

소단면 대심도 터널 화재시 대배기구의 설치형태에 따른 화재특성 연구

최판규^{1*} · 백두산² · 유지오³ · 김창용⁴

¹정회원, (주)주성지앤비 팀장

²비회원, (주)주성지앤비 대리

³정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

⁴정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

A study on the fire characteristics according to the installation type of large smoke exhaust port in a small cross sectional tunnel fire

Pan-Gyu Choi^{1*} · Doo-San Baek² · Ji-Oh Yoo³ · Chang-Yong Kim⁴

¹Team Leader, JS G&B Inc.

²Researcher, JS G&B Inc.

³Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

⁴Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

*Corresponding Author : Pan-Gyu Choi, pgchio@gnbeng.com

Abstract

Recently, due to the efforts to mitigate traffic congestion and expansion of space efficiency, the construction of underground roads has been increased in big-scale cities. Since tunnels in the city have a higher chance for a fire leading to a great tragedy during a severe traffic jam than mountain tunnels, it is highly likely that it will be constructed as a tunnel, having a small cross section, for small vehicles. However, if they are constructed as such small-vehicle tunnels, it would be possible to reduce the design fire intensity while the concentration of harmful gases would increase due to a reduction in the small cross sectional area, led by a decrease in the tunnel height. In this study, behaviors of fire smoke by the installation interval and format of large-scale exhaust-gas ports were examined and compared in the analysis of temperatures and CO concentrations of a tunnel and its results were as the following. Although there were no significant differences in the smoke spreading distance between installation intervals, but in this study, 100 m was found to be the most effective installation interval. The smoke exhaustion performance was found to be excellent in the order of $4\text{ m} \times 3\text{ m}$, $6\text{ m} \times 2\text{ m}$, and $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ (2 lane) of the smoke spreading distance. Although there was no significant difference in the smoke spreading distance between formats of large-scale exhaust-gas ports, it was found that the smoke spreading distance was larger than other cases when it was $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ in the fire growing process. The analysis of smoke spreading distances by the aspect ratio showed that a smoke spreading distance was shorted when its the smoke spreading distance was found to be shorter when its traverse distance was relatively longer than its longitudinal distance.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(1)201-210(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.201>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 10, 2018

Revised December 28, 2018

Accepted January 3, 2019



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: Large smoke exhaust port, Small cross section tunnel, Tunnel fire

초 록

최근 국내외 도심지역의 교통정체 완화와 공간의 효율성 증대를 위해 대도시내 도로의 지하화 시행빈도가 증가하고 있다. 도시부 터널은 극심한 정체상황 중 화재가 발생할 경우 대형 참사를 유발할 가능성이 산악터널보다 높기 때문에 소단면으로된 소형차전용터널로 시공이 될 가능성이 높다. 소형차 전용의 터널로 시공이 될 경우, 소형차 전용터널은 차량에 의한 설계화재강도를 감소할 수 있는 반면, 터널 높이 감소 등에 따른 단면적 축소에 따라 유해가스농도가 증가하여 위험도는 증가하는 상반된 특징이 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 대배기구의 설치간격과 형태에 따른 화재양상을 터널 내 온도 및 CO농도를 분석하여 비교·검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. 설치간격에 따른 연기확산거리는 큰 차이가 없는 것으로 분석되었으나, 본 연구에서는 간격이 100 m인 경우가 가장 효과적으로 분석되었다. 대배기구 형상에 따른 연기확산거리는 4 m × 3 m, 6 m × 2 m, 3 m × 2 m (2열) 순으로 배연성능이 우수한 것으로 분석되었으며, 대배기구 형상에 따른 연기확산거리는 플래시오버 이후에는 큰 차이가 없지만 화재 성장과정에서 3 m × 2 m인 경우 다른 경우보다 확산거리가 큰 것으로 분석되었고, 대배기구 종횡비에 따른 연기확산거리는 횡방향으로 긴 경우보다 종방향으로 긴 경우가 화재연기의 확산거리가 더 짧은 것으로 분석되었다.

주요어: 대배기구, 소단면 터널, 터널화재

1. 서론

최근 국내외 도심지역의 교통정체 완화와 공간의 효율성 증대를 위해 대도시내 도로의 지하화 시행빈도가 증가하고 있다. 국내에서는 2010년에 서울시에서 격자형으로 지하도로망을 구축하는 U-smartway 계획이 발표된 바가 있고 현재는 제물포로 터널과 서부간선도로 지하터널이 소형차 전용터널로 시공되고 있으며, 도심지에 도심도복층터널의 환기 및 방재에 대한 연구가 진행되고 있다(Byun et al., 2011). 도시부 터널은 극심한 정체상황 중 화재가 발생할 경우 대형 참사를 유발할 가능성이 산악터널보다 높기 때문에 화재발생확률이 큰 대형 트럭 등을 제외하고 소단면으로된 소형차전용터널로 시공이 될 가능성이 높다. 소형차 전용의 터널로 시공이 될 경우, 소형차 전용터널은 차량에 의한 설계화재강도를 감소할 수 있는 반면, 터널 높이 감소 등에 따른 단면적 축소에 따라 유해가스농도가 증가하여 위험도는 증가하는 상반된 특징이 있다(Yoo et al., 2015). Yoo and Kim (2018)은 횡류식 환기방식을 사용하는 도로터널에서 환기시스템의 최적설계를 목적으로 수치해석적인 방법에 의해서 환기특성을 고찰하고, 소요환기량과 환기비용량의 관계를 검토하였으며, Yoo et al. (2017)은 대배기구방식을 적용한 소단면 터널인 A86과 U-smartway, 서부간선터널의 단면으로 수치해석을 통해 화재강도 및 배연풍량에 따른 화재시 터널 내 온도 및 유해가스 농도를 분석하였다. 그러나 4 m × 3 m 크기의 대배기구를 500 m 구간에 50 m 간격으로 설치한 경우 만 해석을 수행하였기 때문에 대배기구의 설치 간격이나 크기에 따른 화재양상은 확인할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통해 대배기구의 설치간격과 형태에 따른 화재양상을 터널 내 온도 및 유해가스농도를 분석하여 비교·검토하였다.

2. 해석조건

2.1 해석대상 및 해석종류

소단면 대심도터널의 대배기구 형상과 설치간격에 대한 영향을 비교하기 위해서는 우선적으로 대상터널에 대한 지목과 화재강도의 선정이 필수적이다. 본 연구에서는 서부간선도로 터널의 단면을 대상으로 선정하였고, 이에 따른 터널 표준단면을 Fig. 1에 나타내었다. 터널 방재시설 설계시 방재시설의 설치 규모를 결정하기 위해 적용하는 차량의 화재강도(Heat release rate)는 일반도로 터널(이하 대단면 터널)의 경우에는 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(Ministry of Land, 2015)”에서 버스 1대의 화재를 기준으로 최대 화재강도를 20 MW로 정하고 있으나, 소단면 터널을 고려하여 15 MW의 발열량을 적용하였다. 그리고 대배기구 방식에서 배연풍량은 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”에서 제시된 배연풍량식을 따라 적용하였으며, 종단경사는 1.0%로 하였다.



Fig. 1. Cross-section

대배기구의 형상은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸바와 같이 전체 1개 대배기구의 면적을 12 m^2 로 동일하게 부여하기 위하여 4가지의 대배기구 형상을 적용하였다. 대배기구의 간격은 25, 50, 75, 100 m으로 설정하여 그 간격에 맞도록 대배기구를 위치시켰다.

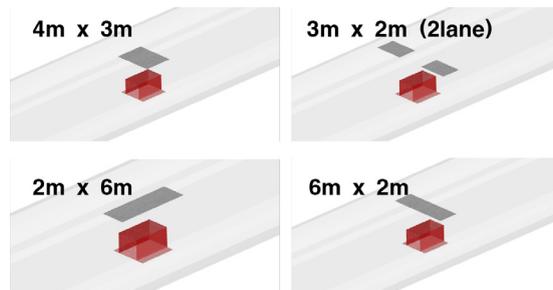


Fig. 2. Type of smoke exhaust port

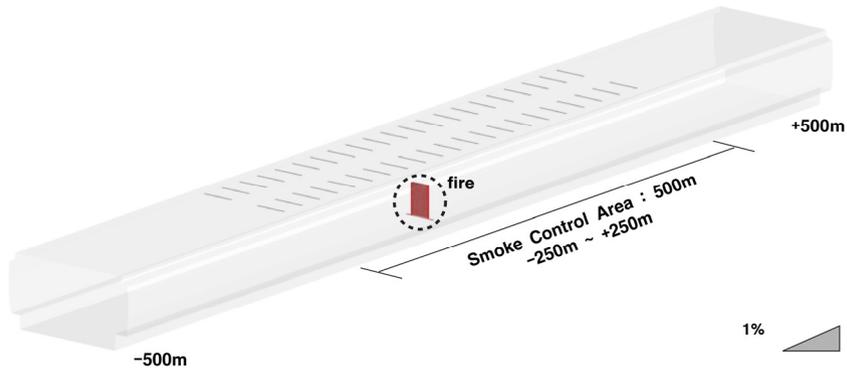


Fig. 3. Simulation domain

해석종류는 Table 1에 나타낸 바와 같이 Case 1부터 Case 4는 배기구의 형상이 4 m × 3 m일 때 대배기구의 설치간격(25, 50, 75, 100 m)에 따른 온도 및 유해가스농도 확산거리를 해석하였으며, Case 5부터 6은 대배기구의 설치간격이 50 m일 때 대배기구의 형상(3 m × 2 m 2열, 4 m × 3 m, 6 m × 2 m)에 따른 온도 및 유해가스농도 확산거리를 해석하였다. 또한 Case 7은 중횡비에 따른 확산거리를 분석하기 위하여 대배기구의 형상을 2 m × 6 m으로 하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Case of simulation

	Slope	Size	Installation distance
Case 1	1.0%	4 m × 3 m	25 m
Case 2			50 m
Case 3			75 m
Case 4			100 m
Case 5		3 m × 2 m (2 lane)	50 m
Case 6		6 m × 2 m	50 m
Case 7		2 m × 6 m	50 m

2.2 지배방정식 및 경계조건

본 연구에 사용된 지배방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식, 성분 방정식, 에너지 방정식, 난류운동에너지 방정식, 난류운동에너지소산을 방정식으로써 이러한 지배방정식의 수학적 표현은 식 (1)~(6)과 같다.

연속 방정식(Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식(Momentum Equation)

$$\begin{aligned} &: \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \\ &- \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] + g_i \rho \end{aligned} \quad (2)$$

성분 방정식(Species Equation)

$$: \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_s U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial c_s}{\partial x_j} \right\} + S_m \quad (3)$$

에너지 방정식(Energy Equation)

$$\begin{aligned} &: \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho T U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} + \frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \\ &+ S_{source} - S_{loss} \end{aligned} \quad (4)$$

난류운동에너지 방정식(Turbulent Kinetic Energy Equation)

$$\begin{aligned} &: \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k \\ &+ G - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

난류운동에너지소산율 방정식(Dissipation Rate Equation of Turbulent Kinetic Energy)

$$\begin{aligned} &: \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + G) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_t = 1.0$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $G = \frac{\mu_t}{\sigma_t} g_i \beta \frac{\partial T}{\partial x_i}$ 이다.

화재직전 주행속도는 정체시로 가정하여 교통환기력에 의해 유도된 터널 내 풍속은 없는 것으로 가정하였으며, 터널 입구 및 출구를 압력경계조건(Pressure Boundary)으로 화재해석을 수행하였다. 화재입력조건은 화재강도 20 MW, CO 발생량은 0.1025 kg/s를 적용하였다(PIARC, 1999). 이때 화재성장률(α)은 0.001 W/s²로 적용하였고, 화재성장이 정점에 도달하는 시간은 450 sec, 이후 최대 화재 강도 유지시간은 600 sec까지로 적용하였다 (Fig. 4 참조).

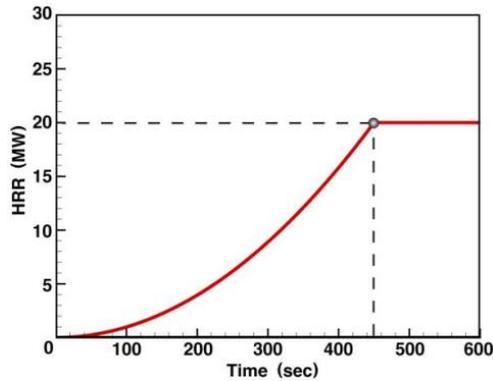


Fig. 4. Fire growth (HRR) curve

수치해석 방법은, ‘도로터널 제연용 제트팬 산정기준 개선연구(최종 연구 보고서)’에 제시된 방법을 적용하였으며, 유동상태는 3차원 비압축성 이상기체(Incompressible Ideal Gas), 연산상태는 비정상상태(Unsteady-State Condition)로 수행하였고(Korea Expressway Corporation 2012), 난류모델은 격자의 수와 계산시간을 고려하여 공학적으로 응용범위가 넓고 수렴성이 좋은 Standard k- ϵ 모델을 사용하였다(Launder and Spaling 1974).

터널의 화재를 모사하기 위해서 화재모델은 VHS (Volumetric Heat Source) 모델을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 기타 경계조건 및 수치해석에 대한 정보는 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2. Boundary conditions & calculation method

Items	Input/Apply
Method	3D Finite volume method
State	Unsteady state
Air condition	Incompressible ideal gas
Turbulent model	Standard k- ϵ
Fire model	Volume metric heat source
Tunnel wall and floor	No-slip condition
Tunnel inlet / outlet	Atmospheric pressure boundary condition
Air temperature	300 K
Fire source terms	Energy: 20 MW CO: 0.1025 kg/s

3. 해석결과

Fig. 5와 Fig. 6에는 대배기구 형상이 4 m × 3 m일 때 대배기구 설치간격에 따른 100 ppm 이상의 CO와 60°C 이상의 공기가 확산하는 거리를 나타내었다. 설치간격에 따른 확산거리는 설치간격이 100 m인 경우의 확산거리

가 가장 짧은 것으로 분석되었다. 동일한 배연풍량이 적용되어 있기 때문에 대배기구 설치간격에 따라 대배기구의 설치개수가 달라지고, 결국 설치간격에 따라 각기 다른 배연풍속을 갖게 된 것으로 분석된다. 즉, 설치간격이 멀수록 하나의 대배기구에서 갖게 되는 배연풍속은 증가되게 된다. 따라서 설치간격이 100 m인 경우의 확산거리가 가장 짧은 것은 이러한 이유가 반영된 것으로 분석된다. 또한 상향구배로의 확산거리는 구배가 높아질수록 확산거리가 증가하지만, 하향구배로의 확산거리는 구배가 낮을수록 확산거리가 증가하는 것을 볼 수 있다. 화재차량을 중심으로 하향구배로 방향으로의 화재연기의 확산은 구배가 낮을수록 구배가 높은 경우보다 부력의 영향을 상대적으로 작게 받아 그 확산이 용이하기 때문으로 판단된다. 또한 화재초기의 확산은 상향구배보다 하향구배로의 확산이 더욱 빠르게 나타나다가 화재최성기 지점인 플래시오버(flashover)를 지남으로써 화재연기가 폭발적으로 증가됨에 따라 상향구배로의 확산속도가 더욱 빨라지는 것으로 분석되었다.

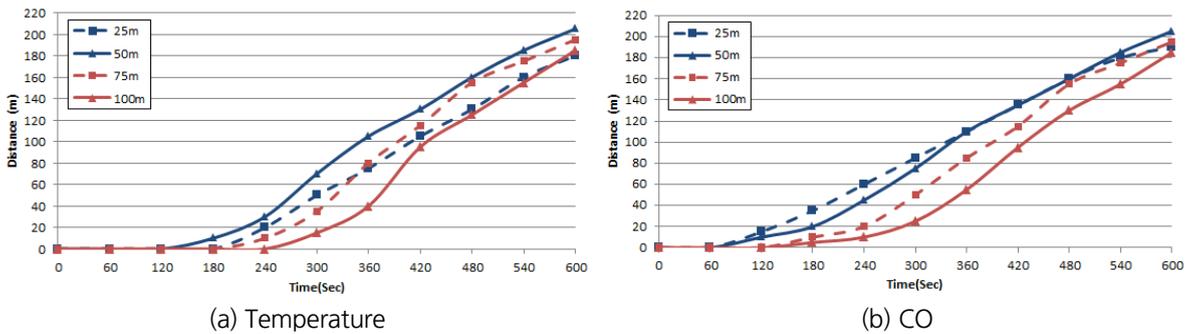


Fig. 5. Diffusion length according to installation distance (upstream)

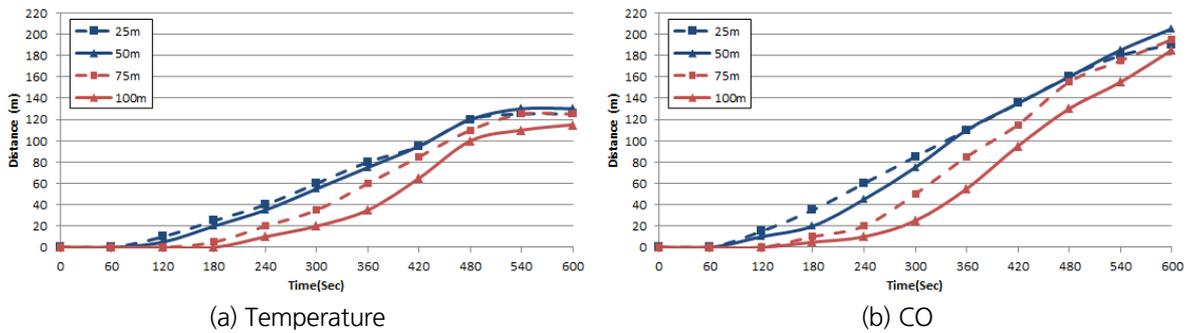


Fig. 6. Diffusion length according to installation distance (downstream)

Fig. 7과 Fig. 8에는 대배기구 설치간격이 100 m 일 때 대배기구 형상에 따른 100 ppm 이상의 CO와 60°C 이상의 공기가 확산하는 거리를 나타내었다. 3 m × 2 m 2열 형상에서 플래시오버가 발생하는 400초 이전에 온도 및 CO의 확산이 다른 형상보다 빠른 것으로 분석되었으며, 4 m × 3 m, 6 m × 2 m 형상은 큰 차이가 없는 것으로 분

석되었다. 또한 상류와 하류의 확산거리 차이는 설치간격에 따른 경우와 마찬가지로 화재차량을 중심으로 하향 구배로 방향으로의 화재연기의 확산은 구배가 낮을수록 구배가 높은 경우보다 부력의 영향을 상대적으로 작게 받아 그 확산이 용이하기 때문으로 판단된다.

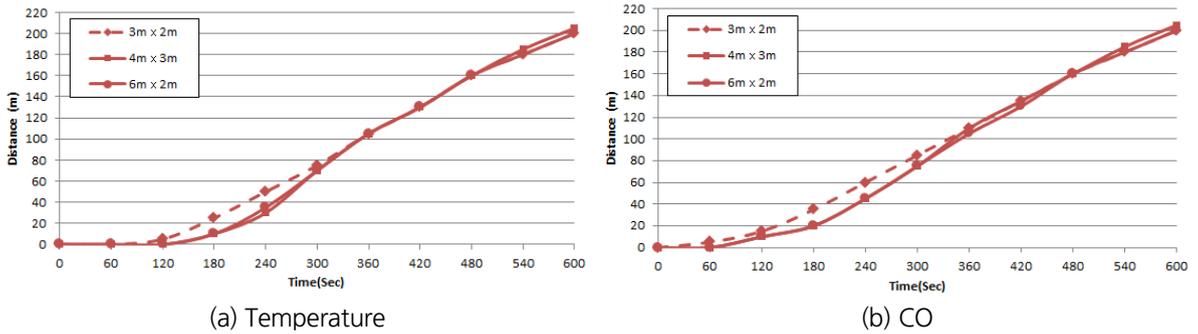


Fig. 7. Diffusion length according to installation size (upstream)

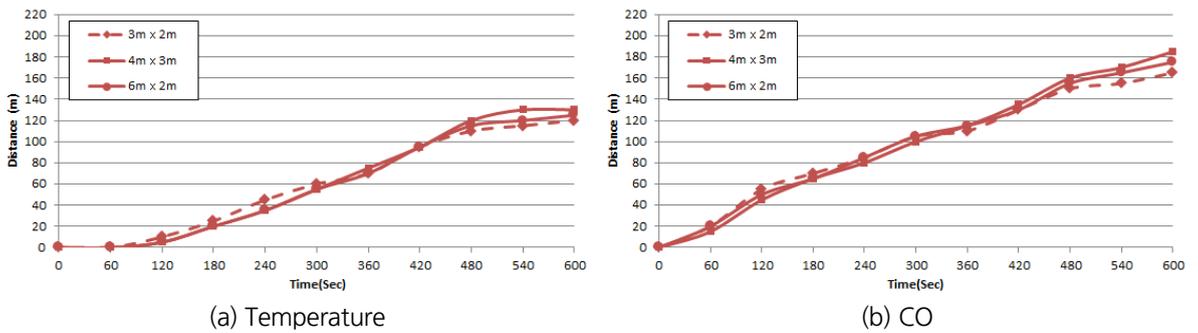


Fig. 8. Diffusion length according to installation size (downstream)

Fig. 9에는 대배기구 면적의 종횡비가 가장 크게 날 수 있는 6 m × 2 m와 2 m × 6 m에 대하여 100 ppm 이상의 CO와 60°C 이상의 공기가 확산하는 거리를 나타내었다. 각 그림에 나타난 값은 상향구배와 하향구배를 합하여 나타낸 것으로 각 화재연기가 총 확산된 거리를 의미한다. 그림에서 보는 것과 같이 두 형상 모두 100 ppm 이상의 CO와 60°C 이상의 공기는 제연구역 500 m 내에서 제연되는 것으로 분석되었다. 두 대배기구의 확산거리 차이는 해석이 완료되는 시점인 600초에서 크게 발생하지는 않으나, 화재성장과정에서는 종횡비에 따른 배연성능에 차이가 있는 것으로 분석된다. 2 m × 6 m가 6 m × 2 m보다 플래시오버 이전에는 확산거리가 더 짧은 것으로 분석된다. 따라서 종횡비에 따른 연기확산거리는 횡방향으로 긴 경우보다 종방향으로 긴 경우가 화재연기의 확산거리가 더 짧은 것으로 판단된다.

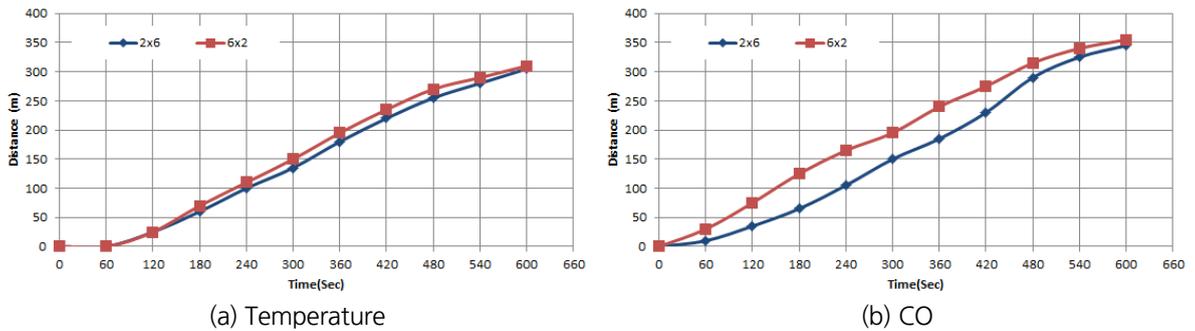


Fig. 9. Diffusion length according to aspect ratio (upstream + downstream)

4. 결론

본 연구에서는 소단면 대심도터널의 대배기구의 설치간격(25 m, 50 m, 75 m, 100 m), 형상(4 m × 3 m, 3 m × 2 m 2 lane, 6 m × 2 m)종횡비(2 m × 6 m, 6 m × 2 m)에 따른 화재연기의 확산거리를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 설치간격에 따른 연기확산거리는 큰 차이가 없는 것으로 분석되었으나, 본 연구에서는 간격이 100 m인 경우가 25 m, 50 m, 75 m 인 경우보다 효과적인 것으로 분석되었다.
2. 대배기구 형상에 따른 연기확산거리는 플래시오버 이후에는 큰 차이가 없지만 화재 성장과정에서 3 m × 2 m 인 경우 다른 경우보다 확산거리가 큰 것으로 분석되었다.
3. 대배기구 종횡비에 따른 연기확산거리는 횡방향으로 긴 경우보다 종방향으로 긴 경우가 화재연기의 확산거리가 더 짧은 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Byun, S.H., Jeong, J.H., Jun, D.C., Shin, I.J., Sim, D.H. (2011), “A case study on M & E design for double-deck tunnel in urban area”, Tunnel and Underground Space, Vol. 21, No. 4, pp. 281-286.
2. Korea Expressway Corporation (2012), The road tunnel jet fan calculation standards for smoke control improvement of final study report, South Korea, pp. 32-33.

3. Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974), "The numerical computation of turbulent flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289.
4. Ministry of Land (2015), *Guidelines for the installation and management of road tunnel emergency facilities*, South Korea, pp. 54.
5. PIARC (1999), *Fire and smoke control in road tunnels* PIARC, 05.05.BEN, 2-84060-064-1, World Road Association, pp. 63-65.
6. Yoo, J.O., Kim, H.G. (2018), "A study on the ventilation characteristics and design of transverse ventilation system for road tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 2, pp. 305-315.
7. Yoo, J.O., Kim, J.S., Rhee, L.S. (2017), "An analytical study on the fire characteristics of the small tunnel with large smoke exhaust port", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 3, pp. 375-388.
8. Yoo, J.O., Kim, J.S., Rie, D.H., Shin, H.J. (2015), "The effect of a risk factor on quantitative risk assessment in railway tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 2, pp. 117-125.