

대심도 복층터널 교차로 화재연기 확산 지연 방안 연구

신태균^{1*} · 문정주² · 양용원³ · 이윤택⁴ · 한재희⁵

¹정회원, 유원컨설팅(주) 대표이사

²비회원, 유원컨설팅(주) 이사

³비회원, 유원컨설팅(주) 부장

⁴비회원, 유원컨설팅(주) 과장

⁵비회원, 유원컨설팅(주) 사원

A study on the fire smoke diffusion delay strategy in a great depth underground double deck tunnel junction

Tae-Gyun Shin^{1*} · Jung-Joo Moon² · Yong-Won Yang³ · Yun-Taek Lee⁴ · Jae-Hee Han⁵

¹CEO, YOUONE Consultant

²Director, YOUONE Consultant

³General Manager, YOUONE Consultant

⁴Manager, YOUONE Consultant

⁵Officer, YOUONE Consultant

*Corresponding Author : Tae-Gyun Shin, airmaker@youcon.co.kr

Abstract

Recently, in order to solve the traffic congestion in urban areas and to improve the peripheral environment, research on the design and construction technology development of great depth underground double-deck tunnel is under way by using the underground space in the urban area. The network type double-deck tunnel is in the form of an intersection with a small cross section and a steep slope as per construction at the base of a flatland, so that the fire smoke spreads rapidly in case of fire, which is expected to cause damage of human life. Therefore, this study is analyzed the delay effect of fire smoke diffusion according to the installation and non - installation of delay system for fire smoke diffusion at the intersection. Fire fumes were delayed up to 270 seconds when the delay system for fire smoke diffusion was installed at the intersection and it is analyzed that the greater the operating area of the delay system for fire smoke diffusion, the more preventable the damage of human life of the intersection.

Keywords: Great depth underground double-deck tunnel, Delay system for fire smoke diffusion, Smoke, Fire, Junction

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(1)115-126(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.115>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 26, 2018

Revised December 4, 2018

Accepted December 7, 2018



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

초 록

최근 도심지 차량 정체 해소와 주변환경을 개선하기 위하여 도심지 지하공간을 활용하는 대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발 연구가 진행되고 있으며, 네트워크형 복층터널은 단면이 작고, 평지 하부에 시공됨에 따라 입·출구의 경사가 가파른 특징이 있는 교차로 형태를 가지며 화재발생시 화재연기가 매우 빠르게 전파되어 인명피해 발생이 우려된다. 따라서 본 연구에서는 교차로에 화재연기 확산지연장치를 설치한 경우와 미설치된 경우에 대하여 화재연기 확산지연효과를 분석하였다. 화재연기 확산지연장치를 교차로에 설치하였을 시 화재발생 후 270초까지 화재연기가 지연되었으며, 화재연기 확산지연장치의 차단면적이 커질수록 인명피해 예방에 도움이 될 것으로 분석되었다.

주요어: 대심도 복층터널, 화재연기 확산지연설비, 연기, 화재, 교차로

1. 서론

최근 도심지 차량 정체 해소와 주변환경개선을 위하여 도심지 지하공간(대심도)을 활용하는 방안으로 도로 및 철도 등의 교통시설을 건설하는 등 여러 계획이 활발히 진행되는 추세이다. 현재 서울지역의 경우 서부간선도로, 동부간선도로, 경부간선도로, 제물포길, 국회대로, 경의선 및 공항철도를 지하화하는 사업을 진행 중이다. 또한 서울과 경기도 지역에서는 수도권 교통문제 해결을 위해 수도권 대심도 광역급행철도(Great Train Express, GTX) 사업을 진행 중이며, 인천지역의 경우 경인고속도로 지하화 계획을 수립하였고, 부산지역의 경우에도 만덕-센텀 도시고속화도로 중 약 9 km 가량을 지하화하는 계획을 수립하였으며 착공을 앞두고 있다. 이렇듯 현재 다수의 도심지에서 도시공간의 효율적인 이용과 개발, 환경개선을 위해 지하공간을 적극 활용하는 방안이 상당수 계획되었으며 진행 중에 있다(Choi et al., 2016).

아울러 수년 전부터 한국건설기술연구원에서는 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발’ 연구를 진행 중이며, 특히 이 연구에서 추진 중인 네트워크형 복층터널은 지하공간에서 교차터널로의 진, 출입이 가능하도록 하는 교차로(Junction)를 갖춘 형태의 구조가 발생되며 이는 해외에서도 그 사례가 없는 최초의 시도라고 할 수 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012).

네트워크형 복층터널 내부 교차로 부근에서 화재가 발생하였을 경우에는 화재 연기가 교차터널로 전파될 수 있으며 이런 경우 이용객의 대피 시 안전상 심각한 영향을 초래할 수 있을 것으로 판단되므로, 화재 연기에 의한 사고가 발생하지 않도록 터널 내 기준에 의한 설비 외 보완할 수 있는 방재시설물 개발이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다(Kim and Lee, 2004).

이에 따라, 복층터널에 설치 가능한 화재연기 확산지연장치 개발을 위해 선행 연구되었던 ‘대심도 복층터널 화재 시 연기확산 방지연구’(Yang et al., 2016)에서 3차원 CFD 해석을 통하여 화재연기 확산지연장치 작동 시 본선 차단 면적에 따른 연기 확산 지연 효과를 분석하였고, ‘대심도 복층터널 화재연기 확산지연장치 연구개발’(Yang et al., 2017)에서는 스프링 탄성을 이용한 화재연기 확산지연장치, 자중 이용 다단 낙하형, 롤스크린형, 전기 동력

을 이용한 화재연기 확산지연장치에 대하여 각각의 특성을 분석하였다. 각각의 특성을 분석한 결과 대심도 복층 터널에 적용성이 뛰어나며 경제적으로 상품가치가 높고 유지관리가 우수한 스프링 탄성을 이용한 화재연기 확산지연장치를 선정, 개발하여 시제품을 제작하였고,

‘대심도 복층터널에 설치 가능한 화재연기 확산지연장치 성능 평가 연구’(Shin et al., 2018)에서는 시제품을 실제 모형(복층터널 본선)에 설치하여 실물 실험을 통해 연기 화재연기 확산지연장치의 연기 확산 지연 효과를 검증하였으며, 후속 연구인 본 연구에서는 선행 연구된 결과를 바탕으로 화재연기 확산지연장치를 네트워크형 복층터널에서 타 터널로의 진, 출입이 가능한 교차로(Junction)에 설치하였을 시 화재연기 확산지연 효과를 3차원 전산수치해석(CFD)을 이용하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 수치 해석

본 연구의 대심도 복층터널은 네트워크 형식의 소형차 전용 터널로서 본선터널 화재발생 시 화재연기가 교차로로 전파되면 단면이 작고, 경사가 가파른 교차로 특성상 화재연기가 빠르게 대피자에게 전파되는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 수치해석 조건은 교차로에 화재연기 확산지연장치를 설치한 경우와 미설치된 경우에 대해서 두 가지 조건으로 해석하였다.

화재연기 확산지연장치 설치 시 연기확산 지연효과를 분석하기 위하여 교차터널 단면의 50%가 차단되도록 화재연기 확산지연장치를 설치한 경우와 교차터널에 화재연기 확산지연장치가 미설치된 경우에 대하여 2가지 Case로 수치해석을 진행하여 화재연기 확산지연장치 설치 유·무에 따른 화재연기확산 시간을 분석하였다(Fig. 1, Table 1).

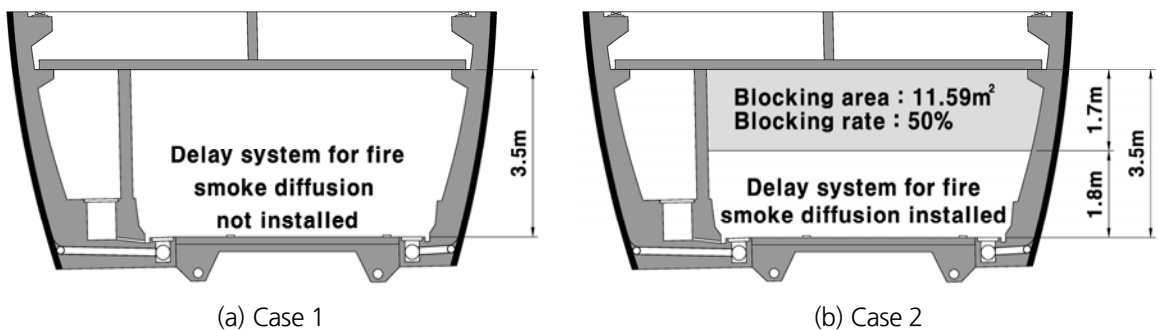


Fig. 1. Scenarios for the analysis

Table 1. Scenarios for the analysis

Classification	Blocking rate (%)
Case 1	0 m ² (0)
Case 2	11.59 m ² (50)

수치해석에 적용된 복층터널 제원은 소형차전용 대심도 복층터널의 표준단면을 적용하였으며 본선터널의 단면 형상은 Fig. 2, 교차로의 단면 형상은 Fig. 3을 적용하였다. 수치해석에 적용된 본선터널 하층 및 교차터널 하층 중 본선터널은 내공단면적 37.32 m², 둘레길이 29.05 m, 급·배기 덕트 면적 각 5.00 m², 터널 시설한계선 높이는 3.00 m로 형성되어 있다(Table 2). 교차터널은 내공단면적 23.18 m², 둘레길이 20.71 m, 급·배기 덕트 면적 각 4.00 m², 터널 시설한계선 높이는 3.00 m로 형성되어 있으며, 경사는 본선터널 0.50%, 교차터널 6.00%를 적용하였다(Table 3).

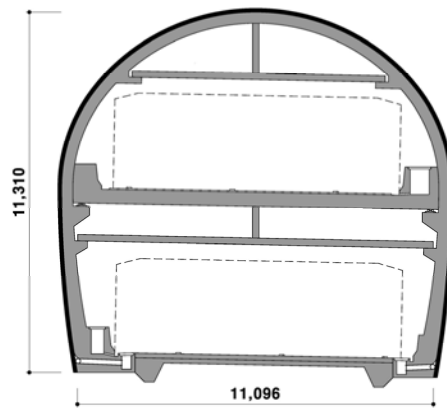
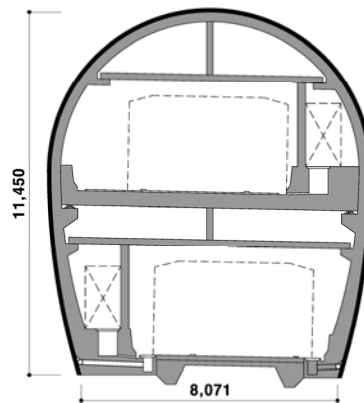
**Fig. 2.** Tunnel cross section**Fig. 3.** Junction cross section

Table 2. Tunnel specification

Terms	The upper	The bottom
Sectional area (m ²)	35.75	37.32
Perimeter (m)	28.05	29.05
Facility limit line (m)	3	3
Duct area (m ²)	4	5
Slope (%)	0.50	

Table 3. Junction specification

Terms	The upper	The bottom
Sectional area (m ²)	24.58	23.18
Perimeter (m)	21.12	20.71
Facility limit line (m)	3	3
Duct area (m ²)	4	4
Slope (%)	6	

본 연구에서 적용된 화재강도는 국토교통부의 도로설계편람(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011)과 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)에서 규정하는 버스 1대가 전소할 때 발생하는 화재강도인 20 MW를 적용하였다(Table 4).

Table 4. Design fire strength and smoke generation

Classification	Passenger car	Bus	Truck	Tank lorry
Heat release rate (MW)	5	20	30	100
Smoke flow rate (m ³ /s)	20	60~80	80	200

CO발생량을 결정짓는 요소인 화원은 국토교통부의 도로설계편람(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011) 차종별 차량제원의 승용차 차체규격 Table 5를 기준으로 승용차 양 옆에 너비 1 m의 크기로 Fig. 4와 같이 모델링 하였다.

Table 5. Car body standard

Classification	Length (m)	Width (m)	Height (m)
Passenger car	4.34	1.68	1.44

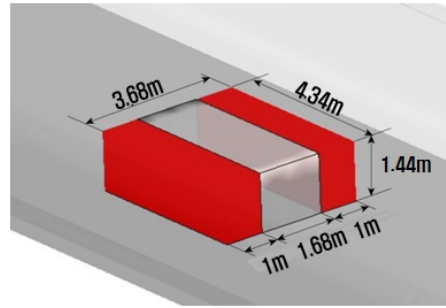


Fig. 4. Modeling of fire

해석을 위한 터널 모델링은 각각 본선터널, 교차터널 단면 중, 본선터널은 하층을 1.5 km 연장, 0.5%경사로 모델링 하였고, 교차터널은 본선 입구부에서 1 km 이격된 지점에서 본선과 연결하고 500 m 연장, 6%경사로 모델링 하였다. 화재지점은 교차터널 분기부에서 50 m 이격된 본선 터널에 배치하였다. 배기덤퍼는 화원을 기준으로 500 m 구간에 50 m 간격으로 배치하였고 사이즈는 2 m × 2 m로 모델링 하였다. 화재연기 확산지연장치는 교차터널에 설치하고 교차터널 분기부에서 50 m 이격된 지점에 설치하여 모델링 하였다(Fig. 5). 또한 해석시 화재초기 배연가동이 없는 경우의 연기확산 지연효과를 분석하기 위해 배연가동은 배제 하였다.

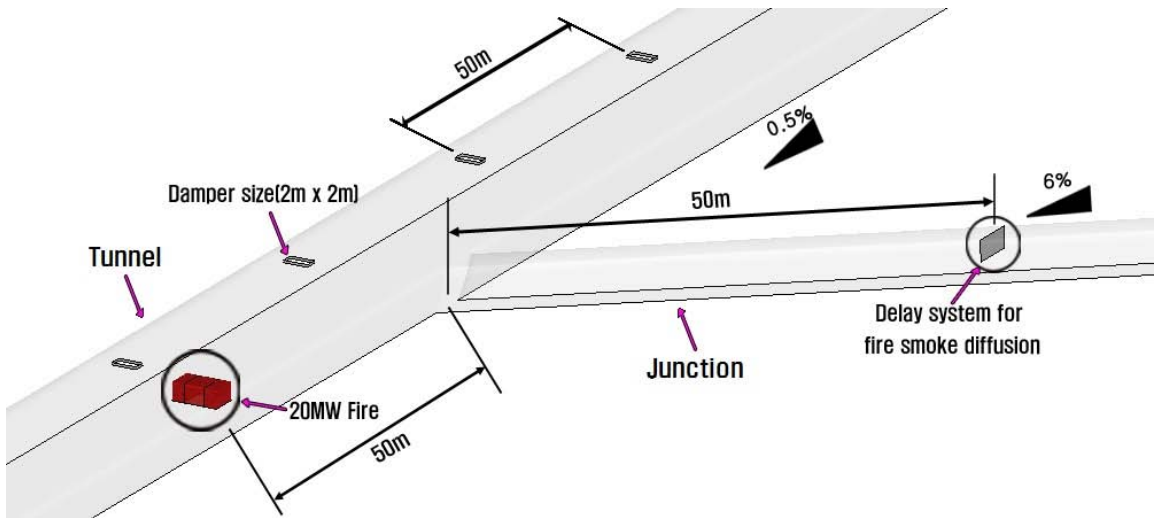


Fig. 5. View of modeling

2.2 수치 해석 방법 및 경계조건

수치해석은 상용프로그램인 Ansys사의 Fluent를 이용하여 3차원 수치해석을 진행하였다. Fluent는 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램으로 난류유동, 비정상상태 해석, 열전달 해석, 화학 반응 유동, 다상 유동 등 다양한 유동 현상의 3차원 해석이 가능하다. 연산상태는 화재발생 경과시간에 따른 연기 확산 저감효과를 교차로 화재연기확산 지연장치 설치 유·무에 따라 분석하기 위해 비정상상태 (Unsteady state condition)에서 수행하였으며, 난류모델은 k-ε 난류모델을 사용하였다(Table 6).

Table 6. Input conditions

Classification	Application model
Flow pattern	Unsteady state condition
State of flux	Incompressible ideal gas
Turbulence models	k-ε Standard model

20 MW 화재의 성장은 2차 함수에 의하여 적용하였고 자세한 사항은 Table 7 및 Fig. 6 (Yoo et al., 2013)에 표시하였다. CO발생량은 최대 0.1025 kg/s를 적용하였고 시간에 따른 발생량은 Fig. 7에 나타내었으며 터널 입·출구부 경계조건은 압력경계조건(Pressure outlet condition)으로 적용하여, 해석시간은 30초 간격으로 600초까지 해석하였다.

Table 7. Fire growth rate

Release rate (MW)	20
Fire load (GJ)	41
Growth rate (α)	0.10
Damping ratio (β)	0.002
Growth time (sec)	450
Holding time (sec)	1,402

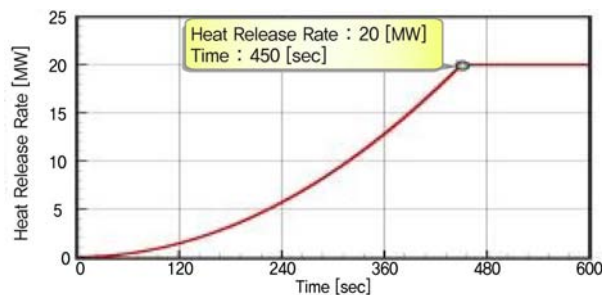


Fig. 6. Fire growth curve

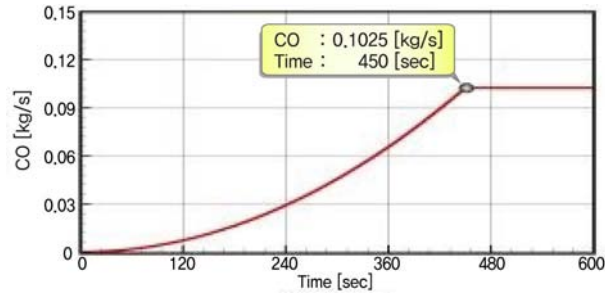


Fig. 7. Carbon monoxide growth curve

2.3 해석결과

교차터널 화재연기 확산지연장치 설치 유·무에 따른 연기확산 저감효과 분석은 국토교통부 도로설계편람 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011)의 연기역류현상 분석 시 적용되는 CO농도 100 ppm을 기준으로 교차터널에 설치되어있는 화재연기 확산지연 장치 구간을 벗어나는 시간을 분석하였다. 그 결과는 Fig. 8, 9와 같다.

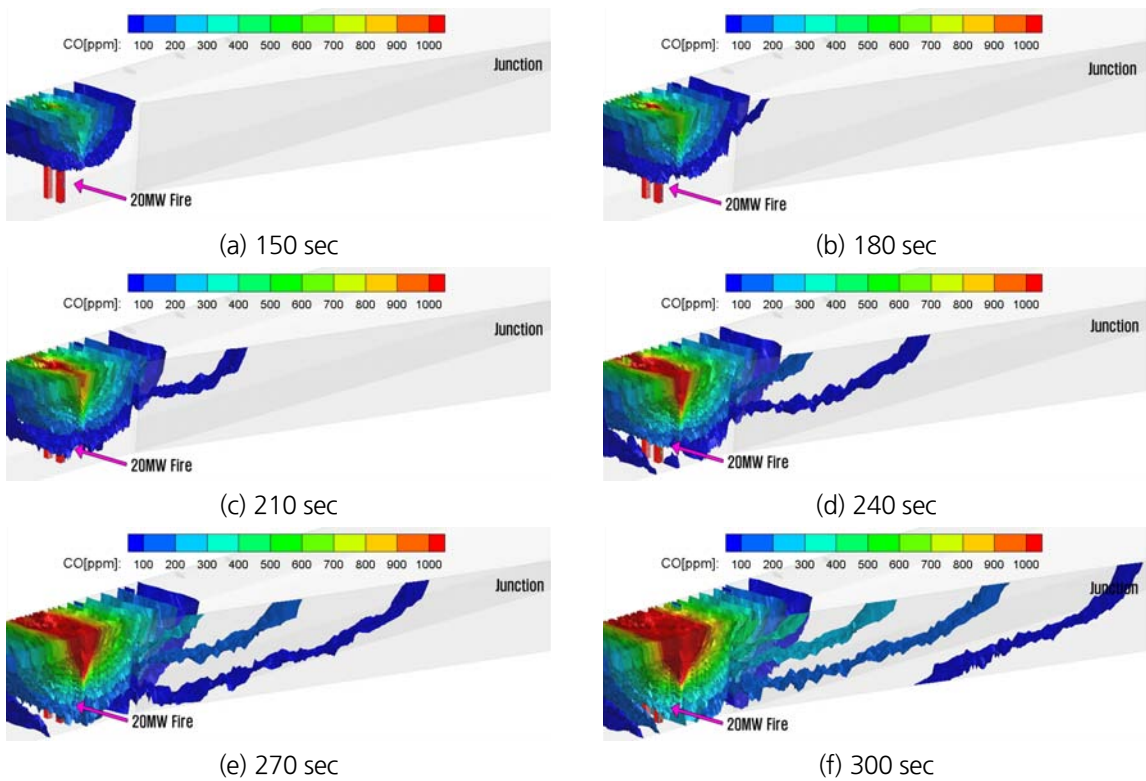


Fig. 8. Blocking rate 0% - CO

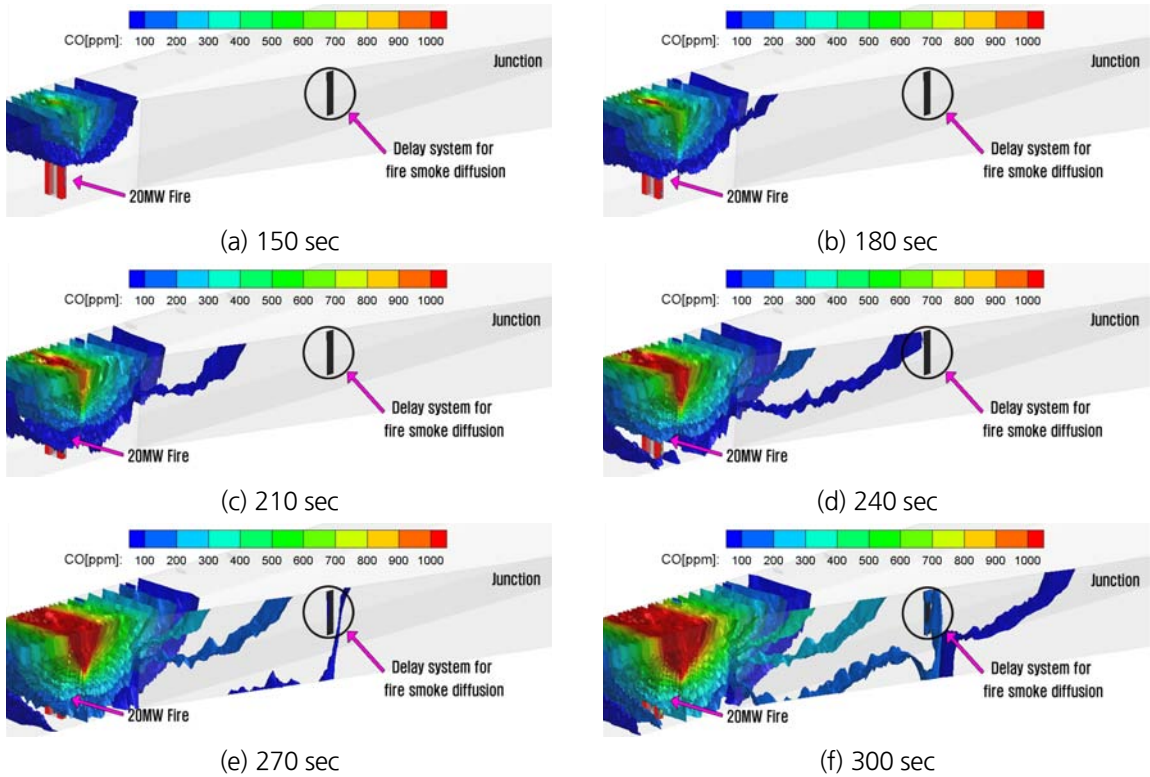


Fig. 9. Blocking rate 50% - CO

화재가 발생한 초기에는 화재연기가 본선 구간에서 경사의 영향에 따라 시간이 지남에 따라 점차 연기가 본선 터널과 교차로 내로 전파되었으며, 이때 교차로 내의 화재연기 확산지연장치의 설치 유·무에 따라 교차로 내 연기 확산이 지연되는 것으로 나타났다. 화재 발생 150초 후 화재연기가 경사의 영향에 의해 교차로가 접해있는 본선 50 m 구간까지 전파되는 것으로 분석되었으며 화재 발생 180초 후에는 확산지연장치의 설치와 관계없이 화재 연기가 교차로로 전파되는 것으로 분석되었다. 화재 발생 210초 후에는 화재연기가 교차로의 경사에 의해 빠르게 교차로 내부로 전파되었다. 교차로 경사에 의해 내부로 전파된 화재연기는 화재연기 확산지연장치가 설치되지 않은 경우 240초에 교차로 50 m 구간을 벗어났고, 화재연기 확산지연장치가 설치되어있고 터널 면적의 50%를 차단하는 경우에 240초는 화재연기가 연기확산 지연장치에 가로막혀 270초까지, 약 30초간 화재연기 전파가 지연되었으며, 270초 후에 교차로 50 m 구간을 벗어나는 것으로 분석되었다(Table 8, Fig. 10). 300초 후에는 화재연기 확산지연장치가 설치되지 않은 경우 화재연기 전파가 설치된 경우 보다 빠르게 전파되는 것으로 분석되었다. 시간에 따른 온도 분포는 화재연기 확산지연장치의 설치 위치 기준으로 안쪽(본선터널 측)과 바깥쪽(타 터널 진출 측)을 측정했으며 화재연기 확산지연장치 안쪽이 바깥쪽보다 온도가 더 높은 것으로 분석되었다. 180초 후 온도 차이가 발생했으며 시간이 지날수록 온도 차이가 커지는 것으로 분석되었다(Fig. 11).

Table 8. Analysis result

Classification	Fire smoke delay time (sec)
Case 1	240
Case 2	270

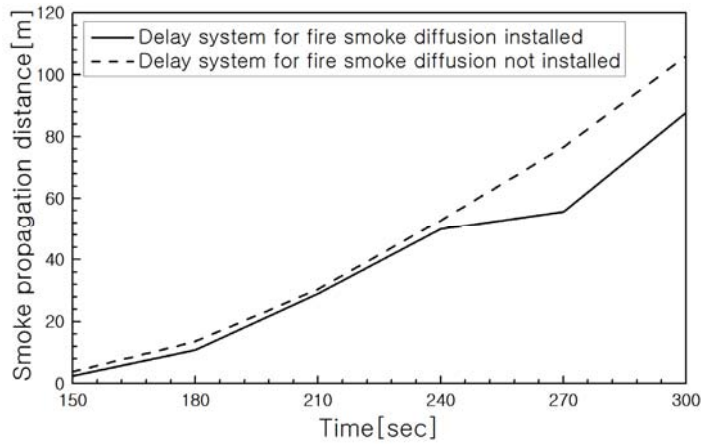


Fig. 10. Fire smoke distance over time

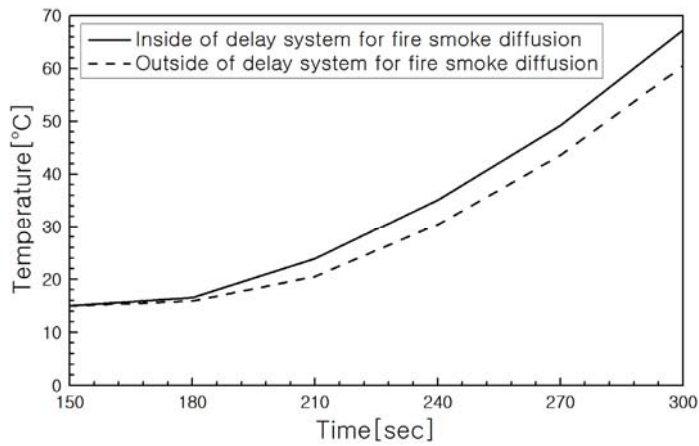


Fig. 11. Temperature over time

3. 결론

최근 도심지 차량 정체 해소와 환경개선을 위하여 도심지 지하공간을 활용하는 방안으로 도로 및 철도 등의 교통시설 등의 여러 계획이 활발히 진행되는 추세이다.

아울러 수년 전부터 한국건설기술연구원에서는 대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발 연구를 진행 중이며, 연구에서 추진 중인 네트워크형 복층터널은 지하공간에서 타 터널로의 진, 출입이 가능하도록 하는 교차로 (Junction)를 갖춘 형태이다. 그러나 교차로 부근에서 화재가 발생하였을 경우에는 화재연기가 타 터널로 전파될 수 있으며, 교차로의 경사가 가파르기 때문에 교차로를 대피하는 대피자가 위험에 처하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 교차로에 화재연기 확산지연장치를 설치하였을시, 화재연기 확산지연효과를 분석하기 위해 3차원 수치 해석을 수행하였다.

대심도 복층터널에 화재발생시 교차로 내부의 화재연기 확산지연설비 작동 시 연기확산 지연효과를 분석한 결과 교차로 내부에 전파된 화재연기는 화재연기 확산지연장치가 설치되지 않은 경우 240초에 교차로 50 m 구간을 벗어났으며, 화재연기 확산지연장치가 설치되어있고 터널 면적의 50%를 차단하는 경우 240초에 화재연기가 연기확산 지연장치에 가로막혀 270초까지 연기 전파가 지연되었고 270초 이후 교차로 50 m 구간을 벗어나는 것으로 분석되었다. 또한 300초 후에는 화재연기 확산지연장치가 설치되지 않은 경우 화재연기 전파가 설치된 경우 보다 빠르게 전파되는 것으로 분석되었다.

결과적으로 화재연기 확산지연장치가 교차로 단면을 차단하는 면적이 커질수록 화재연기 확산을 지연시키는 효과가 큰 것으로 분석되었으며, 화재연기 확산지연장치를 대심도 복층터널 교차로에 적용시 터널 내에 화재가 발생한 경우 교차로 측의 화재연기 전파를 최소 30초 이상 지연시키고 화재연기 온도에 의한 피해도 감소하여 이용객들의 대피에 도움이 될 것으로 판단된다. 추가로 차량 탈출 후 인명대피가 가능하도록 CCTV 등을 추가 설치하여 화재발생시 2차 사고 발생을 예방하는 방안도 필요할 것으로 판단되고, 교차터널이 길 경우 연기확산 속도가 부력에 의해 급속히 증가하므로 향후 추가 해석을 통해 연기확산 지연장치 설치 간격을 제시할 수 있는 연구 진행이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2018년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Choi, J.H. (2016), “Construction of urban underground road: attractive alternative for reducing traffic congestion”, The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 64, No. 8, pp. 34-37.
2. Kim, H.G., Lee C.W. (2004), “A study on the relationship among traffic accidents, fire occurrences and tunnel characteristics in local road tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 6, No. 3, pp. 199-212.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011), Road design manual, Sejong, Korea.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012), Land transport and maritime R&D report: appendix-1,

Sejong, Korea, pp. 140.

5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Guidelines for installing and managing road tunnel disaster prevention facilities, Sejong, Korea.
6. Shin, T.G., Moon, J.J., Yang, Y.W., Lee, Y.T. (2018), “A evaluation study of a fire smoke diffusion delay device installed in a great depth underground double deck tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 1, pp. 225-234.
7. Yang, Y.W., Moon, J.J., Shin, T.G. (2016), “A research for preventing smoke diffusion in case of fire in great depth underground double-deck tunnel”, Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 53, No. 2, pp. 158-163.
8. Yang, Y.W., Moon, J.J., Shin, T.G. (2017), “A research and development for the delay device against fire smoke diffusion in great depth underground double deck tunnels”, Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 54, No. 2, pp. 110-116.
9. 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.