

화재강도변화에 따른 횡류식 대배기구 배연량 설정에 관한 연구

A Study on Setting Smoke Exhaust Rate According to the Transverse Ventilation with Oversized Exhaust Ports in Road Tunnel by the Variation of Fire Intensity

이동호[†] · 김하영*

Dong-Ho Rie[†] · Ha-Young Kim*

인천대학교 안전공학과, *인천대학교 안전공학과 대학원
(2007. 9. 20. 접수/2007. 10. 29. 채택)

요 약

최근에 양방향 도로터널에서 배연효율의 증가가 요구됨에 따라 대배구에 의한 횡류식 양방향터널 배연 시스템 적용이 증가되었다. 본 연구에서는 FDS Ver4.0을 사용한 수치해석을 통해 배연량과 화재강도를 변화시켜 최적배연조건을 도출하였다. 결과로, 터널 내부로 외부기류가 유입되는 경우에는 배연량을 증가시켜야 하는 것으로 나타났으며 화재지점으로 2.5 m/s의 속도로 외기가 불어올 때 연기가 250 m 이내로 제어되는 대배기구의 배연용량은 244.8 m³/s의 값으로 제어되어야 한다.

ABSTRACT

Recently, the application of transverse ventilation system in accordance with oversized exhaust ports has been increased in bidirectional road tunnel in order to improving smoke exhaust ability. In this study, numerical simulations were carried out by using FDS (ver. 4.0) which includes variations of exhaust flow rates and heat release rate of fire to obtain the optimal smoke exhaust rate in case of fire in the transversely ventilation system. As a result, smoke exhaust amount tends to increase when the inner velocity is existing in the tunnel. In case of internal longitudinal air velocity 2.5 m/s face to the fire, smoke moving distance should be restricted within 250 m when the smoke exhaust rate which exceeds 244.8 m³/s.

Keywords : Tunnel fire, Transverse smoke exhaust system, Oversized exhaust ports

1. 서 론

도로터널은 일반건물 구조물과는 달리 반밀폐 공간의 구조와 교통이 결합된 특수성으로 인하여 화재 발생 메커니즘과 화재시 신속한 대피유도 및 대피의 용이성이 매우 낮은 특성을 나타낸다. 이러한 구조적 특성의 심각성으로 건교부는 2006년도부터 지하터널의 방재기능 강화와 화재시 지하역사의 신속한 화재진압 및 대피를 위해 제연시스템과 자동제어설비 등 소방설비를 연차적으로 보강해 나가고 있으며 일반적으로 연장이 1000 m 이상인 도로터널에서는 화재시에 대비하여 제연시설을 설치하도록 정하고 있다.

국내 터널화재는 홍지문터널 및 대구지하철 화재사고를 대표적으로 들 수 있다. 또한, 국외의 경우 몽브랑 터널과 고타드 및 Channel 터널 화재사고는 터널 화재시 초기에 대피로 확보 수단으로 가장 유효한 방법으로 제연설비 설치 운영의 중요성에 대해 일깨워 준 사례라 할 수 있다.^{2,4)} 따라서, 터널 화재시 가장 시급히 선행되어야 할 분야로는 연기배출 제어 연구라 할 수 있다.

제연설비의 운영계획은 외국의 경우 화재시 초기대응을 위해서 가장 중요한 사항으로 인식하여 구체적인 계획을 수립하고 있으나 국내의 경우 이에 대한 정보 및 관련 연구는 미비한 실정으로 구체적인 운영계획을 수립하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 배연설비 운영의 표준화를 위한 대책 및 연구가 절실히 요구된다.

[†]E-mail: riedh@incheon.ac.kr

또한 화재시 초기대응을 위한 구체적인 시나리오 작성 기준 및 유지관리기준의 미비는 터널내 화재 발생 시 화재 확대 가능성을 높이는 결과로 다수의 인명피해를 발생시킬 수 있다. 따라서, 화재시 대피의 원활화와 연기에 의한 질식 피해의 최소화를 위하여 발생연기의 최적 배연량 산정을 토대로 운영기법의 개발이 시급히 요구된다.

터널내 피난 연락갱의 간격은 현재 도로터널 방재시설 설치지침¹⁾에 규정된 250 m로 설정되어 있으므로, 연기의 전파를 250 m로 제한하기 위한 배연풍량 산출을 위하여 배기포트로 대배기구를 채택하였다. 본 연구는 터널 화재시 제연설비 운영에 필요한 프로그램 제어 데이터베이스 구축을 목표로 화재강도(passenger car: 5 MW, bus:20 MW, lorry:50 MW) 변화에 따른 전산시뮬레이션을 수행하였다.

2. 각국의 횡류환기방식 기준

도로터널에서 화재가 발생하는 경우 배연은 상시 운영되고 있는 환기설비를 이용하여 수행되며 연기를 화재공간에서 완전히 제거하는 횡류식 배연(smoke exhaust) 시스템을 Figure 1에 나타낸다.

각국의 횡류 환기방식을 활용한 배연방식에 대한 관련 기준은 다음과 같다.

① 배연량 산정을 위한 화재강도는 20~50 MW이며, 연기발생량은 대부분의 국가가 20~30 MW 기준 80 m³/s로 정하고 있다.

② 정체가 심한 일방향 터널 및 대면통행 터널에서는 종류환기방식의 적용을 지양하고 횡류환기방식을 적용하고 있다. 터널연장이 600 m 이상인 경우 기류의 제어가 가능한 대배기구 방식을 적용하는 추세이다.

③ 횡류환기방식을 적용하여 화재지점에서 배연하는 경우 터널 내 기류의 제어를 위해 대배기구(single point exhaust system)나 개별적으로 개폐가 가능한 대배기구(Oversized exhaust system)를 적용할 것을 권장하고 있다.

④ 배연풍량은 대부분의 국가에서 신선공기의 유입 및 기류제어를 위한 추가적인 풍량을 고려하여 Table 1과 같이 배연풍량을 정하고 있다.

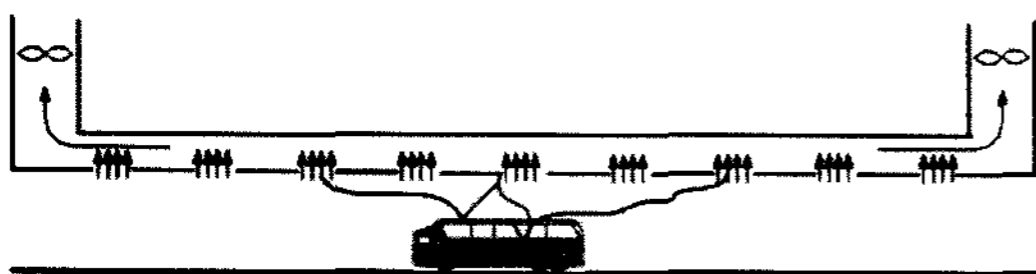


Figure 1. Oversized smoke exhaust system.

Table 1. Comparative of moke exhaust system

국가	배연풍량	비고
미국	[화재강도 20 MW] -균일배기방식 (single zone transverse ventilation System) : 0.155 m ³ /s · lane · m	600 m 기준 배연풍량 : 186.0 m ³ /s
	-대배기구방식 (Oversized Exhaust port system) : 0.132 m ³ /s · lane · m	158.4 m ³ /s
	[화재강도 50 MW] -대배기구방식 (Oversized Exhaust port system) : 0.170 m ³ /s · lane · m	204.0 m ³ /s
독일 (RABT02)	$Q_e = A_r \cdot V_r + Q_s$	$V_r = 3.0 \text{ m/s}$ 600 m 기준 배연풍량 : 215.6 m ³ /s
프랑스 (CETU02)	$Q_e = A_r \cdot V_r + Q_s$	최소배연량 $\geq 110 \text{ m}^3/\text{s}$ 종방향 풍속 제어가 이루어지지 않은 경우에는 $V_r = 1.5 \text{ m/s}$ 로 한다 예) 몽브랑 터널 : $150 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 600 \text{ m}$ $= 80 + 45.2 \times 1.5$ $= 147.8 \text{ m}^3/\text{s}$
오스트리아	$\geq 80 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{fire zone}$	80 m ³ /s
스위스	$\geq 80 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$	80 m ³ /s
한국 기계 연구원	0.17 m ³ /s	6 MW, 100 m 연기확산 600 m 기준 배연풍량 : 102 m ³ /s

⑤ 화재시 배연시스템의 운영은 대피가 일방향으로 진행되는 경우 화재지점의 풍속을 3 m/s 이하로 유지하며, 대면통행터널과 같이 양방향으로 진행될 가능성이 높은 화재지점의 풍속을 0 m/s로 하고 화재지점으로 최소 1.5 m/s 정도의 풍속이 형성되도록 운영 또는 종방향 풍속을 최대한 감소하여 배연하도록 정하고 있다.

3. 수치시뮬레이션에 의한 배연량 해석

횡류환기방식의 적용터널에서 화재강도별로 터널내 풍속 및 배연풍량을 변수로 연기의 이동거리를 분석하였으며 최적배연량 산정을 목표로 다음과 같이 수치시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 배연량의 산정

화재시 배연은 주행 공간에서 이루어지기 때문에 연기와 함께 주변의 공기가 같이 유입되게 되므로 배연을 위한 환기기 용량은 연기발생량 보다 현저히 증가한다는 점을 고려하여야 한다. 배연용량 Q_E 는 반횡류 또는 횡류 환기방식을 전제로 화재발생 후 가능한 터널내 유속과 연기발생량(Q_s)을 바탕으로 산정하며 식 (1)과 같다.

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

여기서, Q_s : 연기발생량(m^3/s), A_r : 터널단면적, V_r : 기류의 방향성제어를 위한 풍속을 나타낸다.

3.2 경계조건

본 연구에 활용된 프로그램은 FDS Ver.4⁵⁾를 사용하여 화재강도에 따른 비정상(unsteady) 연기농도, 온도, 이산화탄소, 일산화탄소 농도를 ASCII 값으로 데이터베이스화하여 평가를 수행하였다. FDS는 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 화재 전용 수치해석 프로그램으로서 화재에 의해 유도되는 연기와 온도의 유동예측에 널리 사용되며 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 계산한다. Figure 2는 횡류 대배기구 방식의 개략도이다. 계산에서는 포트의 수가 서로 다른 2종류의 배기방식을 수치해석하였다. 화재강도 및 화재성상은 Table 2에 표시된 바와 같이 적용을 하였으며 Table 3은 본 연구에 적용된 수치해석 조건이며 다음은 터널제원을 나타낸다. 또한 터널내 풍속이 연기 이동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 방재시 PIARC⁶⁾에서 버스나 트럭 화재의 경우 제시하고 있는 터널내 방재 기류속도인 2.5 m/s와 다양한 비교를 위해 1.25 m/s의 경우를 적용하였다.

- (1) 모델터널연장 : 900 m
- (2) 차도단면적 : 54.94 m²
- (3) 높이 : 4.8 m(천정고)
- (4) 화재강도 : 5, 20, 50 MW
- (5) 화원의 크기: 2.5(W)×3.2(H)×12.0(L)m
- (6) 터널내풍속 : 0.0, 1.25, 2.5 m/s(화점풍속기준)
- (7) 배연방식: 배기구방식

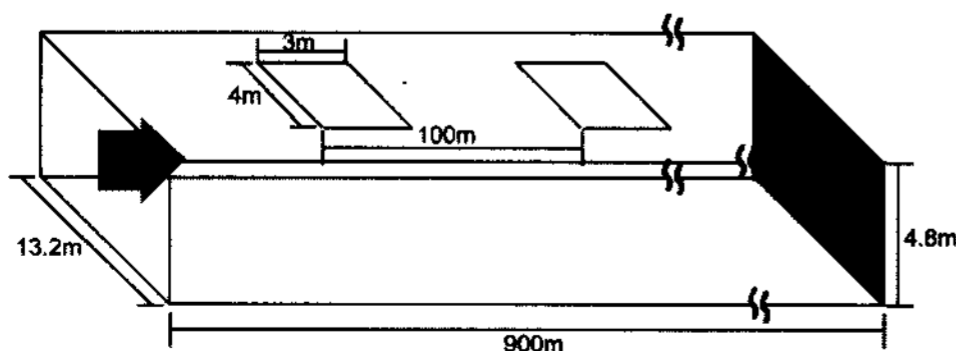


Figure 2. Tunnel dimension.

Table 2. Heat release rate and fire curve

화재강도(MW)	5.0	20.0	50.0	
총발생열량(GJ)	6	41	65	
growth rate (α)	0.025	0.1	0.215	
감쇄율 (β)	0.002	0.001	0.001	
성장시간(Sec)	450.0	450.0	490.0	
누적열량 (GJ)	성장과정	0.78	3.14	8.69
	감쇄과정	2.47	28.64	51.00
	유지과정	2.75	9.22	5.31
유지시간(Sec)	135.6	455.3	102.9	

Table 3. Simulation conditions

배기 방식	배기구 사양	배기구 간격	배연풍량		
			Vr (m/s)	Qe (m ³ /s)	Port 풍량
대배기구 방식(I)	3(L)×4(W)×1개소	100 m 간격 화점기준: -150, -50, 50, 150 m (4개소)	0	80	20.0
			0.5	107.5	26.9
			1.0	134.9	33.7
			2.0	189.9	47.5
			3.0	244.8	61.2
대배기구 방식(II)	3(L)×4(W)×1개소	100 m 간격 화점기준 100, 200 m (2개소)	0	80	40.00
			0.5	107.5	53.74
			1.0	134.9	67.47
			2.0	189.9	94.94
			3.0	244.8	122.41

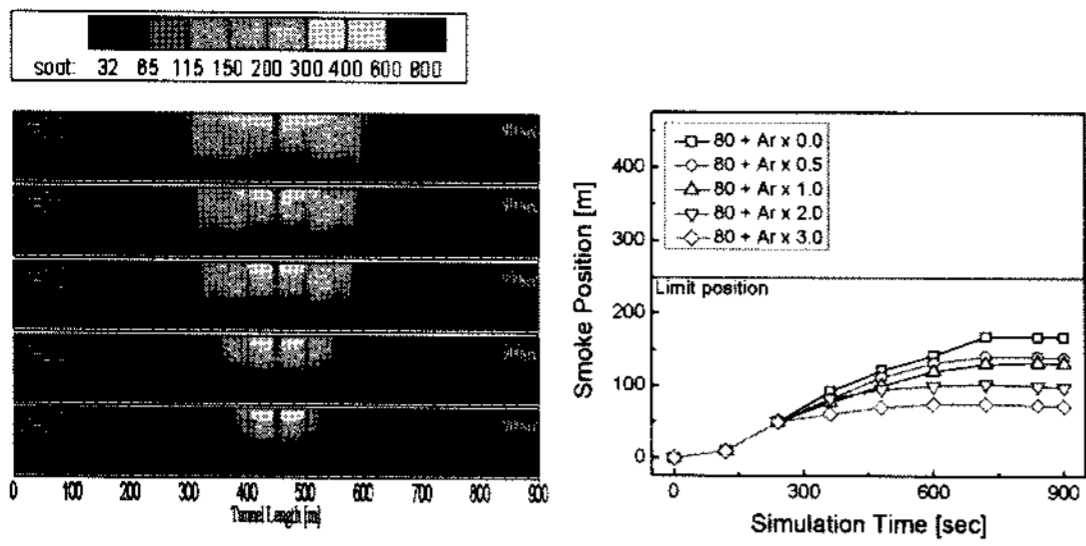
4. 시뮬레이션 결과

도로터널 방재시설 설치지침에 피난연락갱 간격이 250 m 간격으로 규정되어 있는 바, 연기의 이동거리를 250 m로 제한하면 안전한 대피가 이루어질 수 있다는 관점에서 연기의 이동거리가 250 m로 제한할 수 있는 풍량을 최적풍량으로 설정하였다.

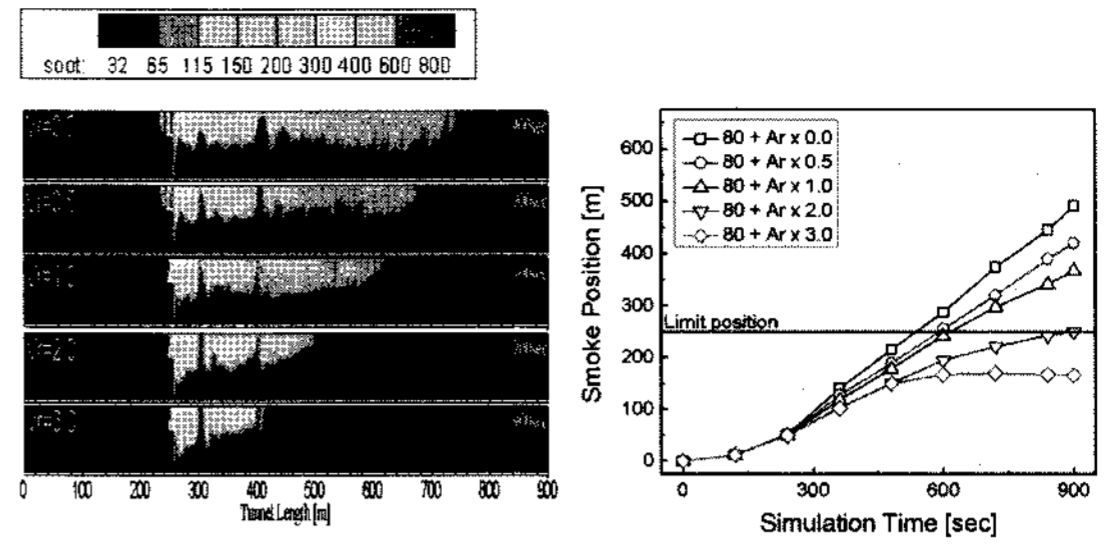
연기의 농도는 NFPA 130의 기준을 적용하여 비반사체를 20 ft에서 구분할 수 있는 연기농도인 65 mg/m³를 기준으로 연기 이동거리를 산출하였다.

4.1 터널내 풍속이 존재하지 않는 경우의 배연풍량 산정

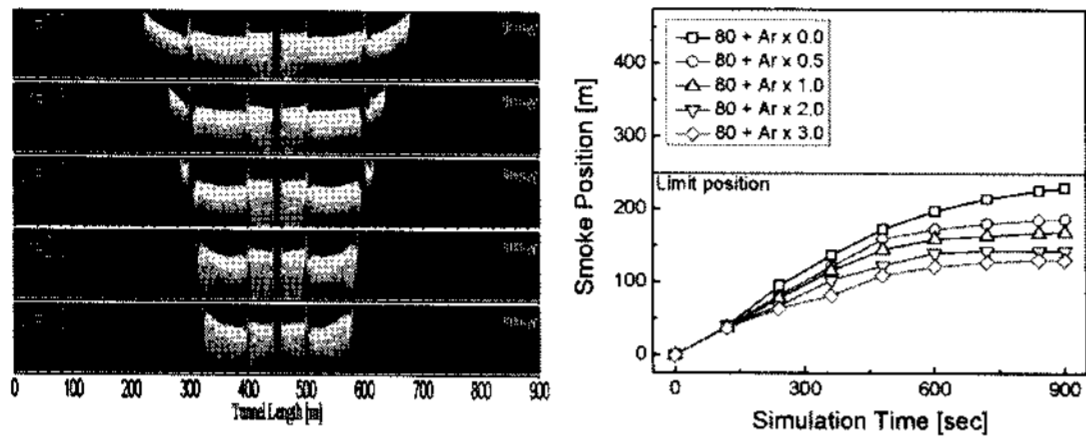
Figure 3은 대배기구(I) 방식으로 터널내 풍속이 존재하지 않는 조건을 기준으로 화재강도를 각각 5, 20, 50 MW로 변화시켜 얻어진 연기 농도분포도 및 65 mg/



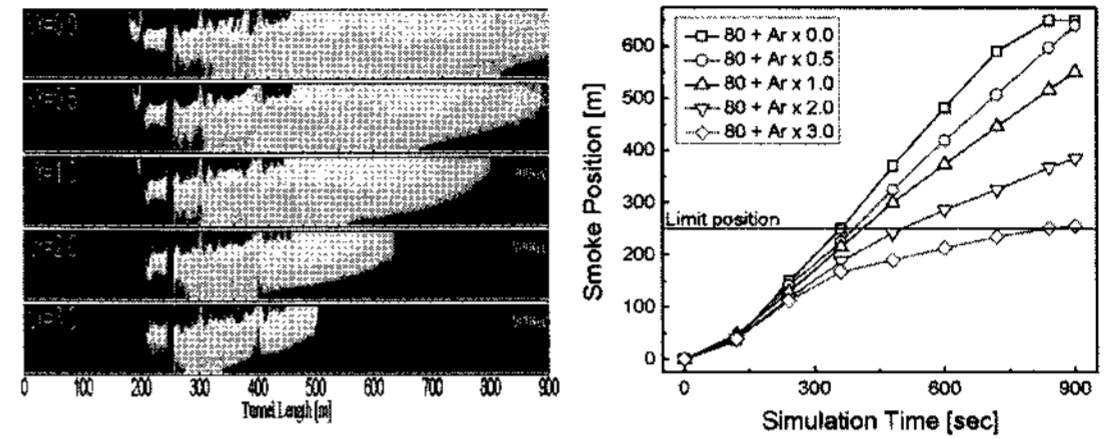
(a) 5MW



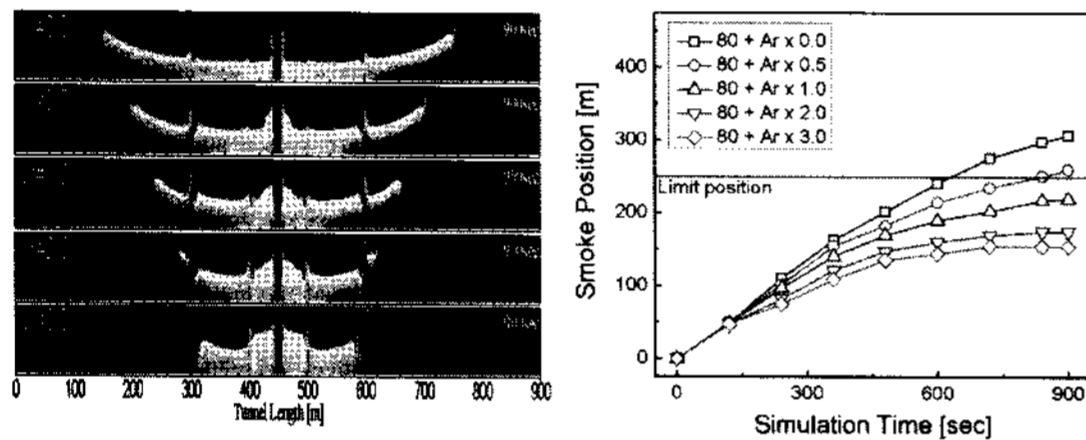
(a) 5MW(type I)



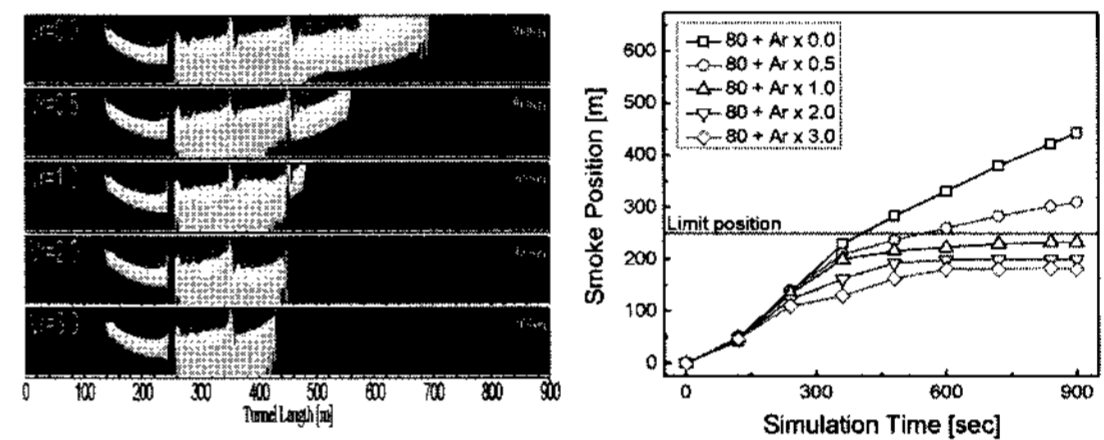
(b) 20MW



(b) 20MW(type I)



(c) 50MW



(c) 20MW(type II)

Figure 3. Smoke distribution and its distance for the tunnel air velocity 0.0 m/s (type I).

m^3 에 도달하는 연기 이동거리를 나타낸다. 연기 이동 특성은 터널의 양방향으로 대칭현상을 이루어 확산된다.

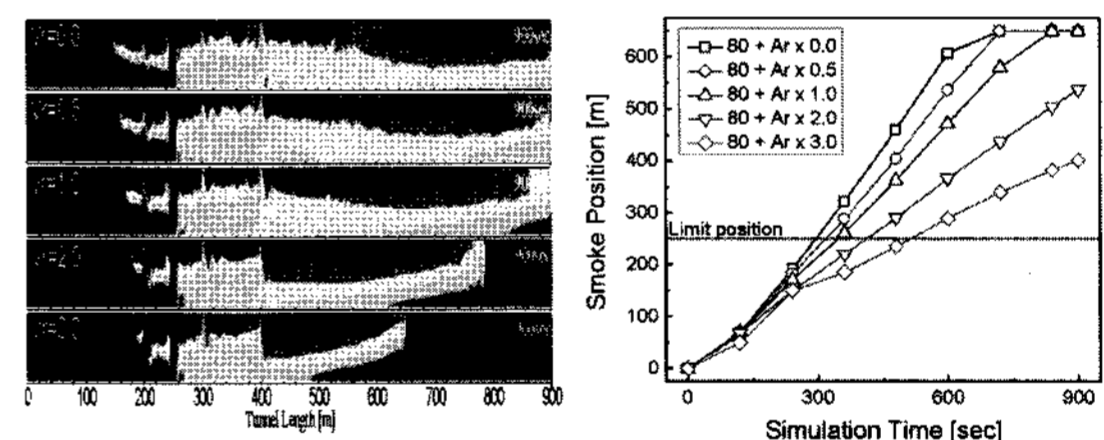
(a)는 이동거리를 시간의 경과에 따라 화재강도 5 MW 경우 연기이동거리를 나타내며 결과적으로 $80 m^3/s$ 이하의 값으로 250 m 이내에서 연기제어가 될 수 있다.

(b)는 화재강도 20 MW 조건에서 연기이동거리를 나타내며 상하류의 2개소의 포트를 개방하는 경우에 최적 배연량 $80 m^3/s$ 를 만족하는 것으로 나타났다. (c)는 화재강도 50 MW 조건에서 연기이동거리를 나타내며 화재강도에 비례하여 연기발생량의 급격한 증대로 배연 풍량은 $134.9 m^3/s (V_r = 1.0 m/s, 130.5 m^3/s \cdot 600 m)$ 로 나타났다.

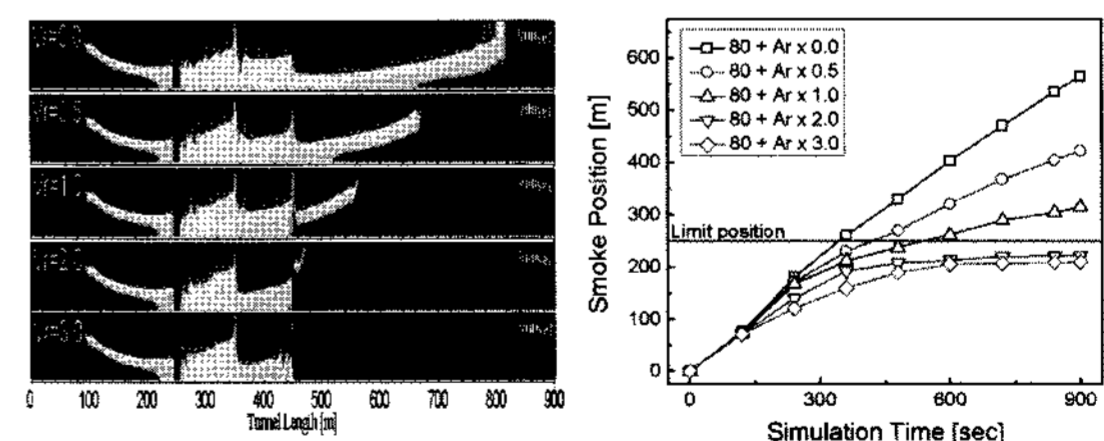
4.2 터널풍속 1.25 m/s 존재 시 배연풍량 산정

Figure 4는 터널내 1.25 m/s의 풍속이 존재하는 조건을 기준으로 화재강도를 5, 20, 50 MW로 변화시켜 얻어진 연기의 농도분포도 및 이동거리를 나타낸다.

대배기구(I) 조건 화재강도 5 MW 경우의 연기이동



(d) 50MW(type I)



(e) 50MW(type II)

Figure 4. Smoke distribution and its distance for the tunnel air velocity 1.25 m/s.

거리를 (a)에 나타내며 V_r 이 2.0 이상의 조건에서 연기 이동을 화재지점으로부터 250 m 이하로 제어시킬 수 있는 것으로 나타났다.

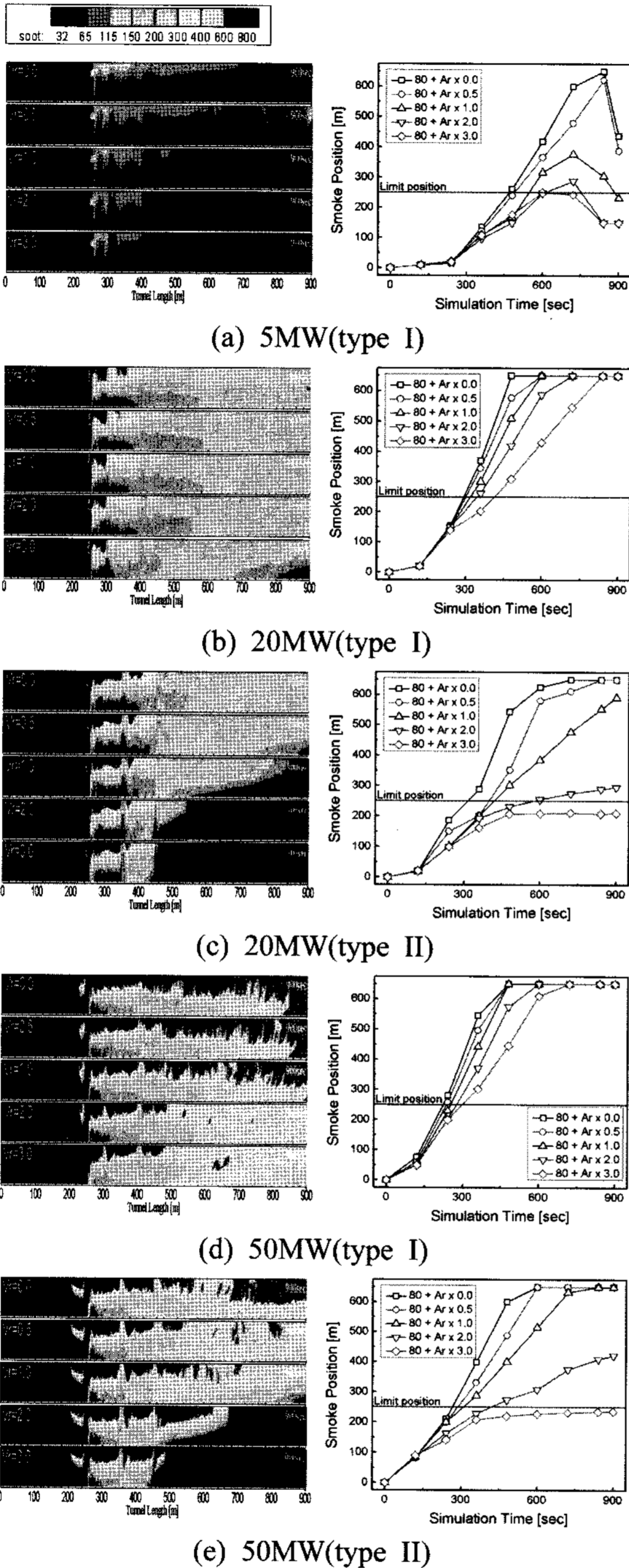


Figure 5. Smoke distribution and its distance for the tunnel air velocity 2.50 m/s.

화재강도 20 MW 및 50 MW 조건에서 연기이동거리를 (b)~(e)에 나타내며 대배기(I) 조건의 경우 시뮬레이션 최대 조건인 V_r 이 3.0인 경우에도 제어가 되지 않는 반면 대배기(II) 조건의 경우 20 MW와 50 MW 강

Table 4. optimum exhaust control volume for oversized port

Tunnel inner air velocity (m/s)	Type	Smoke exhaust amount (m^3/s) to control the smoke moving within 250 m		
		5 MW	20 MW	50 MW
0	I	80 ($V_r = 0.0$)	80 ($V_r = 0.0$)	134.9 ($V_r = 1.0$)
1.25	I	189.9 ($V_r = 2.0$)	more then 244.8	more then 244.8
	II	-	134.9 ($V_r = 1.0$)	189.9 ($V_r = 2.0$)
2.5	I	189.9 ($V_r = 2.0$)	244.8	244.8
	II	-	244.8 ($V_r = 3.0$)	244.8 ($V_r = 3.0$)

도의 화재 발생시 각각 $V_r = 1.0$ 과 2.0 이상에서 연기의 이동이 효율적으로 제어되는 것으로 나타났다.

4.3 터널풍속 2.5 m/s 존재 시 배연풍량 산정

Figure 5는 터널내 2.5 m/s의 터널내 풍속이 존재하는 조건을 기준으로 화재강도가 각각 5, 20, 50 MW로 변화시켜 수치해석한 결과의 연기의 농도분포도 및 이동거리를 나타낸다.

대배기구(I) 조건 화재강도 5 MW 경우의 연기이동거리를 (a)에 나타내며 V_r 이 2.0 이상일 시에 연기의 이동이 화재지점으로부터 250 m 이하로 제어될 수 있는 것으로 나타났다. 화재강도 20 MW 및 50 MW 조건하에서 연기이동거리를 (b)~(e)에 나타내며 대배기(I) 조건의 경우 시뮬레이션 최대 조건인 V_r 이 3.0인 경우에도 제어가 되지 않는 반면 대배기(II) 조건의 경우 20 MW와 50 MW 강도의 화재 발생시 $V_r = 3.0$ 에서 연기의 이동이 제어되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 대배기구방식을 적용한 횡류환기방식에서 적정 배연풍량 산정을 위해 화재강도를 5, 20, 50 MW로 변화시켜 수치시뮬레이션을 수행하여 연기 이동제어에 대해 검토 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 터널내 풍속을 0 m/s로 가정하는 경우, 성층화에 유리하며 이로 인해서 배연풍량이 연기발생량 이상에서는 터널내 전구간에서 안전한 대피가 이루어질 수 있음을 밝혔다.
2. 터널풍속이 화점기준 1.25 m/s인 조건하에서 화재

강도가 20 MW인 경우 대배기구방식(I)의 최적배연량은 $244.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V_r = 3.0 \text{ m/s}$, $61.2 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{port}$)이며 대배기구방식(II)의 최적배연량은 $134.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V_r = 1.0 \text{ m/s}$, $67.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{port}$)의 값을 갖는다.

3. 터널풍속이 화점기준 1.25 m/s 인 조건하에서 화재강도가 50 MW인 경우 대배기구(II)의 최적배연량은 $189.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V_r = 2.0 \text{ m/s}$, $95 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{port}$)의 값을 갖는다.

4. 터널풍속이 화점기준 2.5 m/s 인 조건하에서 대배기구방식(II)를 적용하는 경우 최적배연량은 $244.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V_r = 3.0 \text{ m/s}$, $123 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{port}$) 값을 갖는다.

5. 화점에서 풍속이 존재하는 경우에 배연량이 급격하게 증대하는 것으로 나타났으며 화점에서 풍속이 2.5 m/s 인 경우 포트당 풍량값으로 $122.4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{port}$ 이상이 되어야 연기의 이동거리를 250 m 이하로 제한시킬 수 있다.

감사의 글

본 논문은 인천대학교 2007년도 자체 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 도로터널 방재시설 설치지침, 건설교통부(2004).
2. 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구단, "2.18 대구 지하철 화재 조사연구 백서", 경북대학교 도시환경설비 연구실(2004).
3. F. Sergiu, "Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel - Status Report of April 13, 1999" (2000).
4. B. Bettelini and A. Henke, "Upgrading the Ventilation of the Gotthard Road Tunnel", 11th Int. Sym. on the Aero. and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRGroup, pp.29-45(2003).
5. McGrattan K, editor, "Fire Dynamics Simulator (version 4) Technical Reference Guide", NIST, (2005).
6. "Road Tunnels: Emissions, Ventilation and Environment", PIARC(1995).
7. 유지오, 이동호, 김치경, 신현준, "반횡류식 환기설비를 활용한 화재시 터널 방재연구", 2005년 한국화재소방학회 춘계학술논문발표 논문집, pp.131-137 (2005).
8. FHA, "Memorial Tunnel : Fire Ventilation Test Program, CD-ROM and Comprehensive Test Report", Messachusetts Highway Dept.(1996).
9. "NFPA 502 Standard for Road Tunnel, Bridges and Other Limited Access Highways, Quincy, Massachusetts, 1998 Edition", NFPA(1998).
10. "Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von StraBentunneln", RABT, Germany(2002).
11. "Circulaire Int. N° 2000-82 DU relative à la réglementation de la circulation des véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers du réseau national", CETU, France (2000).
12. O. Vauquelin and D. Telle, "Smoke Control in Tunnel Fires - Should we Talk about Critical Velocity or Critical Mass Flow Rate", 10th Int. Sym. on the Aero. & Vent. of Veh. Tunnels, pp.97-103(2000).
13. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, "도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구", 한국터널공학회 논문집, Vol.6, No.2, pp.129-140(2004).