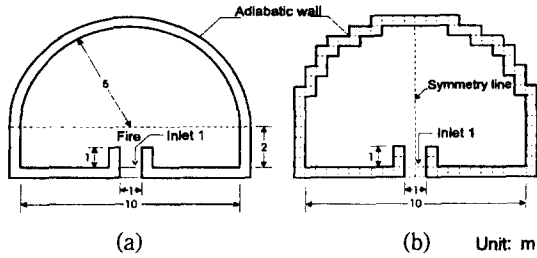


Fig. 2. Cross section of real & model tunnel at 200 m. (a) Real tunnel, (b) 3D model tunnel unit: m

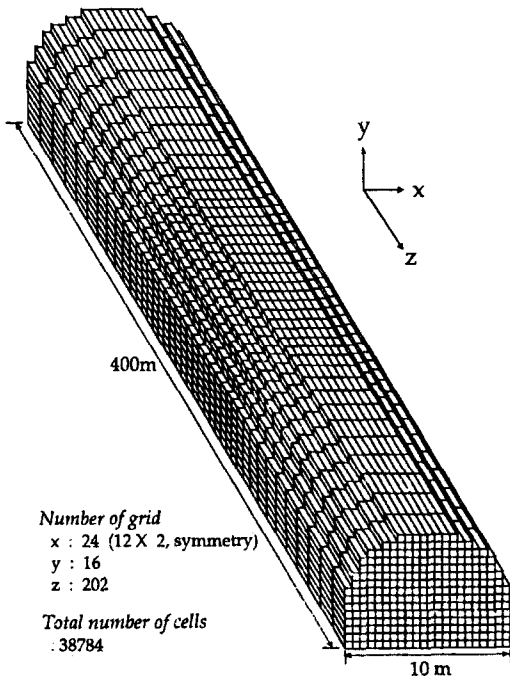


Fig. 3. Grid of tunnel(The grid along the z-direction was coarsened to facilitate visualization).

장 근사하도록 Fig. 2와 같이 배열하였다. 격자는 X방향, Y방향으로 0.5m씩 등간격, 그리고 Z방향은 부등간격으로 하였으며, 각각 12개, 16개, 202개로 총 셀수는 38784개이다. Z방향으로는 해석의 정확도를 높이는 동시에 계산속도를 빠르게 하기 위해 발화점 주변에는 격자를 1m 간격으로 세밀하게 하였고 입출구 쪽으로 갈수록 폭이 넓어지도록 하였다. 격자와 셀의 모양은 Fig. 2와 Fig. 3에 잘 나타나 있다.

화재가 발생한 위치는 터널 입구로부터 200m지점인 정중앙 부분으로 가정하였다. 또한 화재 발생을 모사하기 위하여 반응식이 비교적 간단하고 반응 경로 및

속도가 잘 알려진 메탄이 완전연소 되는 것으로 하였으며 이러한 메탄을 안정적으로 분사 및 연소시키기 위해 폭이 가로 1m×세로 1m, 높이 1m인 노즐을 통해 분사된다고 가정하였다. 이 노즐을 둘러싼 벽면은 단열상태로 두께가 모두 0.5m이다. 터널의 보강을 위해 설치된 벽면도 모두 단열상태인 것으로 하였는데, 이는 터널벽면의 그 주성분이 시멘트 몰타르로서 시멘트 몰타르는 열전도도가 약 0.72 W/m·K로 매우 낮아 거의 단열재로 생각할 수 있기 때문이다.³⁾

3.3 경계조건 및 초기조건

3.3.1 경계조건

이번 연구의 대상인 터널에서의 경계는 모두 3개인데 경계 1은 연료가 분사되는 노즐로서 Generation Rate of Heat이 15 MW가 되도록 하였다. 따라서, 노즐에서의 메탄, 산소, 질소 혼합물 분사속도는 4.4019 m/sec가 된다.⁴⁾ 혼합물이 자연연소 되도록 하기 위해 혼합물의 배출온도를 1000 K로 하였다. 단열상태로 메탄이 완전연소될 경우 2000 K 이상이므로 이러한 가정이 해석에 큰 영향을 주지 않을 것으로 본다.⁵⁾

경계 2인 터널입구에서는 일정압력조건을 사용하였다. 본 연구의 목적에 따라 압력을 달리하여 터널 내부에서의 온도분포, CO₂의 몰농도, 풍속, 그리고 밀도 등을 조사하였다. 경계 3은 터널 출구로서 압력이 상압 즉 1 atm을 계속 유지하도록 하였다.

터널을 구성하는 외벽과 노즐을 둘러싼 벽은 모두 단열인 것으로 하였다.³⁾

3.3.2 초기조건

본 연구에서는 경계 1에서 화재가 일어나는 동시에 터널 입구 즉 경계 2에서 압력이 일정하게 유지되어 가해지는 것으로 하였다. 화재가 발생하기 직전 터널 내외부는 대기압(상압) 즉 1 atm이며 내부, 외부 모두 질소, 산소가 각각 79%, 21%의 몰농도로 존재하고 있는 것으로 하였다.⁶⁾ 경계 2를 통해 들어오는 공기의 성분도 앞과 동일하게 하였다. 또한 터널 내부의 공기와 경계 2를 통해 들어오는 공기의 온도는 비교를 편리하게 하기 위하여 모두 300 K (26.85°C)인 것으로 하였다.

4. 해석 결과 및 검토

4.1 밀도분포

화재시 터널내에서의 밀도변화를 예측하였다. Fig.

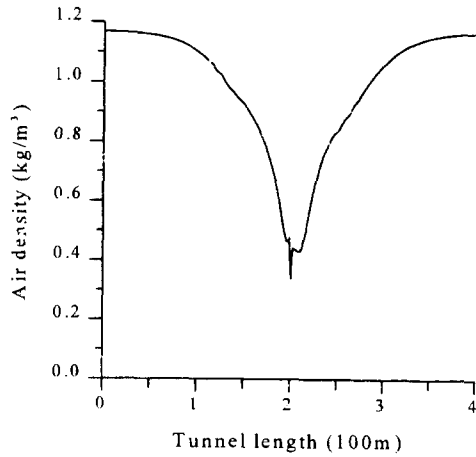


Fig. 4. Air density along tunnel length (Boundary condition: 1Pa, after 60sec)

Table 1. Average temperature (K) of the cross section

Pressure (Pa)	Time (sec)	Location from the fire (m)							
		-100	-50	-10	0	10	50	100	150
1	60	312	419	852	919	936	486	326	304
	120	315	448	854	946	964	671	388	312
	180	315	444	782	950	1000	887	519	349
5	60	307	359	569	732	926	628	358	309
	120	301	310	367	395	531	699	705	465
	180	300	300	304	306	385	392	503	648
7.5	60	305	341	504	573	809	725	394	316
	120	300	303	317	326	414	493	685	615
	180	300	300	300	301	348	341	360	433
10	60	304	329	451	502	679	783	444	329
	120	300	301	305	308	366	395	535	646
	180	300	300	300	300	333	326	329	347
15	60	302	318	386	422	549	775	558	370
	120	300	300	301	302	337	338	386	501
20	60	301	313	339	356	435	613	663	455
	120	300	300	301	301	325	321	328	360

4는 터널길이에 대한 밀도분포를 표현한 것인데 화재 발생 위치에서 밀도는 화재전보다 약 60% 가까이 감소하였음을 알 수 있다.

4.2 온도분포

각 압력경계조건에서 해석을 수행하여 터널 내부에 존재하는 공기의 단면평균온도를 구하였다. 이들 평균 값들은 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 볼 수 있듯이 화재지점으로부터 거리가 멀어질수록 평균온도는 내려갔다. 온도가 내려가는 정도는 화재 지점으로부터 같은 거리에서 비교했을 때 터널 입구방향이 터널 출구

Table 2. Comparison of the maximum and average temperature (K) of 20 Pa pressure boundary conditions.

Pressure (Pa)	Time (sec)	Tunnel length(m)							
		100	150	190	200	210	250	300	350
60	Avg.	301	313	339	356	435	613	663	455
	Max.	303	315	350	374	996	754	710	499
120	Avg.	300	300	301	301	325	321	328	360
	Max.	300	300	304	306	751	423	395	409

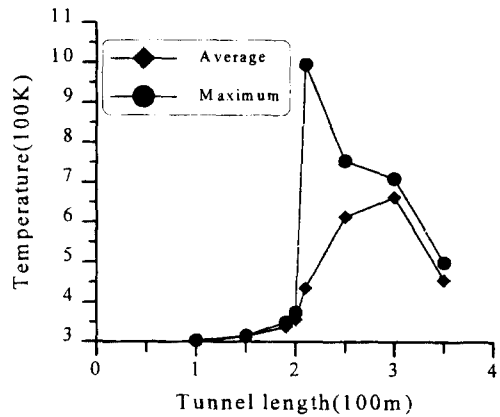


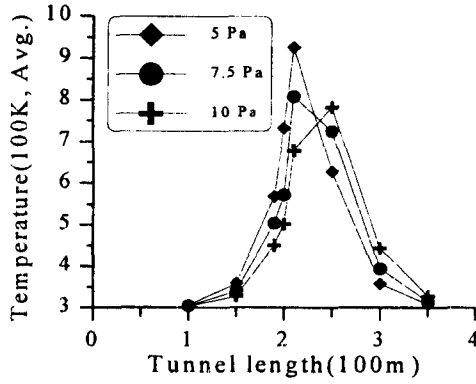
Fig. 5. Comparison of the maximum and average temperature in case of the 20 Pa pressure boundary condition. (after 60 sec)

방향보다 훨씬 빠르게 나타났다.

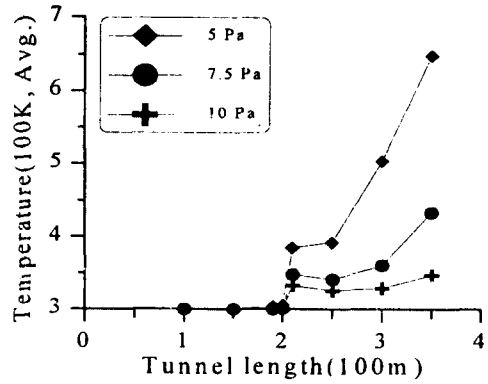
터널입구에서의 압력조건이 1 Pa에서 7.5 Pa 사이인 경우에 210 m 구간부터 터널 출구까지 평균온도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 압력경계조건이 10 Pa 이상인 경우에는 평균온도가 화재발생지점이 아닌 그 뒤의 다른 구간에서 더 증가한 뒤 다시 감소하는 현상을 보이고 있는데 이러한 현상은 Table 2와 Fig. 5에서처럼 화재경과시간별 단면평균온도와 단면최고온도를 비교함으로써 이해할 수 있다. 즉, 압력경계조건이 20 Pa인 Fig. 5에서 단면평균온도와 단면최고온도가 200 m 지점부터 약 300 m 지점까지 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 화재에 의해 발생한 산화물층과 기존의 상온 공기층이 서로 섞이지 않은 상태로 약 100 m 가까이 층류상태를 유지하기 때문이다.

4.2.1 압력경계조건에 따른 온도분포

Fig. 6(a), (b)에 나타난 것처럼 터널 입구에서의 압력 경계조건이 증가하는 경우에는 유입되는 상온의 공기가



(a) 60 sec after fire disaster



(b) 180 sec after fire disaster

Fig. 6. Comparison of temperatures in different pressure boundary conditions.

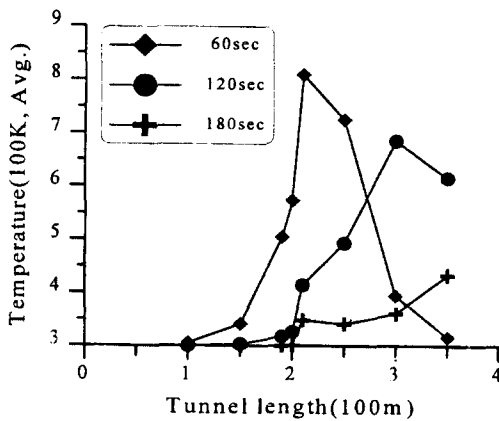


Fig. 7. Comparison of temperatures at different time (7.5 Pa).

더 많음으로 인해 열에너지를 더 빨리 잃게 되므로 각 단면에서의 평균온도가 대체적으로 더 빨리 낮아졌다.

Fig. 6(a)에서 보면 화재발생지점인 200 m~250 m 구간과 그 원편인 터널입구에서부터 200 m구간까지는 화재발생 후 60초밖에 지나지 않았기 때문에 산화물들이 터널입구방향으로 확산됨으로 인해 전 압력조건에 대해 온도가 상당히 높게 나타나고 있다. 또한 압력이 높을수록 이 구간에서의 온도는 상대적으로 더 낮게 나타나고 있는데, 그 이유는 경계에서의 압력조건이 높을수록 상온의 공기가 터널입구로부터 더 많이 유입되어 산화물들이 더 빨리 식기 때문이다.

화재발생지점의 오른편인 250 m에서부터 터널 출구까지는 이전 구간과는 다르게 압력이 높을수록 온도가 더 높게 나타나고 있는데 그것은 산화물들이 경계에서의 압력조건이 높을수록 더 빨리 출구 쪽으로 확산되어

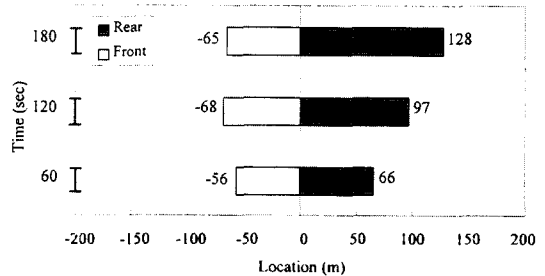


Fig. 8. The longitudinal range of CO₂ over 1% mole fraction at constant pressure boundary condition: 1 Pa.

이 구간의 평균온도를 상승시키기 때문이다.

Fig. 6(b)는 화재발생 후 180초가 지난 시점으로, 경계에서의 압력조건에 의해 이미 많은 상온의 공기가 터널 입구로부터 유입되어 터널입구에서 화재지점까지의 온도는 세 개의 압력조건에서 거의 모두 상온에 가까웠다.

그러나 화재지점에서부터 출구까지는 압력이 높을수록 온도가 더 낮게 나타나고 있다. 이것은 시간이 경과함에 따라 압력경계조건에 의해 터널입구에서 유입된 공기가 250 m~터널출구까지 이동하여 이 구간에 있던 산화물, 공기 혼합층과 섞이기 때문인데, 경계에서의 압력조건이 높을수록 더 많은 공기가 유입됨으로 인해 온도가 더 낮게 나타났다.

4.2.2 화재경과시간에 따른 온도분포

화재경과시간에 따른 온도변화를 알아보기 위해 압력조건 7.5 Pa에서의 화재경과시간에 따른 평균온도변화를 Fig. 7에 도시하였다.

평균온도의 최고점은 역시 화재발생 후 60초가 경과한 210 m 지점에서 나타나고 있고 산화물들이 터널 양방향으로 확산됨으로 인해 위로 볼록한 포물선의 형태를

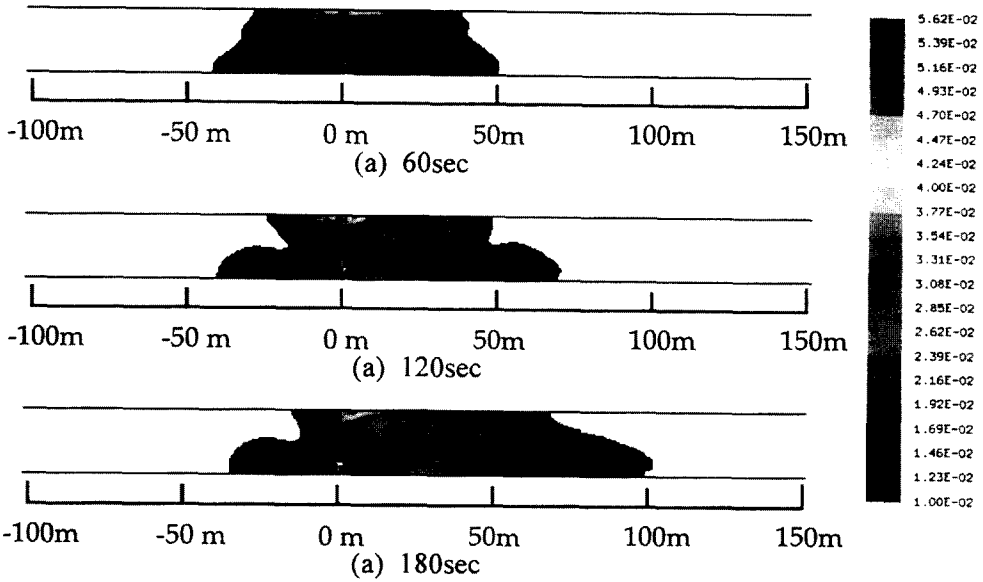


Fig. 9. Contour of CO₂ mole fraction at constant pressure boundary condition: 1 Pa.

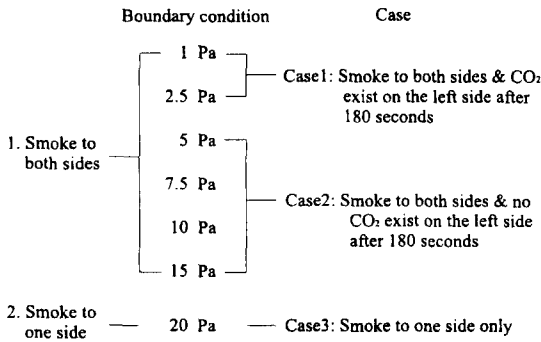


Fig. 10. The cases of CO₂ distribution.

하고 있다. 그리고 시간이 경과함에 따라 최고 온도는 터널 입구에서 유입된 공기가 터널 후반부까지 진출하여 혼합층과 섞여지기 때문에 낮아지고 있음을 알 수 있다.

4.3 CO₂ 분포

본 연구에서는 터널내부에서 메탄이 완전연소 한다고 가정할 경우 발화점으로부터 발생하는 CO₂의 단위 체적당 농도를 수치 해석적 기법으로 예측하였다. 해석 대상인 터널내 공기의 단위체적당 CO₂ 몰농도가 1%이상되는 농도 초과 지역을 계산하였으며 CO₂의 몰농도가 1%이상으로 존재하는 셀이 나타나기 시작하는 부분을 CO₂ 존재 구간의 양끝으로 하였다.⁶⁾ 이후에서 CO₂라 함은 몰농도가 1%이상인 것으로 간주한다.

4.3.1 압력경계조건에 따른 CO₂분포

Table 3. The critical velocity of each case

Case	Critical velocity (m/sec)	Comment
1	< 0.57	Smoke to both sides & CO ₂ exist on the left side after 180 seconds
2	> 0.57 & < 2.40	Smoke to both sides & no CO ₂ exist on the left side after 180 seconds
3	> 2.40	Smoke to one side only

Fig. 8은 CO₂의 확산범위를 나타낸 그림으로 화재발생지점을 0이라 하여 양쪽으로 각각 -200 m, 200 m의 길이로 그린 그림이다(-부호는 터널의 입구방향). Fig. 8은 압력경계조건이 1 Pa인 경우로서 화재발생 후 60초가 지났을 때 터널 입구방향으로 CO₂가 -56 m, 120초가 지났을 때는 -68 m에 이르렀고 180초가 흘렀을 때는 -65 m에 이르고 있다. 터널 출구방향으로는 180초가 지나도 CO₂가 터널 출구에까지 미치지 못하고 있다. Fig. 9는 같은 압력조건에서 터널 중심을 길이 방향으로 이등분하여 CO₂확산을 살펴본 그림이다. 이후 압력조건에 따라 계속하여 관찰한 바 압력조건이 20 Pa에 이르게 되면 CO₂가 화재발생후 계속하여 터널 출구방향으로만 확산됨을 알 수 있었다. 확산길어도 172 m나 되었다. 이상의 내용을 좀 더 세분하면 Fig. 10와 같다.

4.3.2 CO₂의 역류를 막는 풍속의 결정

본 연구의 목적은 서론에서 밝힌 것처럼 화재가 발생했을 때 사람이 호흡하여 질식할 수 있는 산화물 즉 유독가스가 화재발생지점에서 터널의 입구방향으로 역류하는 것을 막을 수 있는 최저 풍속을 결정하는데 있다.

CO₂의 확산 형태에 따른 분류와 풍속을 연관시켜 정리하면 Table 3과 같다. CASE 3에 해당하는 압력경계 조건은 20 Pa인데 화재발생 후 60초가 경과했을 때의 풍속이 약 2.40 m/sec이다. 이 속도는 바로 화재 발생 시 CO₂의 역류 즉, 터널입구방향으로의 흐름을 막는 최저 풍속이 된다.

5. 결 론

본 연구는 도로 터널 내 화재의 모델링 연구로서 메탄이 터널 한가운데서 완전연소 될 경우 터널 내부의 밀도변화, 화재경과시간 및 압력경계조건에 따른 터널 내 온도분포, 메탄의 연소로 발생하는 CO₂의 확산경로, 확산거리 등을 3차원 모델을 통해 연구하였다.

본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 터널에서 화재가 발생한 경우 화재 발생위치에서 공기의 밀도는 터널 입출구 주위보다 60%이하 낮아졌다.

2. 온도는 화재가 발생한 지점으로부터 멀어질수록, 터널 입구에서의 압력경계조건이 높아질수록 내려갔다. 그리고, 매연이 터널출구 방향으로만 진행하기 시작했을 때의 최고온도는 60초가 경과했을 때 터널 입구로부터 210 m지점에서 996 K, 350 m지점에서 499 K였다. 120초가 경과했을 때는 210 m지점에서 751 K, 350 m지점에서 409 K였다.

3. 압력경계조건이 10 Pa, 15 Pa, 그리고 20 Pa인 경우에는 평균온도가 화재발생지점이 아닌 그 뒤의 다른 구간에서 더 증가한 뒤 터널 출구 근처에서 다시 감소하는 현상을 보이는데, 이 구간에서의 단면평균온도와 단면최고온도를 비교해 본 결과, 이것은 화재로 인해 발생된 CO₂, H₂O가 터널내부에 원래 존재하던 상온의 공기와 서로 뒤섞이지 않고 층류상태를 유지하기 때문임을 알 수 있었다.

4. 압력경계조건이 15 Pa인 경우에는 층분리 현상이

약 50 m가까이 진행되었지만 20 Pa인 경우에는 약 100 m 가까이 진행되었다. 따라서 압력경계조건이 20 Pa에 이르기까지는 압력경계조건이 높아질수록 분리층의 길이가 길어짐을 알 수 있었다.

5. 화재가 발생함과 동시에 터널 입구에서 압력이 가해질 경우, 온도는 화재지점의 양쪽 벽면에 가까운 유체부터 올라갔고, CO₂ 또한 양쪽벽면에서부터 먼저 확산됨을 알 수 있었다.

6. 화재로 인해 발생한 산화물인 CO₂의 진행정도 및 방향에 따라 세 가지 경우로 나누어 고찰하였는데, 첫째, CO₂가 양방향으로 진행되고 180초가 경과하여도 터널 입구방향에 남아있는 경우, 둘째, CO₂가 양방향으로 진행되나 180초가 경과하면 터널 입구방향에는 남아있지 않고 출구로만 진행하는 경우, 셋째, 터널 출구방향으로만 진행하는 경우이다. 첫째 경우에 해당하는 압력경계조건은 1 Pa과 2.5 Pa이고 둘째 경우는 5 Pa~15 Pa, 셋째 경우는 20 Pa이었다.

7. 6에서 분류한 세 경우에 대해 환기속도를 알아보았는데 첫 번째 경우와 두 번째 경우를 구분하는 환기속도는 0.57 m/sec 였고 두 번째 경우와 세 번째 경우를 구분하는 환기속도는 2.40 m/sec이었다. 따라서 CO₂의 역류를 막는 최소 환기속도는 2.40 m/sec이다.

참 고 문 헌

1. Carmody & Sterling, 1993, Underground Space Design, VAN NOSTRAND REINHOLD, pp. 285-318
2. Nobuyoshi Kawabata, Hideo Ohashi and Yoshiaki Kato, 1991, Numerical simulation of fire fume propagation along the ceiling of a down-grade tunnel, Elsevier Science Publishers Ltd. England, *Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 319-335
3. Frank P. Incropera and David P. DeWitt, 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 833
4. Dougal Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 2-33, 351-378
5. Roger A. Strehlow, 1984, Combustion Fundamentals, MCGRAW-HILL, pp. 254
6. Hartman, Mutmanský, Wang, 1982, Mine Ventilation & Air Conditioning JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 7-9, 41-42