

터널화재시 부분배연설비의 운영방안을 위한 수치해석적 연구 A Numerical Study for the Operation of Partial Smoke Extraction System in Tunnel Fire

유용호[†] · 이의주* · 신현준 · 신한철**

Yong-Ho Yoo[†] · Eui-Ju Lee* · Hyun-Jun Shin · Han-Chol Shin**

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부, *부경대학교 안전공학부, **(주)한미피슨스
(2006. 4. 7. 접수/2006. 6. 16. 채택)

요 약

본 연구에서는 부분배연설비의 배연효율을 분석하고, 화재시 운영방안을 제시하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 해석결과 선행된 실험을 통하여 얻었던 균일댐퍼의 배연효율 및 연기의 단면분포에 의한 성층화 결과는 서로 일치하는 경향을 얻을 수 있었다. 균일댐퍼의 운영방안은 화재시 화재 근방의 댐퍼만을 개방하였을 경우가 터널내 모든 댐퍼를 개방하였을 경우에 비하여 약 7%의 배연효율이 증가됨을 보였다. 또한, 터널내 차량이 정체시 화재가 발생할 경우 승객의 안전한 대피를 위한 부분배연설비의 정량적인 운전방안을 제안하였다.

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the smoke extraction efficiency using by the partial extraction system with CFD simulation for case of tunnel fire. The Comparison of CFD results with the preceding scaled model test results, it is equal to the smoke extraction efficiency and smoke stratification in tunnel by the partial smoke extraction system (distributed damper). It shows that the smoke extraction efficiency is increased about 7% by the distributed damper which is opened near fire, compare with the distributed damper which is all opened. The case of the fire occurs on a traffic jam in a tunnel, it is proposed that the operating method of partial smoke extraction system for the escaping passengers.

Keywords : Tunnel fire, The smoke extraction efficiency, The partial extraction system

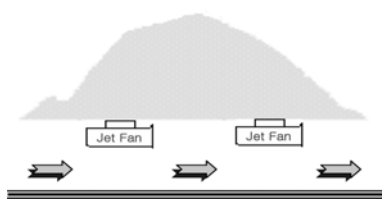

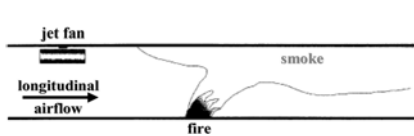
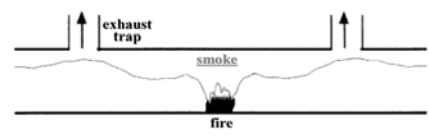
1. 서 론

도로터널에 적용되는 환기방식은 크게 종류식과 횡류식(반횡류식)으로 대별될 수 있다. 터널 화재시 연기의 유동 특성은 이러한 환기방식에 따라 다르게 나타난다. Table 1에서 보는 바와 같이 횡류환기방식의 경우 배연은 용이하나 연기흐름을 제어하는 제연능력이 떨어진다. 반면, 종류환기방식은 제연능력은 우수하나 배연능력이 부족하기 때문에 적절한 환기방식별 화재 발생시나리오에 따른 최적의 배연 또는 제연설계기술의 개발은 터널 화재 안전을 위하여 매우 중요한 요소이다. 그러나, 장대도로터널의 경우 화재시 발생하는 유독성 연기를 배출하기 위한 배연시스템의 구축에 많

은 어려움이 있기 때문에, 배연보다는 제연개념을 기반으로 연기의 유동방향을 제어함으로써 승객의 대피로를 확보하는 개념에서 화재시 안전에 대처하고 있는 실정이다. 지금까지 터널 화재에 관한 연구는 주로 임계속도를 결정하는 것에 관심이 집중되어 있으며, Kennedy,¹⁾ Tetzner,²⁾ Y. Wu³⁾ 등의 실험식이 대표적이다. 국내에서도 최준석 등⁴⁾은 대전터널 실험실실험을 실시하였고, 김정엽 등⁵⁾은 축소모형실험을 수행하여 임계속도는 Kenedy 식에 의한 계산치 보다 커야 함을 보였다. 유용호 등^{6,7)}은 화재시 연기 전파특성을 고려한 피난 연락경의 설치간격 및 수직갱의 배연효율등에 관한 실험을 실시하였다. 또한, 김명배 등⁸⁾은 횡류방식에 대한 실험을 실시하여 연기전파거리와 연기축적을 새로운 환기설계의 개념으로 제안하였다. 본 연구에서는 이러한 두 환기 방식이 가지는 장점을 극대

[†]E-mail: ventil@hanmail.net

Table 1. Tunnel ventilation system

	종류식(제트팬방식)	반회류식
정상주행시	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 차량진행방향으로 기류형성 ✓ 개통후 추가적인 제트팬 설치 가능 ✓ 비교적 경제적인 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 터널내 덕트를 통하여 급기 혹은 배기 ✓ 횡방향 기류를 형성 ✓ 도심지, 대면교통터널에서 고려됨 
터널화재시	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 제연 가능, 배연능력부족 ✓ 터널내 차량 정체시 문제점 노출 ✓ 일계속도 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 배연 우수, 제연능력부족 ✓ 관련연구 미비 ✓ 배연풍랑, 선충화 유지 

화하기 위하여 종류식 환기방안과 부분배연설비가 혼합된 터널을 대상으로 전산수치해석을 실시하여 선행된 축소모형실험 결과와 비교하였으며, 그 결과를 토대로 부분배연설비의 운영 방안을 고찰하였다.

2. 부분배연설비

본 연구의 대상은 부산-거제를 연결하는 국내 최초의 해저터널(길이 3,580 m) 구간으로 육상에서 터널형상의 침매함을 시공한 후 터널예정지로 이동하여 수중에서 침매함을 조립하는 침매공법으로 시공되고 있다. 침매터널은 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 침매함의 특성상 양방향의 터널 구간 중앙에 보조갤러리가 존재하게 되며, 부분배연설비는 이러한 보조갤러리의 상부 일부를 화재시 배연설비로 이용하는 개념으로 설계하는 것을 의미한다. 즉, 침매터널의 정상 주행시에는 제트

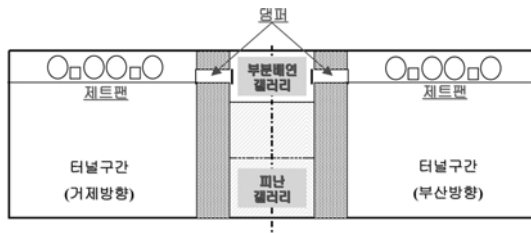


Fig. 1. Partial smoke extraction system.

팬에 의한 종류환기방식으로 터널내 환경을 유지하고, 터널 화재시에는 터널 측벽 상부의 부분배연갤러리와 연결되도록 설치된 댐퍼를 개방하여 연기를 배연시키는 혼합방식의 설비이다.⁹⁾ 배연효율을 높이기 위하여 고안된 이러한 부분배연설비를 실제터널에 적용하기 위하여, 등온기체모형을 이용한 축소모형실험을 선행 연구결과 그룹댐퍼의 경우보다 균일댐퍼가 적용될 경우 터널내 안전시스템에 더 용이할 것이라는 판명되었기 때문에 본 연구에서는 그룹댐퍼일 경우만을 고려하여 수치해석을 실시하였다.¹⁰⁾

3. 수치해석

수치해석에 적용된 지배방정식은 아래 식과 같으며, 화재시 지배적으로 작용되는 난류는 일반적인 k-ε을 적용하였으며 해석은 상용코드인 PHOENICS 3.5를 이용하였다.

- Continuity Equation;

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

- Momentum Equation;

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

- Turbulent Kinetic Energy Equation;

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \varepsilon + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

- Turbulent Kinetic Energy Dissipation Equation;

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

- Energy Equation;

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + Q \quad (5)$$

4. 축소모형실험 결과와의 비교(5 MW)

4.1 해석조건

수치해석은 선행된 축소모형실험과 동일한 조건을 경계조건으로 설정하여 수행하였으며, 그 결과를 비교하여 보았다. 해석조건은 Fig. 2와 같이 등온기체모형 실험 결과중 배연효율을 고려하여 균일뎀퍼로 선정하였으며, Table 1과 Table 2에 제시된 바와 같이 5 MW

Table 2. Boundary condition (distributed damper, 5 MW)

Inlet	Flow rate	Tunnel inlet velocity (V _{cr} , m/sec)	Gallery exhaust velocity (V _g , m/sec)
		0.51	1.25
	Temperature	15°C	
Outlet	Pressure	atmospheric pressure	
	Temperature	15°C	

비교) 1. 입구유속은 축소모형실험을 통하여 얻어낸 5 MW 화재에 대한 입계유속임.
 2. 갤러리 유속은 축소모형실험시 주터널과의 유량비 약 30%에 해당하는 유속임.

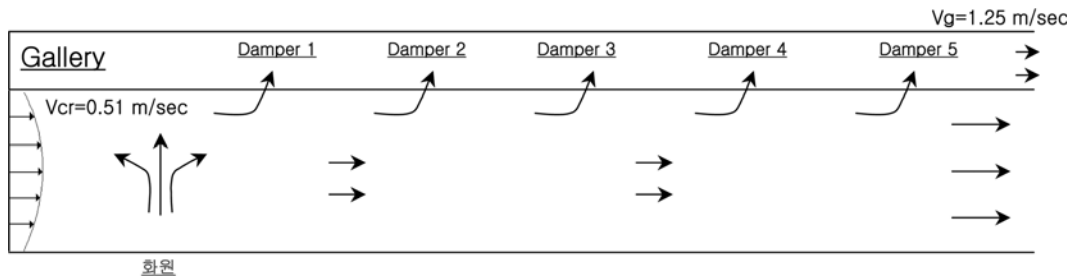


Fig. 2. distributed damper (5 MW).

Table 3. Numerical condition(distributed damper, 5 MW)

	Summery
Grid	120×65×70(tunnel length : 12 m)
Fire model	at 1.3 m from tunnel inlet
	□ heat source : Q _{heat} = 5 MW □ smoke : Smoke = 1 (at Max. Q _{heat})
Turbulent	standard k-ε
Convergence	<0.01%
Iteration	5,000

급의 화재 실험을 통해 얻어진 입계유속인 0.51 m/sec 가 터널입구에 가해지고 부분제연갤러리의 풍속은 1.25 m/sec로 결정하였다.¹⁰⁾

4.2 해석결과

Fig. 3은 수치해석과 모델실험결과에 의한 제연갤러리의 배연효율을 비교하였다. 배연효율은 화원의 열량과 제연갤러리를 통하여 배연되는 열량의 비를 이용한 아래의 효율 계산식에 의하여 계산하였다.

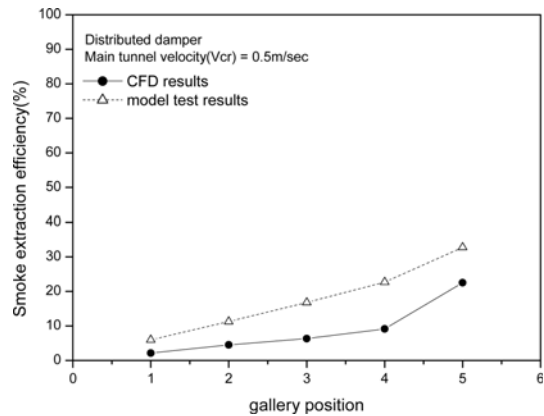


Fig. 3. The smoke extraction efficiency (CFD vs. model test).

$$\varepsilon = \frac{q_{es}}{q_s} = \frac{\rho(T)A_g v_g C_p(T)(T - T_{amb})}{q_s} \quad (6)$$

여기서, q_s : 화원에서 열량, (kW)
 q_{es} : 부분제연갤러리의 열량, (kW)
 $\rho(T)$: 온도(T)에서의 공기밀도, (kg/m³)
 A_g : 부분제연갤러리의 단면적, (m²)
 v_g : 부분제연갤러리의 유속, (m/sec)
 $C_p(T)$: 온도(T)에서의 정압비열, (kJ/kg K)
 T : 제연갤러리의 온도, (K)
 T_{amb} : 주변온도, (K)

수치해석을 통하여 계산된 배연효율을 축소모형실험 결과와 비교한 결과, 축소모형실험의 배연효율은 32%로 측정되었으나, 수치해석 결과 22%로 나타나 10%의 차이를 보였다. 이는 수치해석의 경우 열원에서 발생하는 연기량 산정의 부정확성에 기인하여 발생하는 오차일 것으로 예상된다. 실제로 가연물의 연기량은 현재 그 정확한 생성과정이 알려져 있지 않으므로 단순히 열량에 비례하도록 설정하여 해석에 이용한다. 이러한 가정은 연기의 고유 특성인 입자와 주위 공기와 밀도차이를 고려하지 못하므로 유동장의 해석이 정확하더라도 실험과 동일한 결과를 얻기에는 부족한 가장 큰 이유라 생각된다.

5. 제연설비 운영방안

5.1 해석조건

일정 공간에서 오염물질을 제어하기 위한 최선의 방법은 오염물질이 배출원에서 공간으로 확산되기 이전에 제거하는 것이다. 따라서 터널에서 화재가 발생하였을 경우도 발생지점 근방의 댐퍼만을 개방하여 터널 내부로의 확산을 방지한다면 보다 효율적인 화염 및

Table 5. Numerical condition (distributed damper, 20 MW)

Summary	
Simulation type	steady state
Grid	200×65×35(tunnel length : 800 m)
Fire model	at 90 m from tunnel inlet
	<input type="checkbox"/> heat source : $Q_{heat} = 20$ MW <input type="checkbox"/> smoke : Smoke = 1 (at Max. Q_{heat})
Turbulent	standard k-ε
Convergence	<0.01%
Iteration	5,000

연층의 제어방법이 될 수 있을 것이다. 따라서, Fig. 4에 나타난 바와 같이 터널내 화재 사고가 발생하였을 경우 화원 근방의 6개 균일댐퍼만을 개방하여 화원에서 발생하는 연층을 집중적으로 배연시키는 시스템에 대하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석을 위한 조건은 아래의 Table 4와 Table 5에 나타난 바와 같으며, 화재 규모는 20 MW로 설정하여 주터널 유속을 2.3 m/sec, 보조갤러리의 유속 18.9 m/sec이 가해지는 것을 기본적인 경계조건으로 설정하였다.

화재를 모사하기 위한 열원으로는 터널 입구에서 90 m 지점에 대형버스(20 MW)에서 화재가 발생하는 것으로 설정하였으며, 연기에 대한 특별한 모델은 없으므로 열원이 최고치일 때 연기의 강도를 1이라고 가정하여 이에 따른 상대적인 분포를 분석하였다. 또한 난류모델로는 standard k-ε 모델을 이용하였으며, 해의 변화량 0.01%(10⁻⁴) 이내를 수렴조건으로 설정하여 5,000 회의 반복 계산을 수행하였다. 격자는 비정열 격자를 적용하여 부분배연댐퍼 부분에는 비교적 많은 격자(길이방향 0.5 m)가 분포하게 구성하여 해석하였으며, 총 455,000개로 설정하였다.

Table 4. Boundary condition (distributed damper, 20 MW)

Inlet	Flow rate	Damper condition		Tunnel inlet velocity (m/sec)	Gallery exhaust velocity (m/sec)
		case 1.	group damper		
		case 2.	distributed damper 1. (all open)	2.3	18.9
		case 3.	distributed damper 2. (6 open)	2.3	18.9
	Temperature	15°C			
Outlet	Pressure	atmospheric pressure			
	Temperature	15°C			

- 비고) 1. 입구유속은 Kennedy' eq.에 의한 계산치임.
 2. 갤러리 유속은 기본설계안에 의한 가동조건임.
 3. case 2와 case 3에 자세한 사항은 Fig. 4 참조.

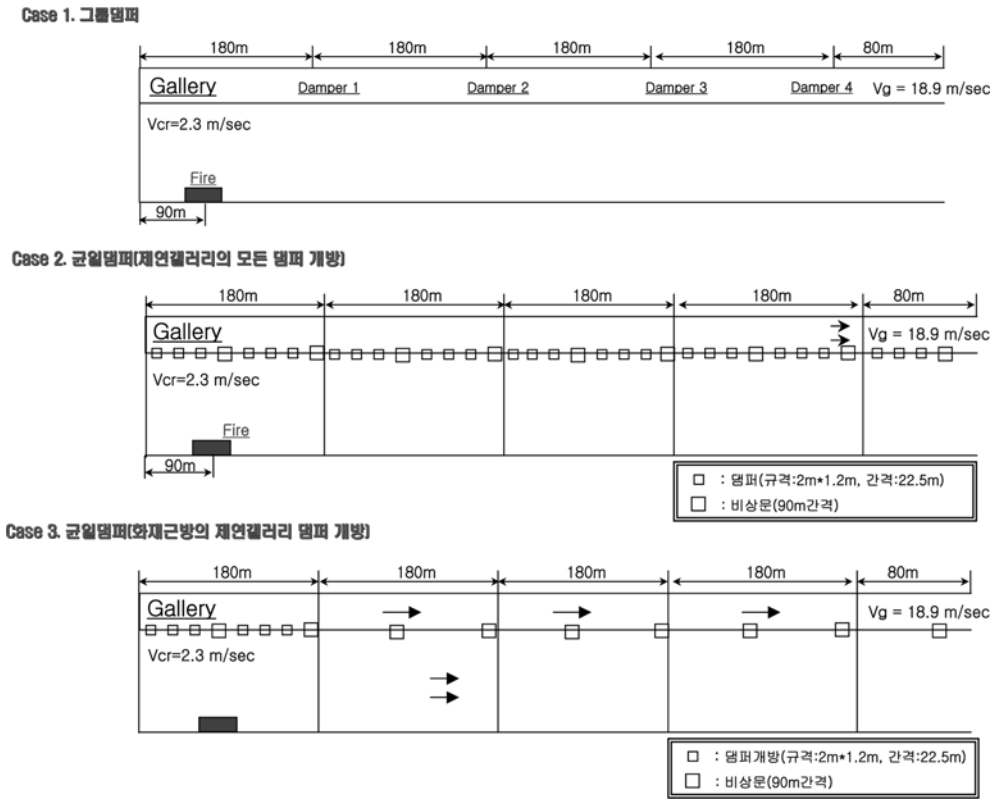


Fig. 4. The operation of distributed damper for case of tunnel fire.

5.2 해석결과

해석결과는 Fig. 5~7에 나타내었다. Fig. 7과 8은 터널의 폭방향(y축)의 중앙에서의 온도와 배연효율을 제시하고 있으며 모든 해석결과는 정상상태조건으로 시

간에 대한 변화가 없는 상태의 결과값이다. 화재 근방의 댐퍼만을 개방하였을 경우 모두 개방하였을 경우보다 주터널에서 연층의 천장부를 통한 이동 거리가 다소 감소함을 보임과 동시에 단면분포에서도 미세한 차

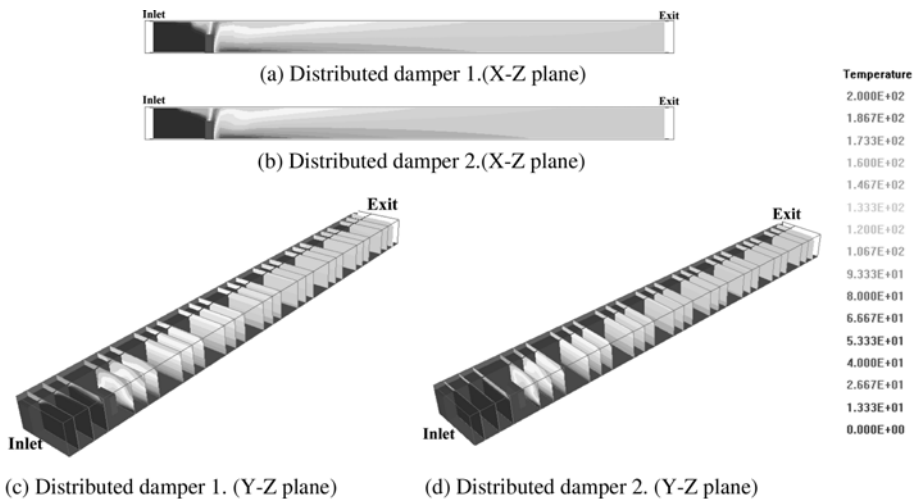


Fig. 5. CFD results (temperature).

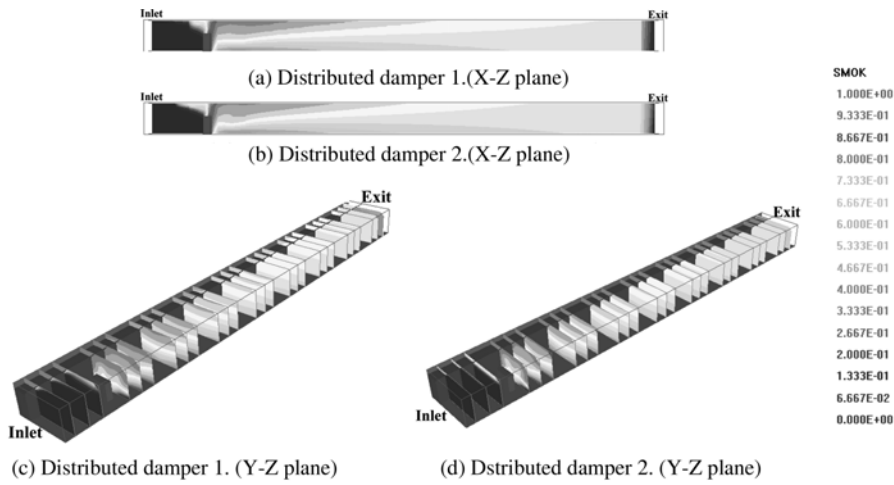


Fig. 6. CFD results (smoke).

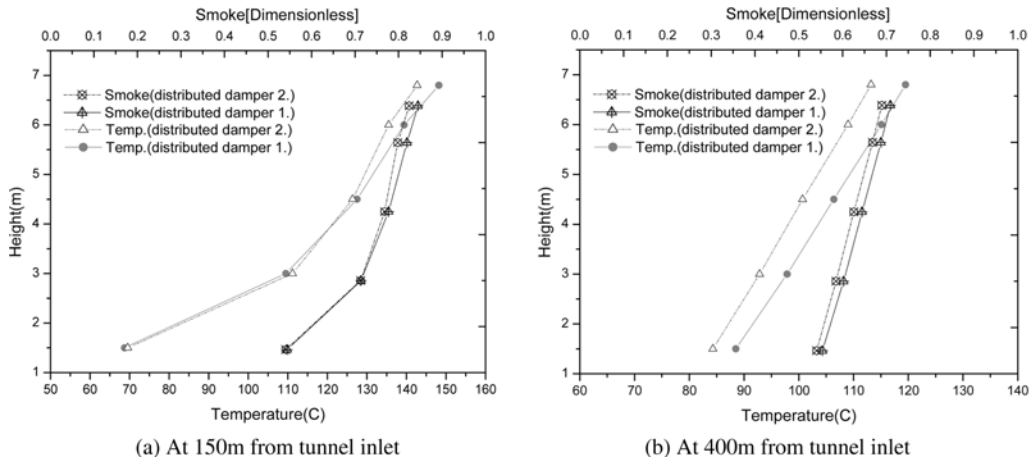


Fig. 7. CFD results of damper operation mode.

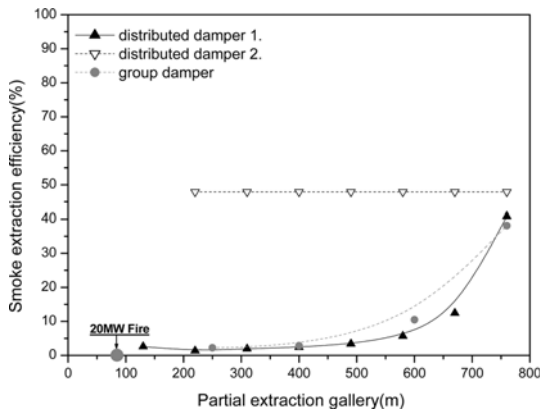


Fig. 8. The smoke extraction efficiency of damper operation mode.

이를 보여 비교적 동일함을 보인다. 그러나, Fig. 8에서 보는 바와 같이 제연 갤러리에서 배연효율을 보면 그룹댐퍼 38.1%, 균일댐퍼(모두 개방) 40.8%를 나타내고 있으나, 화재 발생 지점에서 균일댐퍼를 집중적으로 개방한 경우에는 47.9%로 전자의 두 경우보다 약 7~10% 이상 증가할 것으로 예상되어서 화원 근방의 댐퍼만을 개방하는 것이 연층 배연에 보다 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되었다.

6. 전체 화재 대응 시나리오

제연설비의 가장 큰 목적은 인명피해를 최소화하는 것이다. 본 침매터널 화재시 종류환기 방식의 제연설비에 의한 임계속도 2.3 m/sec(20 MW급 화재)¹¹⁾는 역

기류를 억제하는데 충분할 것으로 기대된다. 이 경우 터널내 차량의 흐름이 원활할 경우에는 화재 전방의 차량들이 출구측으로 계속적으로 진행하여 대피할 수 있기 때문에 화재 전후방의 승객들이 피난문을 이용하여 대피하는데 문제가 발생하지 않을 것이다. 그러나, 터널이 정체를 이루고 있어 화재 지점이 지난 출구측 방향에도 차량이 진행을 할 수 없을 경우에는 터널 입구쪽에서 가해지는 임계유속으로 인한 화염 및 연층에 승객들이 그대로 노출될 수 있는 위험한 상황이 발생하게 된다. 따라서, 터널이 정체를 이루고 있을 경우 화재 전방의 승객들도 대피할 수 있는 초기 대피 시간을 마련하기 위하여 연층의 하강을 최대한 억제할 수 있는 연기의 성층화를 유지하는 것이 필요하다. 이러한 성층화의 관점에서 볼 때, 화재의 초기에는 주터널의 제연설비를 가동하지 않고 보조갤러리의 제연설비만을 가동하여 연층이 터널 하부로 하강하는 것을 억제하는 방식이 고려되어야 할 것이다.

도로 터널의 방재 설비를 계획하기 위한 국내 기준¹²⁾에 따르면, 화재 발생시 화재를 감지(t_1)한 후 제트팬을 가동하여 목적인 임계유속에 도달하기까지의 목표 시간(t_2)은 2분 이내이며, 승객들의 대피까지를 고려한 초기 대응 시간은 10~15분으로 설정하고 있다.

보다 정량적인 피난 및 터널 배연설비 운영방안을 분석하기 위해서 Fig. 9에 본 침매터널의 화재시 예상되는 인간 반응시간과 배연설비의 운영에 대하여 도시하였다. 터널 내 화재가 발생하였을 경우 관련된 사람은 크게 3개의 그룹(detection, operation, evacuation)으

로 나눌 수 있다. 화재를 발견하는 그룹(detection)은 터널화재 목격자 또는 화재감지 시스템이 해당되고, 터널 운영자(operation)는 비상시 터널내의 안내방송과 경보를 하며 터널 제연시스템을 운영하는 사람을 의미한다. 마지막으로 피난(evacuation) 그룹은 터널 내 운전자로서 피난을 해야 하는 사람이다. 이러한 세 그룹이 화재의 인식부터 행동하는데 걸리는 전체시간은 크게 4가지로 세분화할 수 있다. 먼저 위험상황을 알리는 시간(warning time)과 인지된 위험상황을 인지하는 시간(reaction time), 어떻게 대처해야하는지 결정하는 시간(decision time) 그리고 행동하는데 걸리는 시간(movement time) 등이다. 이와 같이 세분화 된 시간으로부터 각각 인간패턴과 시간을 추정하여 각 단계별 반응시간을 Fig. 9와 같이 정할 수 있다.¹³⁾ 이 때 터널 운영측면에서는 앞의 결론과 같이 부분제연설비를 먼저 가동하여 배연과 성층화를 동시에 구현시켜 터널 내 운전자의 피난을 도와주는 역할이 먼저 필요하다. 부분제연을 시작하는 시간은 터널 운영자가 행동하는 시간 중간인 160초~270초 사이가 될 것이며 평균적으로 화재 발생으로부터 약 4분 후라고 판단된다. 또한 운영자가 초기의 비상조치를 한 후인 270초부터 터널 내 운전자의 대피가 시작되고 575초, 약 10분 후에 모든 대피 활동이 종료될 것이다. 그러므로 터널 운영자는 대피가 끝난 10분 후에 주터널 팬을 임계속도 이상으로 작동시켜 연기의 역기류를 발생시키지 않으며 배연을 하고 동시에 소방 활동을 시작하도록 운전하는 것이 타당할 것이다.

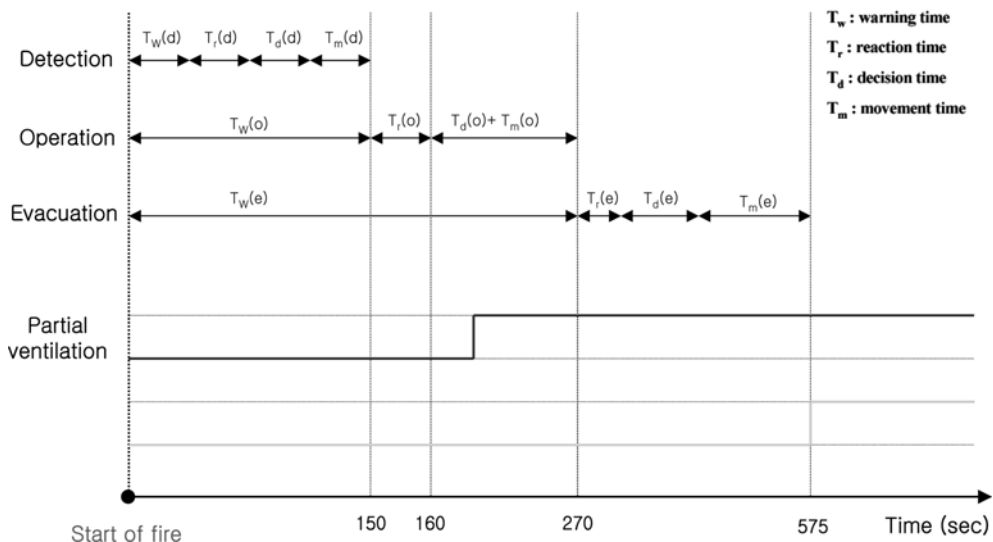


Fig. 9. Contributions to the total evacuation time for persons in tunnel.

또한, 일반적인 차량화재에서 화재가 활성화에 이르는 시간은 초기화재성장 모델인 $Q = \alpha t^2$ 법칙을 사용할 수 있다. 터널화재시 소형차 3대의 연속적인 사고를 가정하면 값은 0.008 KW/s^2 이고, 최대발열량은 16 MW 로 예측할 수 있으므로¹³⁾ 화재가 활성화하는데 걸리는 시간은 약 24분이다. 따라서, 이러한 대피 시나리오는 국내 도로터널 방재설비 계획을 위한 고려 사항을 모두 만족시킬 수 있으며, 화재가 완전히 성장하는 시간인 24분에 비해 작은 시간인 10분 정도에 모든 대피가 종료될 수 있다고 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 종류식 환기방안과 부분배연설비가 혼합된 터널을 대상으로 전산수치해석을 실시하였으며, 그 결과를 토대로 부분배연설비의 운영 방안을 고찰하여 다음과 같은 최종 결과를 얻었다.

- 1) 수치해석과 선행된 축소실험의 배연효율 비교는 약 30%의 오차를 나타내었다.
- 2) 20 MW급 화재를 실제규모 스케일의 터널에서 수치해석한 결과는 선행된 실험을 통하여 얻었던 균일덤퍼의 배연효율 및 연기의 단면분포에 의한 성층화에 대해 대체로 일치하는 경향을 나타내었다.
- 3) 균일덤퍼의 운영방안을 위한 수치해석결과, 화재 근방의 덤퍼만을 개방하였을 경우 약 7%의 배연효율 증가를 나타내어서 연층 배연에 보다 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되었다.
- 4) 터널내 차량의 정체시 사람의 피난과 관련된 제연설비 가동 시나리오는 화재 감지 후 터널내의 모든 사람이 각 방화문으로 대피하는 시간을 10분~15분으로 정하고, 이때는 대피에 도움을 주도록 부분제연갤러리만을 최대가동하여 연기의 성층화를 유도하면서 배연시킨다.

기호설명

- A_g : 부분제연갤러리의 단면적, (m^2)
 $C_p(T)$: 온도(T)에서의 정압비열, (kJ/kg K)
 q_s : 화원에서의 열량, (kW)
 q_{es} : 부분제연갤러리의 열량, (kW)
 T : 제연갤러리의 온도, (K)
 T_{amb} : 주변온도, (K)
 T_d : 행동을 결정시간, (sec)

- T_m : 행동하는데 소요되는 시간, (sec)
 T_r : 위험상황을 인지하는 시간, (sec)
 T_w : 위험상황을 알리는 시간, (sec)
 v_g : 부분제연갤러리의 유속, (m/sec)
 $\rho(T)$: 온도(T)에서의 공기밀도, (kg/m^3)

참고문헌

1. N. H. Danziger and W. D. Kennedy, "Longitudinal Ventilation Analysis for the Glenwood Canyon Tunnels", 4th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.169-181(1982).
2. D. Tetzner, R. Pollak, and M. sippel, "Critical Velocity - Comparative Assesment of Test Results and CFD Simulation", International Conference on tunnel fire and Escape from Tunnels, pp.181-190 (1999).
3. Y. Wu and M. Z. A. Baker, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation System - A Study of the Critical Velocity", Fire safety Journal, Vol. 35, pp.363-390(2000).
4. 최준석, 최병일, 김명배, 한용식, 장용재, 이유환, 황낙순, 김필영, "터널내 자동차화재와 풀화재 비교 분석", 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회, pp.5-36(2002).
5. 김정석, 신현준, 강세구, 안경철, 김택곤, "도로터널 제연설비 축소모형실험에 관한 연구", 한국터널공학회 2003 정기학술발표회 논문집, pp.12-22(2004).
6. 유용호, 윤찬훈, 윤성욱, 김진, "장대 교통터널의 피난연락개 설치 간격에 관한 실험적 연구", 터널과 지하공간, 제15권, 제1호, pp.61-70(2005).
7. 유용호, 윤찬훈, 윤성욱, 김진, "장대 교통터널 화재시 수직갱의 배연효과에 관한 실험적 연구", 터널기술, 제7권, 제1호, pp.27-36(2005).
8. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, "도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구", 터널기술, 제6권, 제2호, pp.129-139(2004).
9. GK해상도로주식회사, "침매터널 환기 및 제연방식 검토(안)"(2004).
10. 유용호, 이의주, 신현준, 신한철, 윤영훈, "터널화재시 부분배연설비에 의한 배연효율 향상에 관한 연구", 터널기술, 제8권, 제1호, pp.1-11(2006).
11. 한국건설기술연구원, "부산-거제 침매터널 환기 및 방재시스템 최적화 연구:1단계"(2004).
12. 건설교통부, "도로터널 방재시설 설치지침"(2004).
13. COWL, "Busan-Geoje Fixed Link, Immersed Tunnel: Partial Smoke Extraction System - CFD Calculation"(2004).