

횡류식 제·배연 시스템의 개선 및 적용성 분석을 위한 모형실험 연구

김효규^{1*} · 백두산² · 김재현³ · 이성원⁴ · 유지오⁵

¹정회원, (주)주성지앤비 대표이사

²정회원, (주)주성지앤비 대리

³정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 수석연구위원

⁵정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

Scaled model tests for improvement and applicability of the transverse smoke control system on tunnels

Hyo-Gyu Kim^{1*} · Doo-San Baek² · Jae-Hyun Kim³ · Seong-Won Lee⁴ · Ji-Oh Yoo⁵

¹CEO, JuSung G&B INC.

²Researcher, JuSung G&B INC.

³Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

⁴Senior Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology

⁵Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

*Corresponding Author : Hyo-Gyu Kim, hgkim@gnbeng.com

Abstract

Currently, road tunnels and railroad tunnels are building smoke control systems to emit toxic gases and smoke from fires. Among the various smoke control systems, the transverse smoke control system has the disadvantage that air supply or exhaust is performed on only half of the cross-section, rather than air supply or exhaust on the entire cross-section of the tunnel as air is supplied or exhausted by partitioning the wind path. Therefore, this study analyzed the effect of exhaustion through numerical analysis and scaled model tests on the zoning smoke control system, which improved the limitations of the transverse smoke control system. As a result of the scaled model test, the transverse ventilation system exhibited a 25.6% smoke control rate based on the state where no smoke was controled, and zoning smoke control system showed a smoke control rate of 40.8%. In addition, as a result of numerical analysis, it was found that transverse ventilation system did not control fire smoke spreading from the tunnel and continued to spread. On the other hand, zoning smoke control system was found to be smoke controled within a certain section due to the air curtain effect and the flue gas effect.

Keywords: Tunnel exhaust system, Transverse smoke control system, Zoning smoke control system, Scaled model tests

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
22(5)563-574(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.5.563>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received July 29, 2020

Revised September 4, 2020

Accepted September 6, 2020



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 © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

현재 도로터널과 철도터널에서는 화재시 발생한 유독가스 및 연기를 배출하기 위하여 제·배연시스템을 구축하고 있다. 다양한 제·배연 시스템 중 횡류식 제·배연시스템은 풍도의 중간을 구획하여 급기 또는 배기를 수행함에 따라 터널 본선 전단면에 급기 또는 배기가 되는 것이 아니라 터널 본선의 절반 부분만 급기 또는 배기가 수행되는 단점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 횡류식 제·배연시스템의 한계점을 개선한 조닝방식에 대하여 수치해석과 모형시험을 통해 제·배연 효과를 분석하였다. 모형시험의 결과 제·배연이 이루어지지 않은 상태를 기준으로 횡류식 제·배연시스템은 25.6%의 배연율을 나타내었고, 조닝을 통한 제·배연시스템은 40.8%의 배연율을 나타내었다. 또한 수치해석결과 횡류식 제·배연시스템은 본선터널에서 확산되는 화재연기를 차단하지 못하고 지속적으로 확산 되는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 조닝방법을 통한 제·배연시스템은 에어커튼 효과 및 배연 효과로 인하여 화재연기가 일정구간 내에 제연 되는 것으로 나타났다.

주요어: 터널 배연 시스템, 횡류식 제·배연 시스템, 조닝을 통한 제·배연 시스템, 모형시험

1. 서 론

최근 미세먼지의 증가와 다양한 환경문제로 인하여 국가적으로 저탄소 녹색성장을 추진하기 위하여 다양한 정책이 진행 중이다. 교통분야 역시 교통수요 분담과 더불어 인구가 밀집된 수도권 지역의 도로교통 혼잡을 분산하기 위하여 도로터널의 시공 및 운영이 증가되고 있는 실정이다. 도로터널은 화재 및 긴급상황시에 대처가 가능하도록 다양한 설비들이 설치되고 있으며, 특히 화재시 발생하는 유독가스 등을 배기 및 제연하기 위한 제·배연설비가 주요한 설비로 설계 및 운영 중이다. 횡류식 제·배연 방식을 적용하는 도로터널은 본선 구간의 제·배연 효율을 증대하기 위하여 풍도 및 덕트의 형상, 설치 형태, 설치 간격 등 다양한 연구가 진행 중이다. 이와 관련하여 소형차 전용터널에 대하여 대배기구 방식을 적용한 화재특성에 관하여 연구(Yoo et al., 2017)와, 도로터널 횡류환기방식의 환기특성 및 시스템 설계에 관한 연구(Yoo and Kim, 2018), 횡류식 도로터널의 급·배기 포트의 개구면적을 최적화 할 수 있는 방안에 대하여 연구(Jo et al., 2019) 및 소단면 대심도 터널 화재시 대배기구의 설치형태에 따른 화재특성에 대하여 연구(Choi et al., 2019) 등이 있다. 반면, 횡류식 제·배연 방식은 풍도를 급기와 배기로 나누어 연결된 댐퍼를 통해 급기 및 배기를 수행함에 따라 터널 본선 전단면에 급기 및 배기가 이루어지지 않는다는 단점을 지니고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 횡류식 제·배연 방식의 단점을 극복 할 수 있도록 급기 및 배기 풍도에 연장부를 설치하여 터널 본선 전단면에서 급기 및 배기가 이루어 질 수 있는 시스템을 제시하고 이에 대한 모형시험과 수치해석을 통해 그 효율을 검증을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 조닝을 통한 제·배연 시스템

본 연구에서 제시하는 조닝을 통한 제·배연시스템의 개요도는 Fig. 1에 나타내었다. 기존 급기와 배기 풍도는 그대로 사용하면서 급기와 배기 풍도를 구획하는 격벽과 복수의 급기구 중 이웃하는 급기구 사이에 배기 연장부가 형성되고, 복수의 배기구 중 이웃하는 배기구 사이에 급기 연장부가 형성되는 형태를 지닌다. 따라서 급·배기 풍도를 구획하는 격벽은 급기 연장부와 배기 연장부를 연결할 수 있도록 관통노즐이 형성되는 형태이다. 조닝을 통한 제·배연 시스템의 작동개념은 기존 급·배기풍도 및 급·배기덕트를 이용해 일반적인 형태로 급·배기가 이루어지며, 추가적으로 급기 및 배기 풍도를 구획하는 격벽에 설치된 관통노즐을 통해 위치한 급·배기 연장부에서도 급·배기가 이루어지게 된다. 따라서 급·배기 덕트 및 급·배기연장부를 통해 터널 본선 전단면에서 배기가 이루어지도록 작동된다. 이러한 작동개념을 통해 일반 횡류식 방식의 급·배기 효과와 더불어 급기 및 급기 연장부를 통해 제연보조설비라 할 수 있는 에어커튼의 효과도 함께 기대할 수 있다.

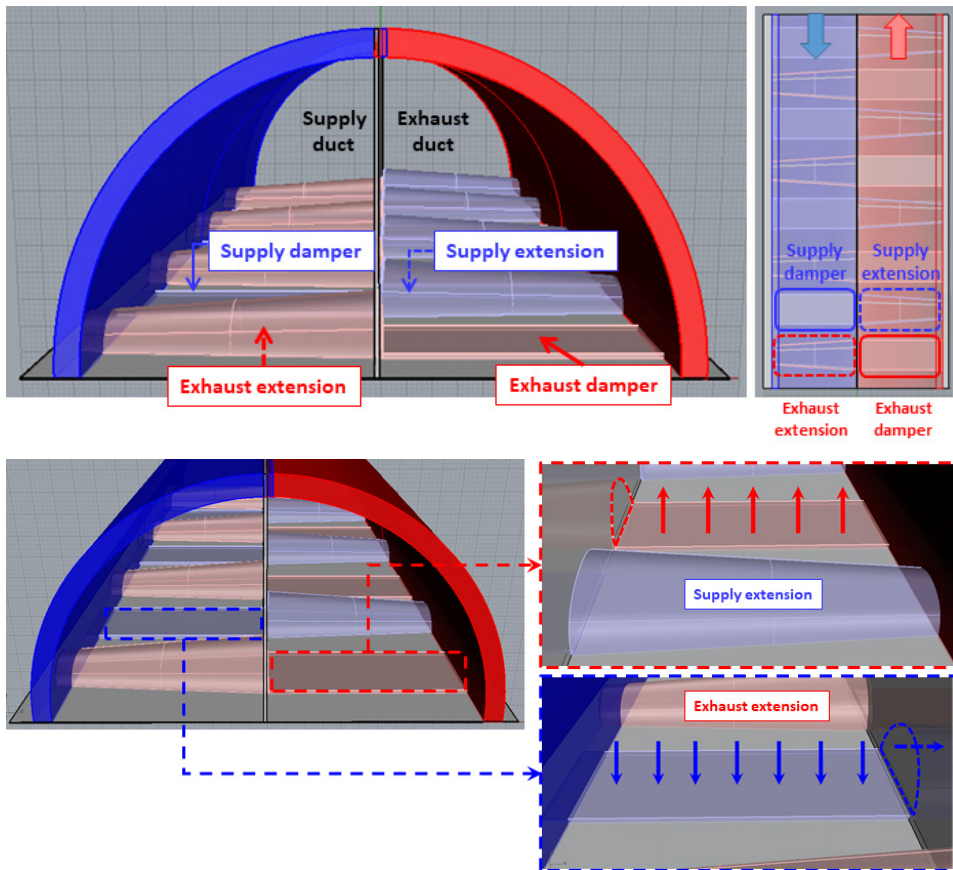


Fig. 1. Outline of zoning smoke control system

2.2 조닝을 통한 제·배연시스템의 모형시험

2.2.1 모형시험을 위한 배연풍도 결정

본 연구의 조닝을 통한 제·배연 시스템은 기본적으로 횡류식 제·배연시스템을 적용하기 때문에 이에 대한 배연풍량을 설정해야 하므로 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침에 제시된 배연풍량 산정식을 준용하여 적용하였으며(MOLT, 2016a), 해당 식은 다음과 같다.

$$Q_E = A_r \cdot V_a + Q_s \quad (1)$$

여기서, Q_E : Exhaust flow rate (m^3/s)

A_r : Tunnel area (m^2)

V_a : Additional velocity for control the longitudinal velocity (m/s)

Q_s : Smoke production rate ($80 \text{ m}^3/\text{s}$ at HRR in 20 MW)

Fig. 2에는 본 연구에 대상이 된 터널의 개요도를 나타내었다. 복층형태의 터널 구조를 갖는 대상 터널은 Tunnel A와 Tunnel B는 임의로 구획된 터널이며, 국내 및 국외의 소형차 전용도로 터널의 단면을 기준으로 설정하였다 (Yoo et al., 2017). 본 연구에 적용된 터널은 Tunnel B이다. 또한, Fig. 3에는 화재강도에 따른 배연풍량 및 풍도면적을 산정한 결과를 나타내었다. 본선의 풍속이 2.0 m/s를 기준으로 10 MW의 화재강도에서 배연풍량 및 풍도면적은 $73.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 4.9 m^2 로 계산되었으며, 20 MW의 화재강도에서 배연풍량 및 풍도면적은 $123.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 11.6 m^2 로 계산되었다. 100 MW의 화재강도에서는 배연풍량 및 풍도면적은 각각 $243.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 및 16.2 m^2 로 계산되었다. 한편, 풍속 2.5 m/s를 기준으로 10 MW의 화재강도에서 배연풍량 및 풍도면적은 $84.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 5.6 m^2 로 계산되었으며, 20 MW의 화재강도에서 배연풍량 및 풍도면적은 $134.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 8.9 m^2 로 계산되었다. 100 MW의 화재강도에서는 배연풍량 및 풍도면적은 각각 $254.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 및 16.9 m^2 로 계산되었다. 본 연구에서는 모형시험체 제작의 용이를 위하여 본선내 풍속을 2.0 m/s와 화재강도를 20 MW로 기준으로 설정하여 모형시험체를 제작하였다. 산정된 풍도 및 화재강도에 따라 모형시험체를 제작하였으며, 축소모형은 1:30으로 적용하여 산출하였으며, Table 1과 Table 2에 모형시험체 제작을 위한 산출근거와 제원을 나타내었다. 국토교통부에서는 송풍기의 설계풍량이 정·역방향에서 규정사양 이상의 성능을 확보하도록 정하고 있으며(MOLT, 2016b), 한국철도공사에서는 역회전시 풍량은 정회전시 풍량의 80% 이상이 되도록 규정하고 있다(KORAIL, 2013). 따라서 대상 터널의 풍도에 설치되는 팬은 축류팬으로써 배기풍량을 정풍량으로 가정하였고, 급기시에는 역회전을 함에 따라 정풍량의 80%를 적용하였다.

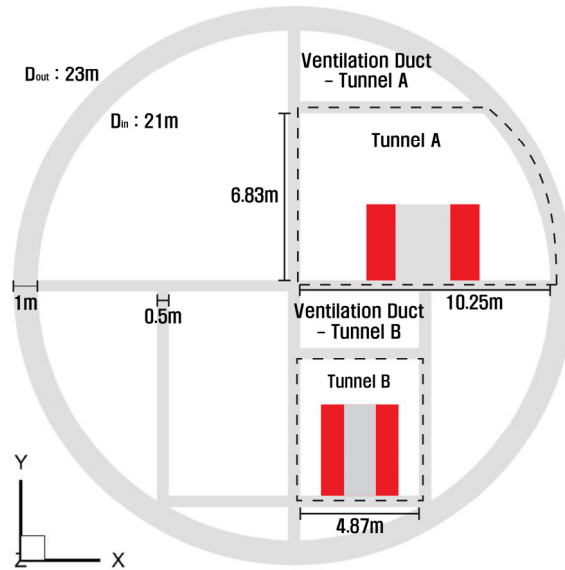


Fig. 2. Outline of tunnel (real scale)

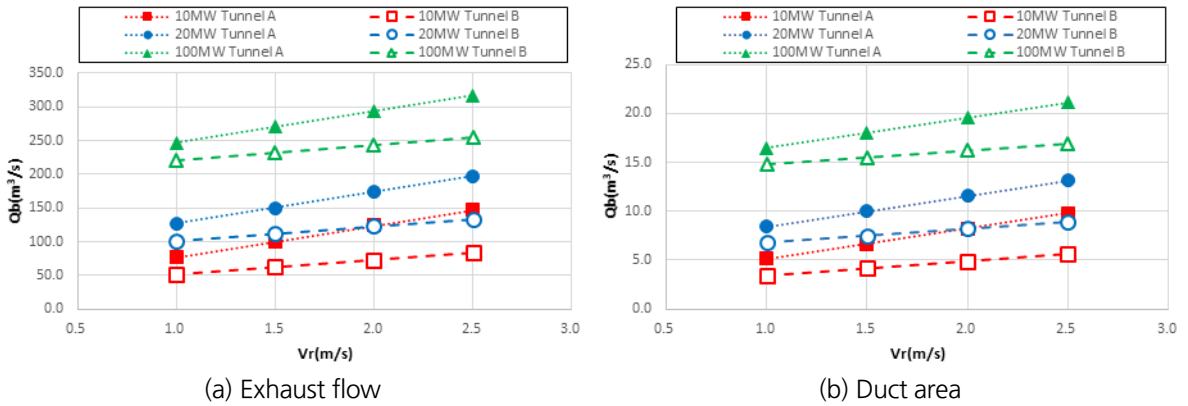


Fig. 3. Results of calculation at exhaust flow and duct area

Table 1. Calculating basis of scaled model tests

Category	Equation
Length	$420 \text{ m} \times (1/30) = 14 \text{ m}$
Flow-rate (exhaust)	$123.2 \text{ m}^3/\text{s} \times (1/30) = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$
Flow-rate (supply)	$98.6 \text{ m}^3/\text{s} \times (1/30) = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$
Heat release rate	$20 \text{ MW} \times (1/30)^{5/2} = 4,057 \text{ W}$
Smoke production rate	$80 \text{ m}^3/\text{s} \times (1/30) = 0.016 \text{ m}^3/\text{s}$

Similarity rule: Froude model and Thomas theory (Thomas, 1968; 2000)

Table 2. Specifications of scaled model tests

Category		Real scale	Model scale	Note
Ratio reduction		1:1	1:30	
Length		500 m	15 m	
Flow-rate	Exhaust	123.2 m ³ /s	0.025 m ³ /s (1,500 LPM)	Supply flow-rate = Exhaust flow-rate * 80%
	Supply	98.6 m ³ /s	0.020 m ³ /s (1,200 LPM)	
HRR		20 MW	4,057 W	
SPR		80 m ³ /s	0.016 m ³ /s (974 LPM)	

Layouts



2.2.2 축소비에 따른 모형시험장치 구축

연기발생장치는 히터, 연무발생장치 컨트롤박스 등으로 구성되어 있다. 히터는 최대 1,000°C까지 발열을 할 수 있으며, 컨트롤박스에 설치된 컨트롤러를 통해 제어가 가능하다. 또한 모형차량 안에 설치되어 있어 연무발생장치와 함께 부력효과를 실제와 최대한 근접하게 모사할 수 있도록 하였다. 연무발생장치는 무색, 무취의 수용성 연무용액을 일정 온도까지 가열시켜 유량조절기를 통해 연기를 화재차량 내부로 공급된다. 화재차량 내부의 연기는 가열된 히터를 지나 모형차량을 통해 모형터널로 방출된다. 모형터널 내부에 공급되는 연기발생량은 일반적으로 20 MW 규모 화재를 기준으로 약 80 m³/s 정도로 이를 Froude 상사법칙에 의해서 연기발생량을 산출하여 적용하였다.

배연성능 시험 시 연기유동을 육안으로 확인하는 것이 불가능하므로 시험장소의 모든 조명을 소등하고 외부로부터 시험공간으로 유입되는 빛을 최대한 차단시켰다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 연기 거동을 쉽게 확인 할 수 있도록 필터 처리된 레이저 광원과 카메라를 터널 진행방향으로 1.75 m 간격으로 1대씩 설치하여 모형터널의 전 연장을 실시간으로 촬영할 수 있도록 하였다.

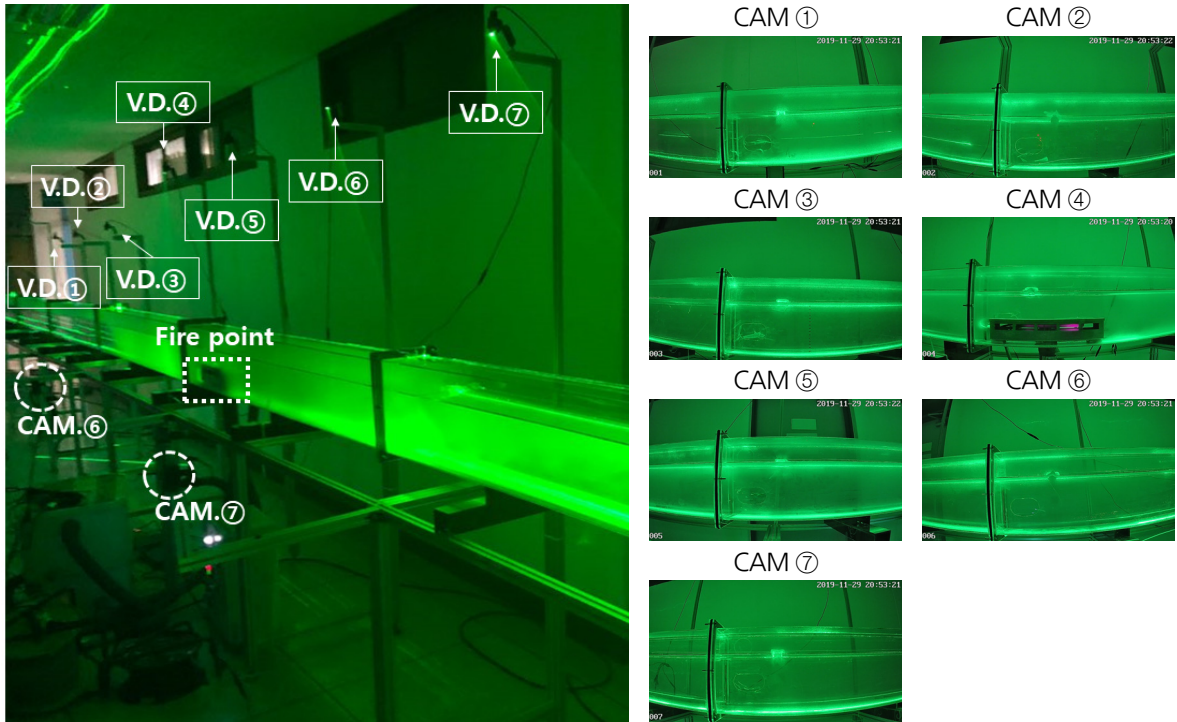


Fig. 4. Visualization device (V.D.) and camera (CAM.)

2.2.3 조닝을 통한 모형시험 종류 및 결과

본 연구에 수행된 모형시험의 종류는 Table 3에 나타내었다. 모형시험의 목적은 기존 횡류식 제·배연방식과 조닝을 통한 제·배연방식의 배연성능을 가시화 시험을 통해 배연율을 측정하는 것으로 3가지 모형시험을 수행하였다. Case 1은 급·배기가 수행되지 않은 경우이며, 배연율 산정을 위해 비교군으로 수행되었고, Case 2는 기존 횡류식 배연방식을 적용하여 급기 없이 배기만 수행된 경우이며, Case 3은 조닝을 통한 제·배연 방식으로 급·배기 연장부를 통하여 터널의 전단면에서 급기와 배기가 모두 이루어졌다. 배연율은 모형시험간 측정된 사진을 그래픽 분석을 통하여 본선 내 화재연기의 면적을 산출하였다. 배연율 산정은 식 (2)와 같이 Case 1을 기준으로 Case 2와 Case 3의 배연율을 측정하였다.

$$\text{Exhaustion Rate (\%)} = \frac{\text{Case } 1_A - (\text{Case } 2_A \text{ or Case } 3_A)}{\text{Case } 1_A} \times 100 \quad (2)$$

여기서, Case 1_A, Case 2_A, Case 3_A는 각각 모형시험과 그 결과에 따른 그래픽 분석을 통해 분석된 본선내의 화재 연기 면적을 의미한다.

Table 3. Case of scaled model test

Category		Damper state (O: Open, X: Close)							Smoke production rate
		①	②	③	④ (fire)	⑤	⑥	⑦	
Case 1	Exhaust	X	X	X	X	X	X	X	0.016 m ³ /s
	Supply	X	X	X	X	X	X	X	
Case 2	Exhaust	X	O	X	O	X	O	X	
	Supply	X	X	X	X	X	X	X	
Case 3	Exhaust	O	O	O	O	O	O	O	
	Supply	O	O	O	O	O	O	O	

Table 4에는 각 모형시험에 따른 결과를 나타내었다. Case 1의 경우 풍도내로 화재연기가 배연이 되지 않기 때문에 본선 구간으로만 화재연기가 확산되어 전 구간에 화재연기가 전파되는 것으로 나타났다. Case 2의 경우 배기구를 통하여 배기가 수행됨에 따라 4지점(화재지점)을 기준으로 2지점과 6지점까지 화재연기가 전파되는 것으로 확인 되었다. Case 3의 경우 급·배기구와 급·배기 연장부를 통하여 급기 및 배기가 동시에 수행됨에 따라 2지점과 6지점 까지 화재연기가 전파되지 않고 3지점과 5지점을 일부 넘어 제연되는 것으로 나타났다. 배연율을 산출한 결과는 Case 1을 기준으로 Case 2의 배연율은 약 25.6%로 분석되었으며, Case 3의 배연율은 약 40.8%로 분석되었다. 이처럼 기존 횡류식 방식에 급·배기 연장부를 설치함으로써 본선 터널 전단면에 급기 및 배기가 가능하게 됨으로써 에어커튼 효과를 이용한 연기 차단 및 지연과 기존 배연효과로 보다 효과적인 제·배연이 가능한 것으로 분석되었다.

Table 4. Results of scaled model test

Category		Damper state (O: Open, X: Close)							Exhaustion rate
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
Case 1	Exhaust	X	X	X	X	X	X	X	-
	Supply	X	X	X	X	X	X	X	
Case 2	Exhaust	X	O	X	O	X	O	X	25.6%
	Supply	X	X	X	X	X	X	X	
Case 3	Exhaust	O	O	O	O	O	O	O	40.8%
	Supply	O	O	O	O	O	O	O	

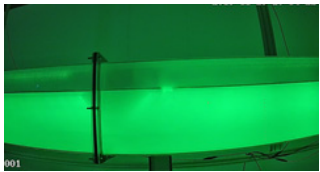
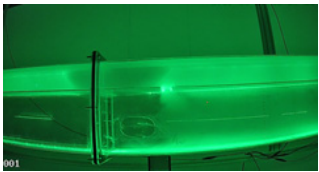
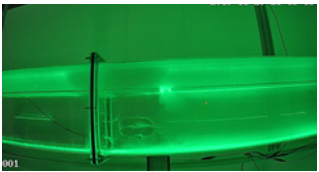
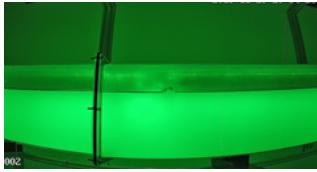


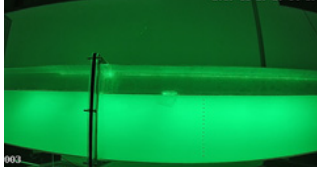


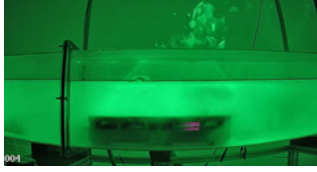


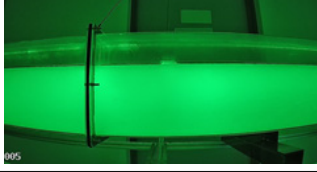
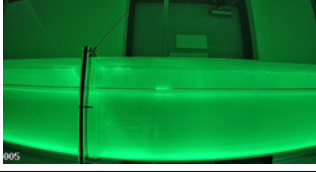
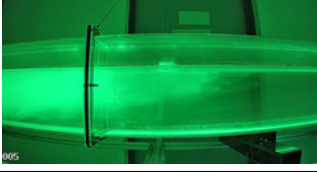

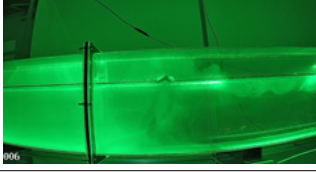

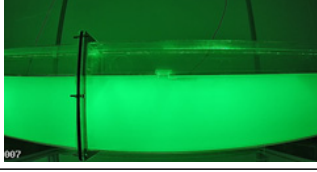
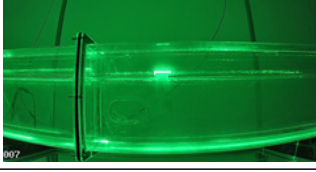

Category	Case 1	Case 2	Case 3
Damper ①			

Table 4. Results of scaled model test (continued)

Category	Case 1	Case 2	Case 3
Damper ②			
Damper ③			
Damper ④ (fire point)			
Damper ⑤			
Damper ⑥			
Damper ⑦			

2.3 조닝을 통한 제·배연 시스템의 수치해석

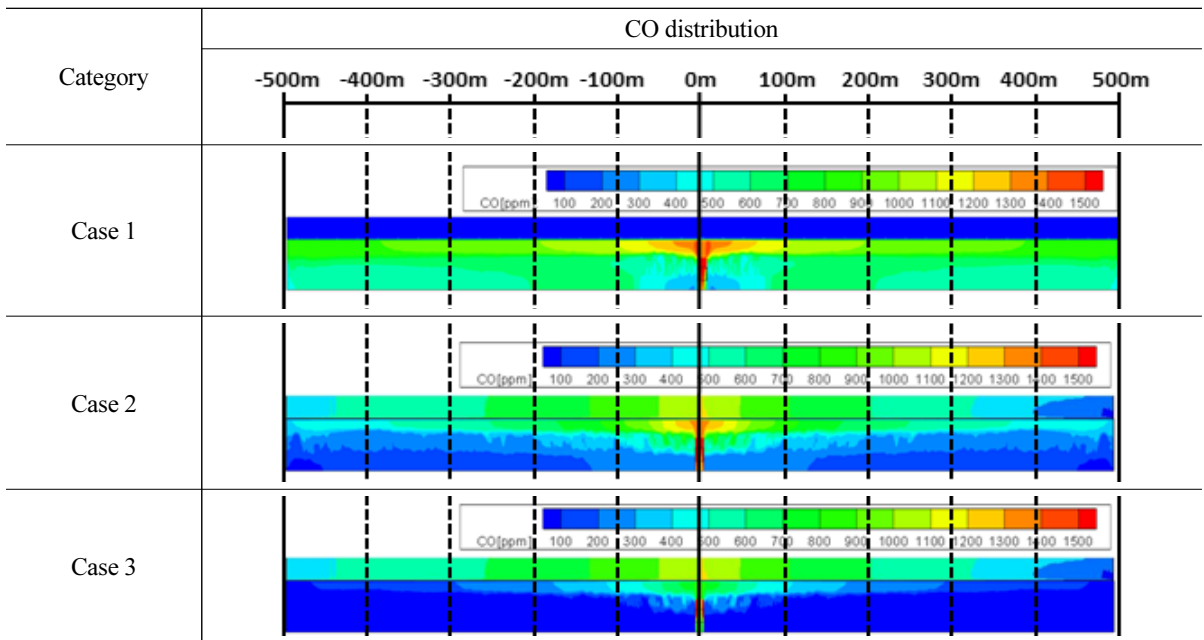
조닝을 통한 제·배연 시스템의 성능을 검증하기 위하여 실규모 터널을 대상으로 본선과 풍도부분을 구분하고, 풍도 내에 급·배기구와 급·배기구 연장부를 설정하여 실규모 터널에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석의 수렴성 및 정확성을 위하여 6면체(Hexahedral) 격자를 사용하였고, 약 580만개의 격자가 수치해석에 사용되었다. 해석의 전체 연장은 화재위치를 기준으로 양방향 500 m씩 총 1,000 m로 설정하였으며, 구배에 따른 화재연기의 확산 영향을 최소화하기 위하여 0%로 설정하였다. 적용된 경계조건은 대상 터널의 양측 끝 입·출구부에는 주변 유

체의 해석에 의해 유동장이 진행되는 Boussinesq 방정식에 따른 조건을 부여하여 입·출구에서의 별다른 저항없이 유체가 진행되도록 설정하였으며, 화재강도는 20 MW, 연기발생량은 80 m³/s로 설정하였다, 자세한 경계조건은 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Boundary condition in simulation

Category		Input data	Note
Flow rate	Exhaust	123.2 m ³ /s	Supply flow rate = Exhaust flow rate * 80%
	Supply	98.6 m ³ /s	
HRR		20 MW	
SPR		80 m ³ /s	

Table 6. Results of simulation



NFPA는 화재로 인해 발생한 화재 연기 중 100 ppm 이상의 CO를 1~2시간 이상 흡입 할 경우 두통 등의 이상 증상이 발생하는 것으로 나타내고 있기 때문에, Table 6에는 수치해석에 대한 결과 중 CO의 농도를 100 ppm 기준으로 나타내었다(NFPA, 2010). Case 1의 경우 별도의 급·배기가 없기 때문에 풍도로의 화재연기 이동은 없으며, 본선 터널 양방향을 통하여 확산 및 해석영역의 끝 부분인 입·출구부로 화재연기가 배출 되는 것으로 확인되므로, Case 1의 경우 100 ppm 농도의 CO 확산거리는 500 m 이상이라 판단된다. 또한 터널 본선에 약 1,000 ppm 이상의 고농도의 CO가 전반적으로 형성됨에 따라 실제 상황일 경우 해당 터널에 존재하는 모든 피난객들의 안전

이 보장되지 않을 것으로 예상된다. 한편, Case 2의 경우 풍도를 통하여 배기되지만 급기가 되지 않아 본선터널에서 확산되는 화재연기를 조기에 차단하지 못하고 지속적으로 확산 되는 양상을 보이는 것으로 나타나며, Case 1과 마찬가지로 100 ppm 농도의 CO 확산 거리는 500 m 이상으로 확인되었다. 또한, 400 ppm 이상의 고농도의 CO가 터널 본선 바닥부 까지 내려오는 구간이 화재위치를 기준으로 ± 120 m 범위에서 나타나는 것으로 확인되었다. Case 3의 경우 동일하게 풍도를 통하여 화재연기가 배출이 되는 동시에 급기구를 통하여 화재연기의 확산을 지연 및 차단함으로써 차단된 영역을 통해 지속적으로 화재연기가 배출되어 화재연기가 본선터널 양방향으로 끝까지 확산되지 않고 화재열차를 기준으로 ± 460 m 지점에서 제연 되는 것을 확인하였다. 이는 터널 전단면에 지속적인 급·배기를 통하여 화재연기가 본선터널 바닥부까지 도달하지 않고 충분히 제·배연이 되고 있음을 의미한다. 이처럼 조닝방법을 통한 제·배연시스템이 적용 될 경우 에어커튼 효과 및 배연 효과로 인하여 화재연기가 본선터널 종방향으로 끝까지 전파되지 않고 일정구간 내에 제연되는 것으로 분석되었다.

3. 결론

본 연구에서는 기존 횡류식 제·배연시스템 방식의 단점을 극복 할 수 있도록 급기 및 배기 풍도에 연장부를 설치하여 터널 전단면에서 급기 및 배기가 이루어 질 수 있는 시스템을 제시하고 이에 대한 모형시험과 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 축소모형시험 결과를 정량적으로 계산한 결과 Case 2의 배연율은 Case 1 대비 약 25.6%의 배연율 증가효과가 있음을 확인하였다. 조닝기술을 이용한 Case 3의 경우, Case 1 대비 약 40.8%의 배연율 증대효과가 있는 것으로 분석되었다.
2. 모형시험결과 기존 횡류식 방법에 급·배기 연장부를 설치함으로써 터널 본선 전단면에 급기 및 배기가 가능하게 하는 조닝기술은 에어커튼을 통한 연기차단과 기존 배연 효과를 동시에 확보할 수 있어 기존대비 효과적인 제·배연이 가능한 것으로 분석되었다.
3. 수치해석을 통해 기존의 제·배연시스템과 조닝기술을 적용한 제·배연시스템의 성능을 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 기존 횡류식 방식을 적용한 경우, 급기가 되지 않아 본선터널에서 확산되는 화재연기를 차단하지 못하고 지속적으로 확산 되는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 조닝방법을 통한 배연시스템이 적용 될 경우 에어커튼 효과 및 배연 효과로 인하여 화재연기가 본선터널 종방향으로 끝까지 전파되지 않고 일정구간 내에 제연되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 2019년 선도연구센터사업의 스마트 수중 터널 시스템 연구센터(2017R1A5A1014883)의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

저자 기여도

김효규는 연구 개념 및 설계, 원고 작성을 하였고, 백두산은 데이터 수집 및 해석을 하였고, 김재현과 이성원은 데이터 해석 및 분석을 하였고, 유지오는 원고 검토를 하였다.

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., Baek, J.H. (2019), "A study on the program development for area optimizing of damper ports in road tunnels with transverse ventilation system", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 177-188.
3. KORAIL (Korea Railroad) (2013), KRCS G057 03 - Railway equipment construction specification: blower, pp. 11.
4. MOLT (Ministry of Land Transportation) (2016a), Guideline for the installation of road tunnel fire safety facilities, pp. 82.
5. MOLT (Ministry of Land Transportation) (2016b), KCS 31 25 20 : 2016 - Ventilation facilities instruction, pp. 5.
6. NFPA (2010), NFPA 130 - Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems-Annex B: ventilation, NFPA, pp. B.2.1.2.
7. Thomas, P.H. (1968), The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, Fire Research Station Note No. 723, Fire Research Station, UK.
8. Thomas, P.H. (2000), Dimensional analysis: a magic art in fire research, *Fire Safety Journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 111-141.
9. 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.
10. Yoo, 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.