

복층터널에 적용 가능한 화재 연동형 대배기구 운영 특성 분석 연구

박진욱¹ · 유용호^{2*} · 김양균³ · 박병직⁴ · 김휘성⁵

¹비회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원

⁴비회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원

⁵비회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 주임주무원

A study on the operation characteristics of oversized exhaust port applicable to double-deck tunnel

Jinouk Park¹ · Yongho Yoo^{2*} · Yangkyun Kim³ · Byoungjik Park⁴ · Whiseong Kim⁵

¹Research Specialist, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Research Fellow, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Senior Researcher, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁴Research Specialist, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁵Assistant Technician, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding Author : Yongho Yoo, yhyoo@kict.re.kr

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(6)887-895(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.887>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 27, 2019

Revised October 17, 2019

Accepted October 19, 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

Abstract

Recently, the number of underground road development projects has been increasing to solve traffic problems in the national capital region and metropolitan areas with intensified overcrowding, and there has been a tendency to plan underground roads by applying a double-deck tunnel technology that has advantages in constructability and economical efficiency. The double-deck tunnel has a structure where one excavation section is divided into two parts and used as up and down lines, and is mainly used as a road for small vehicles only due to its low floor height. In addition, due to the small cross-sectional area, it has characteristics different from those of general road tunnels in terms of ventilation and disaster prevention. In this regard, this study proposed an operational plan that applies an oversized exhaust system, which is one of semi-transverse ventilation systems, to small cross-sectional tunnels like double-deck tunnel with low floor height, and a comparative analysis between smoke exhaust characteristics according to the fire occurrence locations and oversized exhaust systems was conducted using the Fire Dynamics Simulator (FDS). The results showed

www.kci.go.kr

that unlike uniform exhaust, intensive smoke exhaust using the oversized exhaust port maximized the delay effect of smoke diffusion and limited the smoke within 50 m above and below the fire point.

Keywords: Double deck-tunnel, Semi-transverse ventilation system, Oversized exhaust port, Local smoke control, Smoke exhaust

초 록

인구 초과밀화 현상이 심해지고 있는 국내 수도권 및 대도시에서 발생되고 있는 교통문제 해결을 위해 지하도로 개발 사업이 늘어나고 있으며, 시공성과 경제성의 이점을 가지는 복층터널 기술을 적용하여 다수의 지하도로를 계획하고 있는 추세이다. 복층터널은 하나의 굴착단면을 두 개로 나뉘 상하행선으로 사용하는 방식으로 대부분 층고가 낮아 소형차량 전용도로로 사용되고 있는 실정이다. 또한, 이러한 소단면 특성으로 인해 환기 및 방재 측면에서도 일반 도로터널과 상이한 특성을 가지게 된다. 본 연구에서는 복층터널과 같이 층고가 낮은 소단면 터널에 반횡류식 환기방식의 하나인 대배기구방식을 적용한 운영안을 제시하고 FDS 시뮬레이션을 통해 화재발생 위치와 대배기구 배연 방식 등에 따른 배연 특성을 비교하여 분석하였다. 그 결과 균일배기와 달리 대배기구를 이용하여 집중배연시 연기의 확산지연 효과가 최대화되고 연기가 화재지점 상하류 50 m안에 제한시킬 수 있었다.

주요어: 복층터널, 반횡류 환기 시설, 대배기구, 국부제연, 배연

1. 서론

현재 대한민국은 서울특별시 및 경기도 등 수도권 대도시로 생활권이 집중되면서 총 인구 중 절반 정도인 43.8%의 국민이 몰려 인구 초과밀화 현상이 심해지고 있는 실정이다(Statistics Korea, 2016). 제한적 면적에 일어나는 인구수에 의해 발생하는 여러 문제들을 해결하기 위한 방안으로 땅 밑을 개발하는 지하공간 사업이 나날이 늘어나고 있는 추세이다. 여러 문제들 중 국민들이 겪는 가장 큰 불편과 경제적 손실을 야기시키는 것은 갈수록 심화되고 있는 교통체증 문제이며, 이를 해결하기 위해 지하 대심도 지하도로 개발이 대두되고 있다.

이 논문에서 다루고자 하는 복층터널은 하나의 굴착 단면을 중간슬래브로 나뉘 상하행선을 사용할 수 있는 터널로서 일반 도로터널에 비해 시공성과 경제성에 대한 이점을 가지고 있다. 단, 복층터널은 하나의 굴착 단면을 2 개로 나뉘서 사용한다는 특이점으로 인해 일반도로터널에 비해 낮은 층고를 가져 화재 및 방재에 대해 불리한 특성을 가지게 된다. 화재 발생 시 소단면 특성으로 인해 불완전 연소가 일어나고 다량의 연기가 발생하고, 낮은 층고로 인해 연기층하강이 일반 터널에 비해 더 빨리 진행되어 피난 대책도 달라져야 한다. 또한, 일반적으로 터널 천장부에 돌출되게 설치하는 종류식 환기설비(제트팬)도 차량과의 충돌을 야기할 수 있으므로 설치가 부적합하거나 별도의 설치 방안을 강구해야한다. 대부분의 대심도 지하도로의 경우 5 km 이상의 장대터널이 대부분이므로 횡류식 환기방식이 주로 적용되며, 구간 조건에 따라 종류식과 횡류식이 같이 사용되는 조합환기 방식이 사용되기도 한다.

터널 환기에 대한 연구는 국내에서 수행되어 왔으며, 그 중 대배기구와 같은 횡류식 환기방식은 2000년대부터 활발히 연구되기 시작되었다. Rie et al. (2006)와 Yoo et al. (2006) 등은 균일배기 반횡류 환기방식과 대배기구방식을 적용한 수치해석을 통해 배연풍량 산정 및 연기이동 특성을 검토하였고, Kim and Yoo (2008)에 의해 양방향 통행 도로터널에서의 풍속 및 배기구, 배기방식 등에 따른 배연특성을 파악한 바 있다. 또한, Yoo et al. (2013)은 화재성장곡선을 적용한 시뮬레이션을 통해 다양한 제원에 대한 터널 환기 특성을 해석하고 이를 통해 화재연기의 전파 특성 및 벽면 열전달계수에 대해 고찰하였다. 그리고 Ryu et al. (2016)과 Jo et al. (2016)는 횡류식 환기 시설 급배기구 개도율 개선 프로그램을 개발하고, 개도율 조정에 따른 환기성능 개선에 대하여 검토하였다. 근래에 들어서는 층고가 낮은 소단면 형상의 터널 환기 및 화재 특성에 대한 연구가 진행 중에 있는데, 우선 Ryu et al. (2017)에 의해 단면적 감소에 따른 화재 특성 분석 연구가 수행되었으며, Ryu and Kim (2018)와 Choi et al. (2019)는 소단면 터널에서의 횡류환기 방식과 반횡류 방식에 대해 소요환기량과 환기시스템 용량의 관계, 대배기구 설치간격과 형태에 따른 화재 특성 등을 비교 분석하였다.

본 연구에서는 복층터널에 적용 가능한 화재연동형 대배기구 시스템의 운영안을 제시하고 FDS화재해석 결과를 통해 터널 내 화재 발생 시 대배기구를 이용한 집중배연 특성을 분석하였다.

2. 복층터널 내 화재 발생 시 대배기구 운영 계획

국토교통부에서 규정하는 「Road tunnel disaster prevention facility installation & management guideline (Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2016)」을 참고하면, 차량 화재 발생 시의 제연에 대한 요구사항은 화재단계에 따라 두 단계로 구분한다. 제 1단계는 화재 발생 초기(약 10~15분)로 대피 환경의 확보를 목표로 하는 단계로 제연설비를 수동조작하여 대피자가 존재하지 않는 방향으로 연기를 이동시켜야 한다. 제 2단계는 화재진압을 지원하는 단계로 소방대와의 긴밀한 협조를 통해 제연설비를 제어하게 된다. 또한, Table 1과 같이 차종에 따라 설계화재강도를 정하고 있으며, 화물차나 탱크로리의 경우 설계화재강도 30~100 MW, 연기발생량 80~200 m³/s까지 나타나고 있다. 본 지침에서는 터널 안전 설계를 위한 설계화재강도를 20 MW 이상, 연기발생량 80 m³/s로 할 것을 권장하고 있으나 위험물 수송차량의 통과대수가 많은 경우 증가 시킬 수 있다. 복층터널의 경우 대부분이 소형차 전용도로로서 통행허용차량인 승용차, 소형버스, 소형화물트럭 등을 화재발생 차종으로 고려되고 있으며, 권장 설계화재강도 15 MW와 연기발생량 60 m³/s로 「Urban small car tunnel disaster prevention facility installation & management guideline (Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2019)」에서 정하고 있다.

Table 1. Fire intensity (heat release rate) and smoke production rate (Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2016)

Classification	Passenger car	Bus	Truck	Tank lorry
Fire intensity (Heat release rate, MW)	5 or less	20	30	100
Smoke production rate (m ³ /s)	20	60~80	80	200

대배기구의 배연 풍량(Q_E)은 연기발생량과 배기구 주변공기의 유입 및 종방향 기류제어를 위한 부가풍량을 고려하여 식 (1)로 산정할 수 있다.

$$Q_E = Q_s + A_r V_r \quad (1)$$

여기서, Q_s 는 연기발생량($80 \text{ m}^3/\text{s}$, 설계화재강도 20 MW 기준), A_r 은 터널단면적, V_r 은 종방향 기류 제어를 위한 풍속이다.

A_r , V_r 은 주변공기의 유입 및 종방향 기류제어를 위한 부가풍량이다. 배연풍량은 화재 시 종방향 풍속과 배기구 형상, 터널제원 등에 영향을 받아 변하는 부가풍량에 의해 결정되며, 부가풍량 산정을 위하여 필요한 V_r 은 모형실험이나 시뮬레이션을 통해서 산정한다. 또한, 부가풍량 결정시 확산거리는 화재발생 지점으로부터 상/하류 방향으로 각각 250 m 이하로 제한하며(피난연락갱이 250 m 간격으로 배치), 연기확산거리는 예상 대피 시간의 2 배의 시간이 경과한 시점에서 천정부를 타고 이동한 CO가스 선단의 농도가 100 ppm이 되는 지점의 거리를 확인하여 적용하였다. 대배기구는 50~100 m 간격으로 설치하되 개별적 개폐가 가능해야하며, 댐퍼는 충분한 밀폐성을 확보해야 한다.

평시에는 균일한 환기 풍량 확보를 위해 대배기구의 위치별로 개도율을 조절하여 운영되다가 화재가 발생되어 터널내부의 온도가 상승하여 정온에 이르면 화재로부터 가장 인접한 두 지점의 대배기구가 자동으로 열려 집중 배연을 시작하게 된다. 이 때, 온도와 연동은 온도센서나 용융형 휴즈를 이용한다. 온도센서가 부착된 모터형 작동타입의 대배기구는 제어방식이 복잡하고 비용이 고가인 단점이 있지만 정밀제어가 가능하다. 반면, 용융형 휴즈에 의해 고정되어 있다가 화재 온도에 의해 휴즈가 떨어지고 용수철의 힘으로 동작하는 용융형 휴즈방식은 정밀제어는 어려우나 운영이 복잡하지 않고 화재에 대한 반응속도가 빠르며 저가인 장점이 있다. 각각의 장단점을 고려하여 터널의 여건에 따라 피난 계획과 연동한 적절한 제연 계획 수립이 필요하다.

3. 복층터널 내 화재연동형 대배기구 배연 특성 해석조건

3.1 해석모델 터널

본 연구에서는 수치해석을 통해 복층터널과 같은 낮은 층고의 소단면 터널에 적용 가능한 화재연동형 대배기구 설비의 배연 조건에 따른 성능 특성을 파악하고 최적 운영안을 도출하고자 하였다. 이를 위해 Fig. 1(a)와 같이 복층터널 표준단면을 참고하여 Fig. 1(b)와 같은 해석모델의 격자를 구현하였다. 모델터널의 총연장은 700 m로 각 터널의 횡단면상의 격자크기는 0.5~1.0 m로 하였으며, 종방향 격자는 화원부 주변 100 m 구간을 0.5 m, 그 외의 구간을 2.0 m로 하였다. 제연방식은 대배기구 방식에 의한 집중배연방식을 적용하였으며, 배기구 크기와 설치 간격은 3 m (W) × 4 m (L), 100 m 간격으로 하였다. 이 외 배연 풍량 등의 여러 조건을 Table 2에 나타내었다.

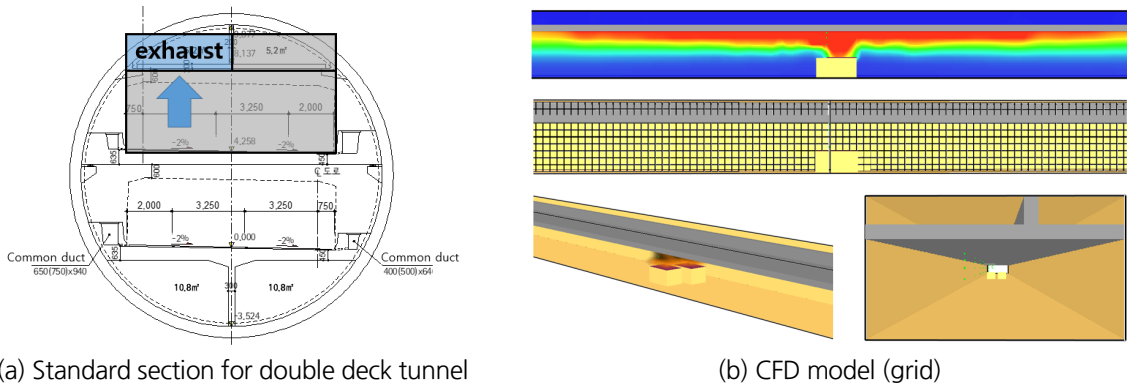


Fig. 1. Geometry of CFD model

Table 2. CFD analysis condition for double deck tunnel fire

Case	Fire source point	Exhaust port operation mode	HRR (MW)	Flow rate (m ³ /s) A _r = 31.5 m ² , Q _s = 80 m ³ /s
#1	Tunnel center	All exhaust port open	10	158.75 at V _r = 2.5 m/s
#2	Tunnel center	Exhaust port 3, 4 open	10	158.75 at V _r = 2.5 m/s
#3	Under exhaust port 3	Exhaust port3 open at 30 sec and exhaust port 2, 4 open at 600 sec	10	127.25 at V _r = 1.5 m/s

3.2 경계조건

수치해석은 FDS v6.3.2로 수행하였으며 해석모델의 경계조건은 다음과 같다. 터널 출입구는 대기압 조건으로 하였으며, 배연은 X = 0 m, 700 m 지점의 덕트말단에서 배기하는 것으로 하였고, 화재강도별 연기발생량 및 부가 풍량 기준에 따른 풍량을 Table 2에 나타냈다. 이 해석에서는 양쪽의 덕트 말단을 모두 배기하는 것으로 설정하였으며, 풍속은 Table 2의 배연풍량을 덕트단면적으로 나눠 산정하였다.

Fig. 2와 같이 대배기구는 터널 전단에서부터 말단까지 100 m 간격으로 설치하였으며, 화재는 실험 조건에 따라 두 개의 대배기구 사이나 특정 대배기구 바로 하단에 설치하였다. 승용차 두 대가 연소하는 화재를 모사하였으며, 차량의 크기는 3 (L) × 2 (W) × 1.5 (H)이고, 편도 2차선중 1, 2차선 각각 한대씩 위치하도록 배치하였다. 또한,

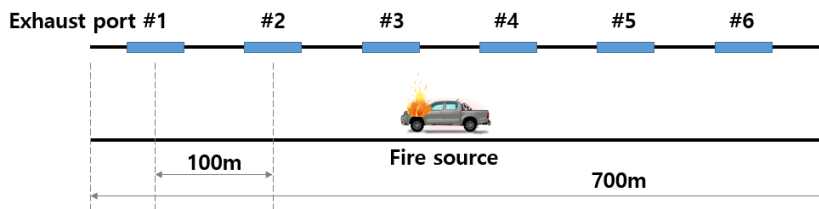


Fig. 2. Outline of analysis model

화원은 두 대의 차량 상단면에서 발생되도록 하였다. 대배기구의 간격 및 형상은 Choi et al. (2019) 등에 의해 선행된 소단면 대심도 터널 화재 시 대배기구의 설치형태에 따른 화재특성 연구 결과를 참조하였다.

4. 결과 및 고찰

복층터널 내 화재 발생 시 효율적으로 대응하기 위한 방안으로 화재연동형 대배기구를 통한 집중배연이 필요하다. 2장에 전술한 바와 같이 터널 내에서 화재가 발생되면 화재연동형 대배기구에 설치되어 있는 온도센서에 화재가 감지된 후 제어시스템에 의해 구동모터가 구동되어 배기구가 열리거나 고정되어 있던 용융 타입의 휴즈가 녹아 떨어지며 배기구가 완전히 열려 배연하게 된다. 온도센서(전동모터 장착)타입의 대배기구의 경우, 거리에 따라 개도를 조절이 되어 부분적으로 열려있던 타 배기구는 닫고 화재에 가장 인접한 대배기구 두 기만 완전히 열어 집중배연한다. 이러한 형식의 대배기구 운영 방식의 효과를 검토하기 위해 승용차 2대가 추돌하여 발생된 터널화재를 모사하고, 대배기구를 이용한 집중배연 방식과 균일 배기 방식의 배연 효율을 비교 분석 하였다.

연기의 확산거리에 대한 비교를 위해 소형차 전용터널의 승용차 단독화재(화재강도 5 MW)와 승용차 두 대의 연속화재(10 MW)일 경우에 대해 해석한 결과를 이용하여 Fig. 3과 같이 연기 전파 속도를 산정하였다. 속도는 터널의 천정부를 타고 이동한 연기 선단의 CO농도(100 ppm)를 이용하여 산출하였으며, 그 결과로부터 화재강도가 10 MW일 경우 연기 전파 속도는 화원과의 거리에 따라 0.73~0.3 m/s로 나타난다. 이는 터널 배연설비로 연기를 제한해야하는 상하류 연기 확산거리인 250 m 지점까지 약 8분정도면 도달하는 수준이다. 이 결과와 더불어 Yoo et al. (2005)가 발표한 장대 교통터널의 피난연락경 설치 간격에 관한 연구를 참고하여 연기 확산거리 검토 시 고려해야하는 예상 대피시간을 5분으로 정하고, 연기 확산거리에 대해 10분이 경과한 시점에서 CO가스농도 (100 ppm)가 상하류 방향으로 250 m 이하로 제한되는지 검토하였다.

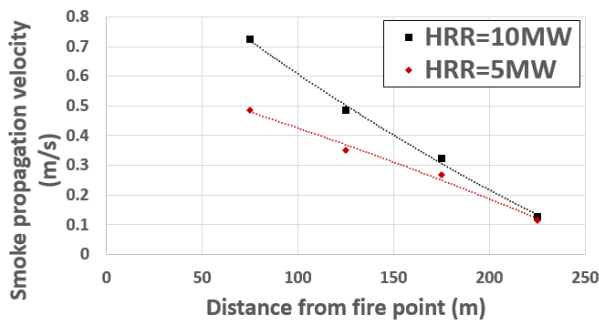


Fig. 3. Smoke propagation velocity for heat release rate

Fig. 4는 터널 전구간에 설치된 대배기구를 모두 열어 균일배기 형태로 배연하였을때(Case#1)와 화재지점에 인접한 두개의 대배기구만 열어 집중배연했을 때(Case#2)의 연기 확산 거리를 비교하였다. Case #1은 화원이 위

치한 터널 중앙부($x = 350$)에서 상당한 수위의 CO량이 발생되어 화재지점으로부터 첫번째 대배기구가 위치한 지점($x = 300, 400$)에서 1,000 ppm 이하로 급격하게 감소했다가 화원으로부터 250 m가 되는 지점($x = 100, 600$)에서는 460~550 ppm 수준(5분내에 FED = 0.1에 도달하는 수준)으로 된다. 반면에 Case #2는 화원이 위치한 지점에서 Case #1과 비슷한 수준의 CO량이 발생되다가 대배기구가 위치한 지점($x = 300, 400$)부터 집중배연되어 전량 외부로 배연되는 것을 확인할 수 있다.

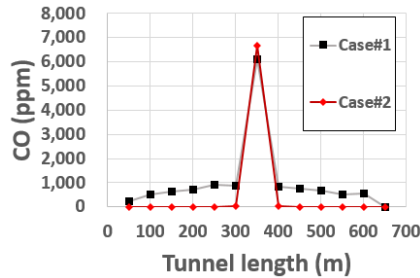


Fig. 4. Comparison of smoke propagation distance (oversized exhaust VS balanced exhaust) at $t = 1,200$ sec

Case #3은 화원위치를 대배기구 3번 하단에 위치시켜 시뮬레이션을 수행했다. 시나리오는 화재발생 30초 후 화원상단의 대배기구 3번이 완전히 열려 배연을 시작하다가 600초가 경과되면 대배기구 2, 4번이 추가적으로 열려 배연을 동시에 하게 되며, 해석은 1,200초까지 수행하였다. 시간에 따른 연기의 확산거리를 나타낸 Fig. 5의 그래프를 보면 대배기구 3번에서 단독으로 배연을 수행하는 600초까지는 화원 상하류 50 m 수준으로 화재 연기를 제한하고 있으나, 600초 이 후부터 대배기구 2, 4번이 같이 배연하게 되면서 연기 확산거리는 상하류 100 m로 늘어난다. 이 결과는 시간에 따른 연기, 온도, CO 등의 확산 상태를 등고선으로 나타낸 Fig. 6에서 동일하게 나타나고 있다. 따라서, Case#3과 같이 배기구 하단에서의 화재 시에는 바로 인접한 대배기구 단독 배연이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

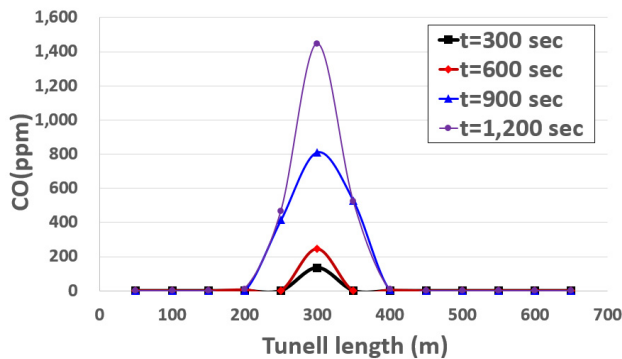


Fig. 5. Comparison of smoke propagation distance with time

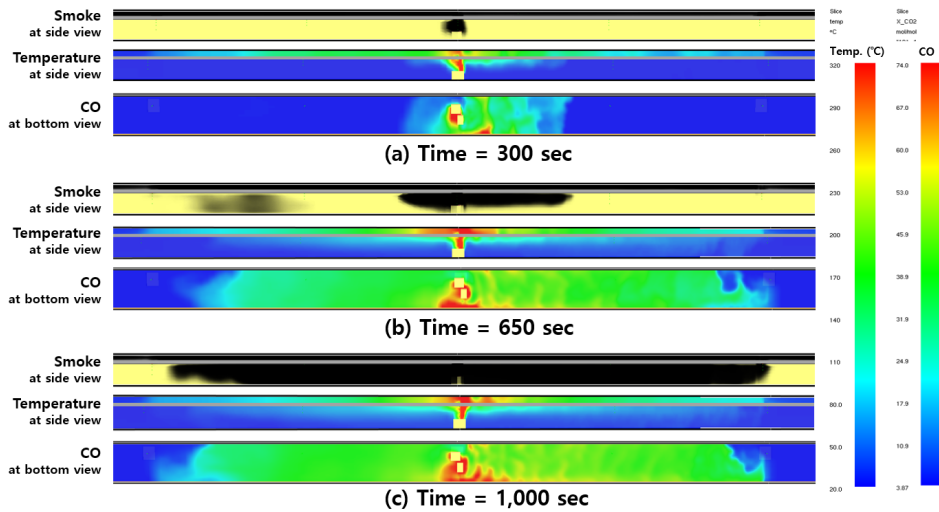


Fig. 6. Comparison smoke, Temperature, CO propagation distance with time

5. 결론

본 연구에서는 복층터널에 적용 가능한 화재연동형 대배기구 시스템의 운영안을 제시하고, FDS화재시물레이션 을 통해 터널 내 화재 발생 시 대배기구를 이용한 집중배연 특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 복층터널 내 화재 발생 시 대배기구의 운영은 초기에는 인접한 지점에 근접한 곳만 개방하여 집중 배연을 실시 하고 화재 및 연기의 확산정도에 따라 나머지 대배기구를 시차에 따라 개방하여 배연하며, 터널의 여건에 따라 피난 계획과 연동하여 적절한 제연 계획을 수립 한다.
2. 복층터널과 같은 소단면 터널에서 대배기구를 이용한 집중배연 효과 검증을 위해 균일배기와 국부 집중 배기 한 경우에 대해 연기 확산거리를 비교 분석하였다. 그 결과 국부적으로 집중 배연한 경우에서 연기확산거리 50 m가 발생되어 균일배기 방식에 비해 현저히 효과적인 것으로 나타났다.
3. 또한, 화원이 위치한 곳에서 인접한 두 개의 대배기구 중 한쪽으로 현저히 붙어 있을 경우 가장 근거리의 대배 기구 한 곳에서 단독 배연 하는 것이 다른 방향에 위치한 배기구와 동시에 배연할 때보다 더 효과적인 것으로 나타났다. 이 결과로부터 추가 연구를 통해 대배기구 사이 화원 위치에 따른 길이비에 대한 최적 배연 운영안 이 정립되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Choi, P.G., Baek, D.S., Yoo, J.O., Kim, C.Y. (2019), "A study on the fire characteristics according to the installation type of large smoke exhaust port in a small cross sectional tunnel fire", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 201-210.
2. Jo, H.J., Chun, K.M., Min, D.K., Kim, J.W., Beak, J.H. (2016), "A fundamental study for optimizing the supply and exhaust port opening ratio in road tunnels with transverse ventilation system", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 53, No. 2, pp. 140-148.
3. Kim, J.Y., Yoo, J.O. (2008), "A numerical study on characteristics of smoke exhaust in road tunnel fires for different ventilation system", *Fire Science and Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 201-207.
4. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2016), *Road tunnel disaster prevention facility installation & management guideline*, pp. 32-39.
5. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2019), *Urban small car tunnel disaster prevention facility installation & management guideline*, pp. 12-13.
6. Rie, D.H., Yoo, J.O., Shin, H.J. (2006), "A study on the effective smoke exhaust amount of load-tunnel with semi-transverse ventilation - balanced exhaust case -", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 21, No. 2, pp. 46-51.
7. Ryu, 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.
8. Ryu, J.O., Kim, J.S., Rhee, K.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.
9. Ryu, J.O., Kim, J.S., Rie, D.H. (2016), "Numerical study on the supply and exhaust port size and fire management method in the semi-transverse ventilation system for road tunnel", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 68-74.
10. Statistics Korea (2016), *Population and Population Density by Gender and Age*.
11. Yoo, J.O., Oh, B.C., Kim, H.G. (2013), "A numerical study on the characteristics of the smoke movement and the effects of structure in road tunnel fire", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 289-300.
12. Yoo, J.O., Yoon, S.W., Rie, D.H. (2006), "A study of smoke exhaust rate for the transverse ventilation with oversized exhaust ports in road tunnel", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 21, No. 4, pp. 7-12.
13. Yoo, Y.H., Yoon, C.H., Yoon, S.W., Kim, J. (2005), "Experimental study on the interval of emergency exits in long traffic tunnels", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 15, No. 1, pp. 61-70.