

도로터널의 화염전파해석에 관한 연구

권 용 일^{*}, 유 지 오, 이 동 호^{*}, 권 순 석^{**}

신흥대학 건축설비과, ^{*}인천대학교 산업안전과, ^{**}동아대학교 기계공학과

Study on the Analysis of Fire Propagation in Road Tunnels

Yongil Kwon^{*}, Jioh Lyu, Donho Lee^{*}, Sunsok Kwon^{**}

Building Mechanical Engineering, Shinheung College, Euijungbu 480-701, Korea

^{}Department of Safety Engineering, Incheon University, Incheon 402-749, Korea*

*^{**}Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea*

(Received December 22, 1999; revision received April 27, 2000)

ABSTRACT : This paper concerns the application of smoke and fire spread to road tunnel fire problems. When a road tunnel is on fire, a fire protection system of road tunnel have to offer an adequate escape space to human. Therefore, this study carried out a simulation for predicting a spreading path of smoke and fire. The evolution of the flow field is simulated with the low Reynolds number k-ε turbulent model and SIMPLE algorithm based on the finite volume method.

Key words: Back layer(역경계층), Conserved property(보존특성)

기 호 설 명

<p>C_μ, C_1, C_2 : 난류모델상수</p> <p>D : 난류운동에너지의 함수</p> <p>E : 저Re수 k-ε모델의 함수</p> <p>f : 연료의 혼합분율</p> <p>f_μ, f_1, f_2 : 저Re수 k-ε모델의 함수</p> <p>G_K : 난류발생</p> <p>g : 중력가속도</p> <p>H : 터널높이</p> <p>h : 혼합가스의 엔탈피</p> <p>k : 난류운동에너지</p> <p>L : 터널길이</p> <p>m : 질량분율</p>	<p>P_K : 점성저층의 저항</p> <p>Pr : 프란틀 수</p> <p>Re_t : 국소 난류레이놀즈 수</p> <p>Sc : 슈미트수</p> <p>P : 압력</p> <p>T : 온도</p> <p>u : 수평방향속도</p> <p>v : 수직방향속도</p> <p>x : 수평방향거리</p> <p>y : 수직방향거리</p>
---	--

그리스 문자

<p>ν_t</p> <p>μ_t</p> <p>ρ</p> <p>$\sigma_k, \sigma_\epsilon$</p>	<p>: 난류점성계수</p> <p>: 난류동점성계수</p> <p>: 밀도</p> <p>: 난류모델 상수</p>
--	---

† Corresponding author

Tel.: +82-0351-870-3319; fax: +82-0351-870-3313

E-mail address: yikwon@shinheung-c.ac.kr

하첨자

ref : 기준 값
inlet : 입구속도

1. 서론

도로터널의 화재현상 해석문제는 지금까지 많은 연구자들의 관심사항이다.⁽¹⁻²⁾ 제한된 공간인 도로터널을 이용하는 유동인구가 증가하여 이 곳에서의 화재 발생이 인명보호 관점에서 중요한 문제로 인식되고 있다. 또한 교통량이 많을 때 도로터널에서 발생한 화재는 소방대원의 접근이 어려워 터널의 제한된 체적 내에서 사람을 안전하게 대피시킬 수 있는 대피로를 확보하기 위해 적절한 환기방법을 고안할 필요가 있다. 이러한 화재발생 시 적절한 환기방법을 제공하기 위해서는 우선적으로 화염과 연기의 전파경로를 분석해야 된다. 최근, Kumar and Cox⁽³⁾는 즈웬버그(Zwenberg)터널에서 화재가 발생했을 때, 화염전파 경로를 실험 및 해석적 방법으로 연구한 결과, 환기팬의 운전속도가 높을 때, 측정된 자료와 수치해석결과가 잘 일치하고 있다고 발표하였다. 또한 터널의 경사도는 자연환기시에 많은 영향을 미치고 있음을 발표하였다. Biollay and Chass⁽⁴⁾은 오페네그(offeneegg)터널에 대한 화재현상 시험과 해석적 결과를 비교한 결과, 2차원해석과 3차원해석으로 구한 해는 거의 일치하고 있으며 복사열전달은 무시할 수 없을 정도로 크다고 발표하였다.

본 연구는 도로터널에서 화재 시 발생하는 연기 및 가열된 공기를 제거하기에 적합한 팬을 선정할 수 있는 자료와 사람을 대피시킬 수 있는 경로에 미치는 화염이 전파되는 현상을 분석하려고 한다.

2. 지배방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식

본 연구에서 화염 및 연기의 전파현상을 해석하기 위해 적용된 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 엔탈피 및 무차원 연료혼합분율(fuel mixture fraction)방정식은 식(1)-(5)와 같다. 해

석을 단순화하기 위하여 유동은 2차원 정상상태로 가정하였으며 점성소산은 무시하였다. 또한 공간내의 유체는 압축성이다, 복사열전달은 무시하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + (\nu_t + \nu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_t + \nu) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \tag{2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + (\nu_t + \nu) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu_t + \nu) \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) + g\beta(\rho_{ref} - \rho) \tag{3}$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = \left(\frac{1}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \tag{4}$$

$$u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = \left(\frac{1}{Sc} + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) \tag{5}$$

여기서, 식(4)의 Pr=0.71, Pr_t=1.0으로 가정하였으며 식(5)의 Sc=0.71, Sc_t=1.0으로 가정하였다. 상기 식에서 표현된 난류점성계수를 구하기 위하여 Jones and Launder⁽⁵⁾가 제안한 저 Reynold수 난류모델의 k-ε 방정식을 이용하였다.

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right) + P_k + G_k - \epsilon + D \tag{6}$$

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} \right) + [c_{\epsilon 1} f_1 (P_k + c_{\epsilon 3} G_k) - c_{\epsilon 2} f_2 \epsilon] \frac{\epsilon}{k} + E \tag{7}$$

여기서,

$$P_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right],$$

$$G_k = -g\beta \frac{\nu_t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

$$D = -2\nu \left[\left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \right],$$

$$E = 2\nu\nu_t \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 \right]$$

$$\nu_t = c_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

상기 식에서 사용된 상수와 계수는 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $Pr_t = 0.9$, $C_1 = 1.45$, $C_3 = \tanh |v/u|$

$$C_2 = 2[1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)],$$

$$C_\mu = 0.09 \exp\left(\frac{-2.5}{1 + Re_t/50}\right),$$

여기서, $Re_t (k^2/\nu\varepsilon)$ 는 난류 Reynolds수 이다.

2.2 경계조건

화염 및 연소가스의 확산과정을 해석하기 위한 해석영역은 터널길이 152 m이며, 터널의 높이는 7 m로 Fig. 1과 같이 2차원으로 가정하였으며 경계조건은 Table 1과 같다. 유출구의 화염전과 현상을 중점적으로 관찰하기 위해 발화지점은 터널 좌측입구에서 50 m정도 떨어진 지점이며 화염면의 길이는 2.6 m로 가정하였다.

연료의 보존특성(conserved property)에 의해 식(8)과 같은 관계식이 성립된다.

$$m_{fx} = m_{fu} - \frac{m_{ox}}{4} \quad (8)$$

여기서, m_{fu} 는 연료의 평균 질량분율이며, m_{ox} 는 산소의 평균 질량분율이다. 무차원 연료혼합분율(f)은 식(9)와 같이 연료의 보존특성을 이용하여 무차원화 하였다.

$$f = (m_{fx} - m_{fx\infty}) / (m_{fx0} - m_{fx\infty}) \quad (9)$$

여기서, ∞ 와 0 는 외기, 화염면에서 연료의 보존특성을 각각 나타내고 있다. 터널 외부의 공기 온도는 300 K, 밀도는 1.21 kg/m^3 , 비열은 1100 J/kgK 로 가정하였다. 화재가 발생하여 쉘이 운전될 경우, 유입구의 평균유속(U_{inlet})은 1, 2 및 4 m/sec로 변화시켰다.

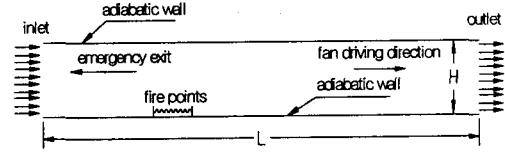


Fig. 1 Schematic diagram for analysis.

Table 1 Boundary condition for analysis

	inlet	outlet	fire point	walls
velocity u	$u = U_{inlet}$	$\frac{\partial U}{\partial X} = 0.0$	$u = 0$	$u = 0$
velocity v	$v = 0$	$\frac{\partial V}{\partial X} = 0.0$	$v = 0$	$v = 0$
velocity w	$w = 0$	$\frac{\partial W}{\partial X} = 0.0$	$w = 0$	$w = 0$
mixture fraction of fuel	$f = 0.0$	$\frac{\partial f}{\partial X} = 0.0$	$f = 1.0$	$\frac{\partial f}{\partial Y} = 0.0$
enthalpy	$h = 4.5E+5$	$\frac{\partial h}{\partial X} = 0.0$	$h = 4.9E+7$	$\frac{\partial h}{\partial Y} = 0.0$
turbulence kinetic energy	$K = K_{inlet}$	$\frac{\partial K}{\partial X} = 0.0$	$K = 0.0$	$K = 0.0$
turbulence dissipation	$\varepsilon = \varepsilon_{inlet}$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial X} = 0.0$	$\varepsilon = 0.0$	$\varepsilon = 0.0$

2.3 보조관계식

본 해석영역의 유체는 압축성이므로 연소반응에 의해 확산되는 혼합기체의 밀도는 식(10)의 이상기체 상태방정식을 적용하여 구한다.

$$\rho = \frac{W_{avg} P}{RT} \quad (10)$$

여기서, R 는 기체상수이며, T 는 혼합기체의 온도, P 는 표준대기압이고 W_{avg} 는 평균분자량을 나타내고 있다. 평균 분자량은 식(11)과 같이 구하였으며 이 값은 산소와 연료 및 연소시 발생하는 부산물의 합으로 표현된다.

$$\frac{1}{W_{avg}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{W_i} \quad (11)$$

질량분율의 합은 식(12)와 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1.0 \quad (12)$$

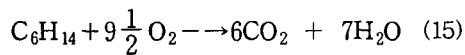
혼합가스의 엔탈피는 식(13)과 같이 표현된다. 여기서 혼합가스의 비열(C_{pmix})은 혼합된 가스에서 차지하는 질량분율의 비율로 식(14)와 같이 평가하였다.

$$h = C_{pmix}T + m_{fu}h_{fu} \quad (13)$$

여기서, h_{fu} 는 연소열량이다.

$$C_{pmix} = \sum_{i=1}^n m_i C_{pi} \quad (14)$$

연료의 연소열량(h_{fu})를 구하기 위해, 연소화학반응은 식(15)와 같이 핵산/공기혼합으로 가정하였으며 연소모델은 아래와 같이 1단계 완전연소반응을 수행한다고 가정하였다.



연소 열량은 Blinov and Khudiakov⁽⁶⁾의 데이터를 이용하여 계산하였다. 휘발유의 연료표면에서 화염이 전파되는 거리는 4 mm/분으로 가정하여 연소에 의한 발열량은 14.45 MW이며, 이때 연소열량(h_{fu})은 45.5 MJ/kg이다.

2.4 수치해석방법

유동 및 온도장을 계산하기 위해 격자계를 105 × 95의 비균일 격자계로 나누고 검사체적법을 수행하였다. 운동량방정식에 나타난 압력항은 SIMPLER 알고리즘으로 처리하였다. 수렴조건은 연료표면에서 발생하는 엔탈피와 터널의 유출구로 방출되는 엔탈피의 차이에 대한 오차가 10^{-3} 이하인 경우로 가정하였다. 수렴을 향상시키기 위해 하향이완계수를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

터널의 유입구에서 50 m안쪽에 위치한 발화지점에서 엔탈피가 45.5 MJ/kg이 발생할 때, 사람이 위치하는 지점($y \leq 1.5$ m)의 화염과 산소농도의 전파현상을 고찰한 결과는 다음과 같다.

Fig. 2는 화재발생 시 환기를 수행하지 않는

자연대류와 환기팬을 운전할 때 유입속도(1 m/sec, 2 m/sec 및 4 m/sec)변화에 따른 속도분포를 나타내고 있다. 속도분포는 발화지점 좌측 20 m에서부터 발화지점 우측 30 m지점까지 나타내고 있다. 자연대류의 속도분포는 연료가 존재하는 지점의 상부로 수직 상승하여 상부 벽체 부근에서 화염이 좌, 우측 방향으로 이동하는 양방향 유동으로 인해 연료가 존재하는 하부 벽체 부근에서 꾸준히 신선공기가 유입되어 재순환되는 현상을 나타내고 있다. 환기팬을 운전하는 경우, 풍속이 1 m/sec 이하에서도 부력의 영향이 크지만 1 m/sec 이상에서 관성력의 영향이 커져 일방향 유동이 발생되어 상부단열 벽체부근에서 back layer 현상이 감소된다.

Fig. 3은 화재발생 시 환기를 수행하지 않는 자연대류와 환기팬을 운전할 때 유입속도(1 m/sec, 2 m/sec, 4 m/sec)변화에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 온도분포는 발화지점 좌측 20 m에서부터 발화지점 우측 30 m지점까지 나타내고 있다. 화염에서 최고온도는 1700 K까지 상승하며 자연대류의 경우, 좌, 우대칭으로 형성되는 화염으로 인해, 온도분포가 좌, 우대칭 형태를 나타내고 있다. 그러나 환기팬이 운전되는 경우는 풍속이 증가함에 따라 유입구 측의 온도는 외기 온도와 동일하게 유지되지만 유출구 측의 온도는 자연대류보다 현저히 증가하는 현상을 나타내고 있다. 또한 최대온도가 발생하는 지점이 자연대류보다 조금 우측으로 이동하고 있다. 그러므로 풍속이 2 m/sec 이상에서는 유입구 측에 존재하는 사람들에게 도피경로를 충분히 제공할 수 있음을 나타내고 있다.

Fig. 4는 화재발생시 환기를 수행하지 않는 자연대류와 환기팬을 운전할 때, 유입속도(1, 2, 4 m/sec)변화에 따른 산소의 질량분율(m_{ox})분포를 나타내고 있다. 자연대류의 경우, 이 값은 사람이 존재하는 영역($y \leq 1.5$)에서 수평방향 위치에 관계없이 0.232부근의 값을 나타내고 있다. 그러나 환기팬이 운전될 때, 산소농도가 감소되는 영존재하는 영역($y \leq 1.5$)에서 수평방향 위치에 관계없이 0.232부근의 값을 나타내고 있다. 그러나 환기팬이 운전될 때, 산소농도가 감소되는 영질의 제거보다 뜨거운 공기가 대피로 영역에 전파되는 것을 차단하기 위함이다.

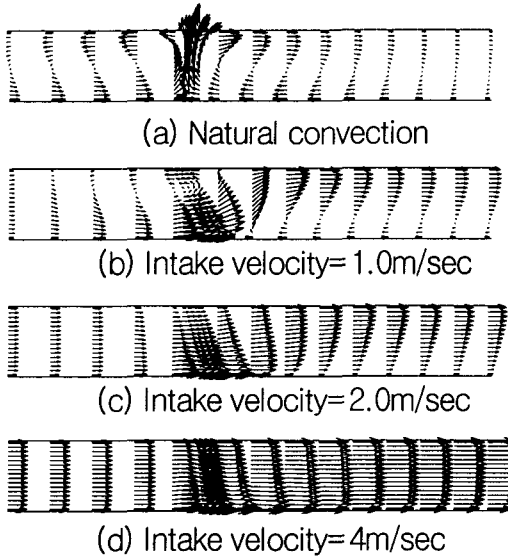


Fig. 2 Vector velocity distributions for various intake velocities.

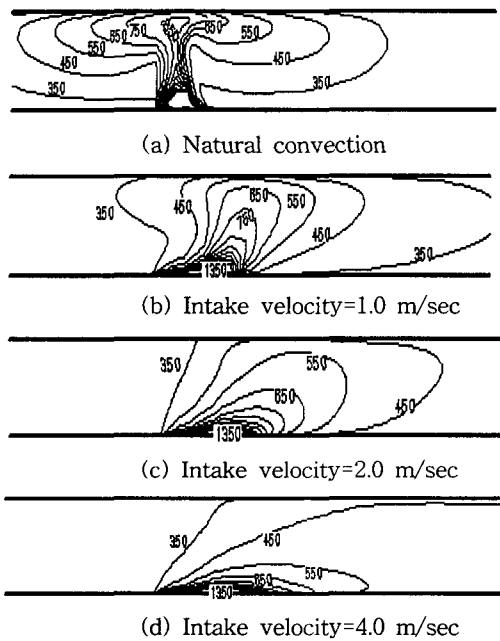


Fig. 3 Temperature distributions for various intake velocities.

Fig. 5는 터널바닥의 상부 1.5 m에서의 온도분포를 수평거리의 변화에 따라 나타내고 있다. 발화지점의 온도는 자연대류의 경우, 최대값을 나

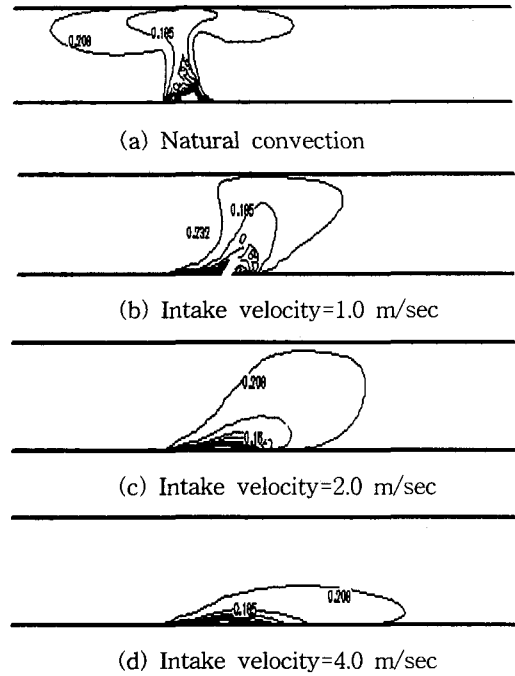


Fig. 4 Oxygen mass fraction distributions for various intake velocities.

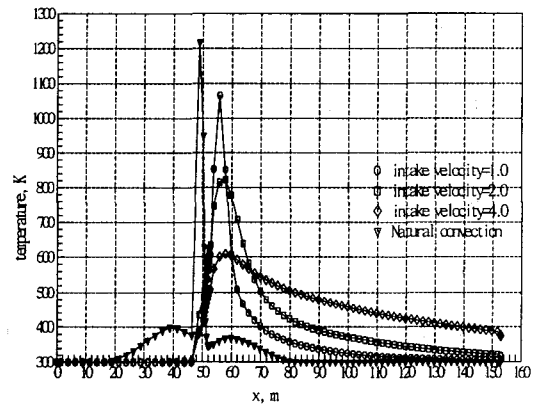


Fig. 5 Temperature distributions along horizontal distance for various intake velocities at $Y=1.5$ m.

타내고 환기풍속이 증가함에 따라 현저히 감소하는 현상을 나타내고 있다. 유입구측의 온도분포는 환기 팬을 운전하지 않는(자연대류)경우를 제외하고 외기온도와 동일하게 나타나고 있다.

유출구측의 온도분포는 통과풍속이 증가함에 따라 현저히 증가하며 특히 풍속이 4.0 m/sec일 때는 유출구 부근을 제외하고 400 K이상의 온도를 나타내고 있다

Fig. 6은 터널바닥의 상부 1.5 m에서의 산소 질량분율 분포를 수평거리 변화에 따라 나타내고 있다. 산소 질량분율은 발화지점 부근에서 가장 적은 값을 나타내고 있으며, 자연대류의 경우가 이런 현상이 가장 뚜렷하게 나타내고 있다. 유입구 부근에서의 산소 질량분율은 자연대류의 경우가 낮게 나타내며 유출구 부근의 산소농도비율은 풍속이 증가함에 따라 자연대류보다 낮은 값을 나타내고 있다. Fig. 5와 Fig. 6에서 나타난 현상을 분석한 결과, 환기 팬을 운전하지 않는 자연대류의 경우, 발화지점의 좌, 우측부근의 높은 온도분포와 유입구 부근에서 낮은 산소 질량분율을 제거하고 안전한 대피로를 제공할 수 있는 임계 풍속은 2 m/sec임을 나타내고 있다. 그러나 풍속이 증가함에 따라 유출구 부근의 온도가 높게 유지되고 산소 질량분율을 낮게 유지된다.

Fig. 7은 발화지점의 30 m 좌측지점에서 수직거리변화에 따른 수평방향 속도분포를 나타내고 있다. 자연대류의 속도분포는 하부벽체 부근에서 우측방향으로 상부벽체 부근에서 좌측방향으로 이동하는 속도분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 환기 팬이 운전되는 경우, 풍속이 1 m/sec에서도 나타나지만 부력보다 관성력이 증가되는 풍속에서(2 m/sec, 4 m/sec)는 일방향성 유동이 발생한다. 발화지점으로부터 30 m 우측지점에서의 수평방향 속도분포를 Fig. 8에 나타내고 있다. 자연대류의 경우, Fig. 7과 대칭형태의 속도분포를 나타내고 있으며 일방향성 유동을 나타내는 풍속 4.0 m/sec인 경우, 수평방향 속도는 유입구 속도보다 높은 속도(평균유속 5.7 m/sec)로 유지됨을 나타내고 있다. 이는 풍속이 4 m/sec인 경우가 터널내부의 온도를 현저히 증가되었기 때문이다.

Fig. 9는 발화지점의 30 m 좌측지점에서 수직거리변화에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 이 값은 자연대류 현상이 발생하는 경우, 상부벽체 부근에서 온도분포가 현저히 증가하지만 풍속이 증가함에 따라 풍속이 1 m/sec 이상에서는 현저히 낮은 온도분포를 나타내고 있다.

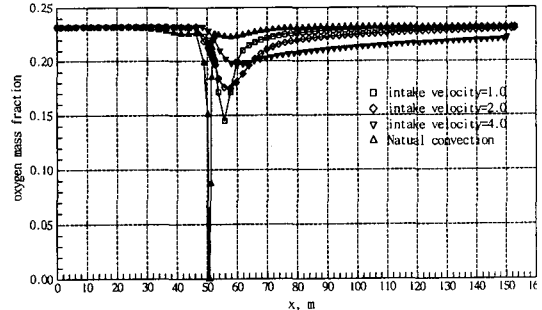


Fig. 6 Oxygen mass fraction distributions along horizontal distance for various intake velocity at $y=1.5$ m.

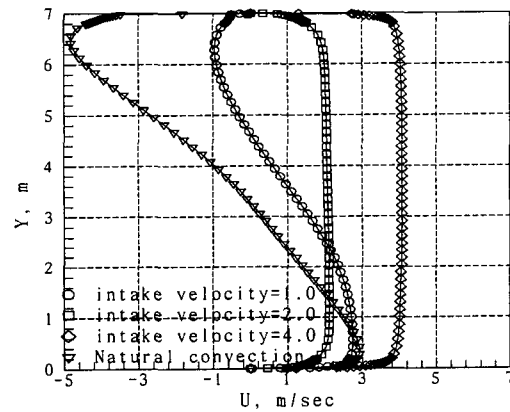


Fig. 7 Horizontal velocity along vertical distance for various intake velocities at 30 m behind from fires point.

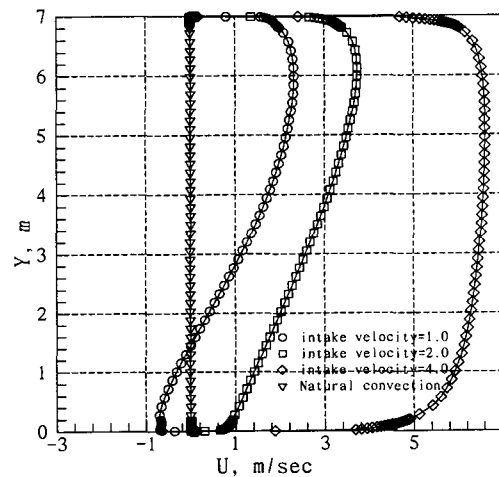


Fig. 8 Horizontal velocity along vertical distance for various intake velocities at 30 m front from fires point.

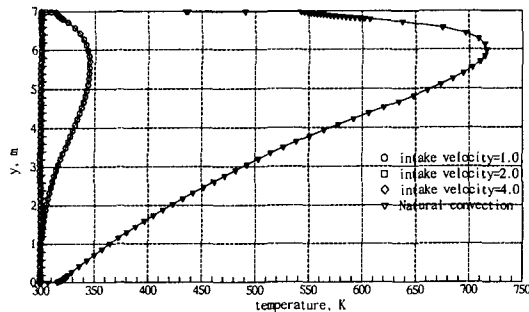


Fig. 9 Temperature distributions along vertical distance for various intake velocities at 30 m behind from fires point.

4. 결 론

발화지점의 발열량을 45.5 MJ/kg으로 가정하고 유입구의 풍속(1 m/sec, 2 m/sec 및 4 m/sec)로 변화시켰을 때, 화염과 연소가스의 전파 현상을 자연대류인 경우와 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 자연대류의 경우, 발화지점을 기준으로 좌, 우대칭 형태로 화염이 전파되고 산소 질량분율도 동일한 분포를 나타내며 사람이 존재하는 지점($y \leq 1.5$)까지 높은 온도분포를 나타내고 있다.

(2) 발화지점의 좌측에 대피공간을 제공하기 위한 임계속도는 2 m/sec로 나타났다.

(3) 바닥면으로 부터 1.5 m상부에 위치한 지점의 최고온도는 풍속이 증가함에 따라 감소하며 최고온도를 나타내는 지점은 자연대류의 경우보다 우측으로 이동되고 있음을 나타내고 있다.

(4) 바닥면으로 부터 1.5 m상부에 위치한 지점

의 산소 질량분율은 자연대류인 경우가 다른 조건보다 대피로인 유입구 부근에서 미소하게 높은 값을 나타내고 있다.

참고문헌

1. Jones, W. W., 1981, A review of compartment fire models, U.S. National Bureau of Standard, NBSIR 83-2884.
2. Kumar, S., 1983, Mathematical modelling of natural convection in fire a state of the art review of the field modelling of variable density turbulent flows, Fire & Materials, Vol. 1, No. 1.
3. Kumar, S. and Cox. G., 1985, Mathematical modelling of fires in road tunnels, 5th international symposium on the aerodynamics & ventilation of vehicle tunnels, lille, France, 20-24, May.
4. Biollay, H and Chasse, P, 1995, Validating and optimizing 2D and 3D computer simulations for the offeneegg tunnel fire tests, 9th international symposium BHRA, pp. 357-382.
5. Jones, W. P. and Launder, B. E., 1972, The prediction of laminarization with a two Equation Model of Turbulence, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314.
6. Blinov, V. I. and Khudiakov, G. N., 1957, On certain regularities on diffusion burning of liquids, Dokl Akad Nauk SSSR(intranslation), 113, pp. 241-244.