

제트팬 이격거리에 따른 연기제어특성에 관한 연구 A Study on Smoke Control Characteristic by the Effect of Jet Fan Installation Distance

김종윤[†] · 전용한* · 서태범* · 유지오** · 이동호***

Jong-Yoon Kim[†] · Yong-Han Jeon* · Tae-Beom Seo* · Ji-Oh Yoo** · Dong-Ho Rie***

인하대학교 기계기술공동연구소, *인하대학교 기계공학과, **신홍대학 건축설비디자인과,
***인천대학교 안전공학과
(2007. 10. 18. 접수/2008. 1. 16. 채택)

요 약

본 연구에서는 도로터널에서의 화재발생 시 최적의 방재시스템을 구축하기 위하여 실제 터널의 축소모형을 대상으로 제트팬의 위치 및 운전방식에 따른 연기의 유동 및 교란을 가시화함으로써 연기의 전파특성을 고찰하여 제트팬 운전방식의 타당성을 연기의 농도 분포에 의하여 검토하였다. 실험 결과로 화원으로부터 상류방향으로 근접한 제트팬 운전 시에는 연기의 역류를 방지하기 위하여 화원과 제트팬의 거리는 최소 50 m 이상 이격시켜야 한다. 반면에 화원으로부터 하류방향으로 근접한 제트팬 운전 시에는 모든 조건에 대하여 연기의 역류가 발생하지 않으나 하류방향으로 흐르는 연기의 성층화에 영향을 주기 때문에 사용이 불가능하다.

ABSTRACT

In this research, the visualization experiment for a scaling tunnel was conducted to establish the optimum fire protection system in tunnel fires. In order to find the optimal operating condition of jet fan with the fire, the characteristics of smoke propagation was considered to find the optimal operating condition of jet fan at the time of tunnel fire. the concentration of smoke was measured experimentally for various jet fan position and it's operating condition. As a result, when jet fan in the vicinity of fire operates at the upstream, the back-layering of the smoke should be considered with separation distance from the fire source. The distance between the jet fan and the fire should be longer than 50 m. On the other hand, when the vicinity jet fan operates at the downstream, the back-layering of smoke does not occur, but stratification is not maintained because the smoke dispersion occurs at the downstream due to the operation of the jet fan.

Keywords : Visualization, Jet fan, Stratification, Tunnel fire

1. 서 론

도로터널 화재 시 터널환기시스템의 중요한 목표중 하나는 화재발생으로 인해 정차되어 있는 차량과 탈출하려는 사람에게 연기가 이동하지 못하도록 억제하는 것이다.

현재 대부분의 종류환기방식 터널에서는 제트팬을 이용한 환기방식을 채택하고 있으며 화재 발생 시 풍속을 조절함으로써 연기를 제어하고 있다. 이 때 적절

한 임계풍속의 공급이 이루어지지 않고 작은 풍속이 공급되는 경우는 터널의 상류방향으로 연기의 역류현상이 발생하며 과도한 풍속이 공급되는 경우는 연기의 성층화가 유지되지 못하고 연기가 터널의 하부까지 하강하게 되어 대피하는 사람들의 피난활동에 대해 악영향을 미치게 된다. 따라서 터널에서는 화재발생 시 성층화를 유지하면서 역류현상을 억제하기 위한 최소풍속인 임계풍속으로 연기의 방향을 제어¹⁾하여야 하며 이에 따라 많은 연구들이 수행되어 왔다.

Tetzner²⁾는 임계풍속에 대하여 수치해석을 실시하였으며, Wu와 Bakar³⁾는 터널의 형상에 따른 임계풍속결

[†]E-mail: sweat100@hanmail.net

정에 하여 연구를 하였다. 또한 Oka와 Atkinson⁴⁾은 아치형 터널에서 프로판가스를 화원으로 사용하여 연기 역류제어에 관련된 화원 위치와 버너 형상에 관한 연구를 실시하였다. 그러나 이에 따른 적절한 임계풍속을 공급할 경우에도 제트팬의 이격거리 및 운전방식에 따라 연기의 교란 특성이 상이하게 나타나게 된다. 화원과 제트팬의 이격거리가 작은 경우 제트팬의 영향에 의한 2차유동이 발생하여 연기가 역류하며 하류측 제트팬을 운전할 경우 제트팬에 의한 교란으로 성층화가 불가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 도로터널에서의 화재발생 시 최적의 방재시스템을 구축하기 위하여 실제 터널의 축소모형을 대상으로 제트팬의 위치 및 운전방식에 따른 연기의 유동 및 교란을 가시화함으로써 연기의 전파특성을 고찰하여 제연팬으로서 운전방식의 타당성에 대하여 검토하고 화재발생 시 적절한 운전방식을 도출하고자 한다.

2. 이 론

2.1 가시거리와 연기의 농도

도로터널 화재 시 가시거리는 연기의 농도에 영향을 받으며, 이 때 연기의 농도는 일반적으로 발광원에서 발광한 빛의 강도와 일정한 거리 L에 위치한 수광원에 도달되는 빛의 강도 비를 나타내는 소광계수(extinction coefficient, K)에 의해서 평가된다.

먼저 발광원에서의 광의 강도를 I_1 , 수광원에서의 광의 강도를 I, 두 광의 거리를 L이라 하면 소광계수 K의 관계는 식 (1)과 같다.

$$I/I_1 = e^{-KL} \quad (1)$$

여기서 I/I_1 는 투과도 T로 나타낼 수 있으며 $T = I/I_1$ 를 이용하여 식을 다시 정리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \frac{1}{T} = K \cdot L \quad (2)$$

연기에 의한 빛의 소멸은 빛의 전파 경로상에 탄소 입자에 의한 빛의 흡수에 의해서 발생하므로 소광계수는 연기(smoke particle) 농도에 영향을 받게 되며, 소광계수 K와 연기농도(ρY_s , density of smoke particulate)의 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$K = K_m \cdot \rho Y_s \quad (3)$$

여기서 K_m : Specific extinction coefficient, $7.6 \text{ m}^2/\text{g}$ 이다.

또한 소광계수 K와 가시거리 S의 관계는 식 (4)로 표현된다.

$$S = C/K \quad (4)$$

여기서, C는 상수로 연기의 종류 및 상황에 따라서 달리 적용되고 있으나 일반적으로 빛을 발광하는 물체에 대해서는 $C=8$ 이며, 반사체에 대해서는 $C=3$ 을 적용한다.

따라서 가시거리에 대한 NFPA 130⁶⁾의 기준인 발광체 30m, 반사체 10m의 기준을 적용하면, 가시거리를 확보하기 위한 한계 연기농도는 식 (5)에 의해서 발광체의 경우 35.08 mg/m^3 , 반사체의 경우 39.5 mg/m^3 으로 계산된다.

$$\rho Y_s = \frac{C}{K_m \cdot S} \quad (5)$$

2.2 Scaling Law

터널 화재 시 연기유동의 측정을 위한 축소모형 실험에서는 일반적으로 프라우드 모델(Froude model)에 의한 상사법칙을 사용한다. 프라우드 모델은 유체에 점성이 작용하는 경우 사용이 불가하지만 화재 발생의 경우 Re 수가 매우 큰 난류가 되어 점성력을 무시할 수 있으므로 사용이 가능하다.

프라우드 모델은 기하학적 상사법칙에 대한 역학적 상사법칙이 성립해야 하며 이를 위하여 축척과 관계없이 Fr 수가 일정해야 한다. 따라서 모형터널과 실제터널의 Fr 수가 같아야 하므로 다음과 같은 식이 성립한다.¹⁾

$$\frac{Q_m}{Q_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{5/2} \quad (6)$$

$$\frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{1/2} \quad (7)$$

$$\frac{t_m}{t_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{1/2} \quad (8)$$

본 실험에 사용된 터널 및 화원에 대한 축소법칙은 위 식을 이용하여 결정하였다.

3. 실험

3.1 기초실험

축소 모형실험에서 터널내의 연기의 회도에 대하여 농도 값을 적용하기 위하여 기초실험을 실시하였다. 기초실험은 연기농도 측정기(Smoke density tester)를 이용하여 장치 내에 연기의 평균 농도를 측정 하였으며

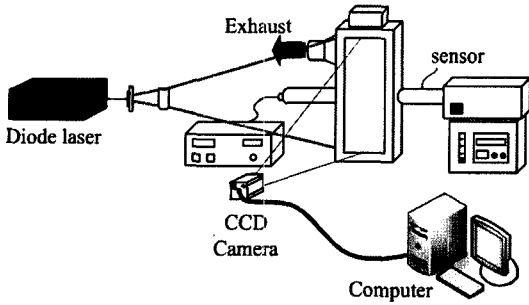


Figure 1. Experimental setup for smoke brightness and concentration measurement.

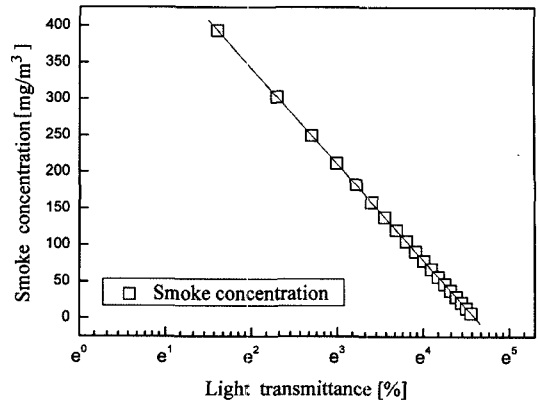
이 때 laser와 CCD 카메라를 이용하여 측정 농도에 대한 화상을 획득하였다. Figure 1은 연기농도와 휘도와 의 상관관계를 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 연기농도 측정기는 한쪽 면에서 평행광속을 사출하고 다른 한쪽 면에서 시감도를 센서에 의해 인식하여 광과 센서 사이의 연기의 농도를 측정하는 방식의 장치이다. 연기농도 측정기의 챔버에는 연기발생장치(Smoke generator)를 이용하여 연기를 공급하였으며 레이저(Diode laser : 3 W, 532 nm)와 광학장치를 이용하여 2차원 평면광을 조사하였다. 연기는 파라핀오일을 250 °C 이상 가열하여 발생시켰으며 연기의 휘도화상은 CCD 카메라로 촬영하여 상용 프로그램인 Grayvel 2.1을 이용하여 해석하였다. 휘도화상은 검정색의 휘도를 0, 백색의 휘도를 255로 하여 0~255까지 총 256단계(2⁸)의 계조로 구분하였으며 반복실험을 통하여 각 투과율에 대한 휘도 값을 측정하였다. 이에 다음과 같은 결과를 도출하였다.

먼저 측정된 투과율을 식 (2)에 대입하여 소광계수 K를 구한 후, 식 (4)에 대입하여 가시거리를 구하였다. 여기서 C는 일반적인 반사체를 기준으로 하여 C=3을 적용하였다. 여기서 계산된 가시거리 값을 식 (5)에 대입하여 최종적으로 연기농도 값을 계산하였으며 투과율에 따른 연기농도와 휘도와의 상관관계를 도출하였다.

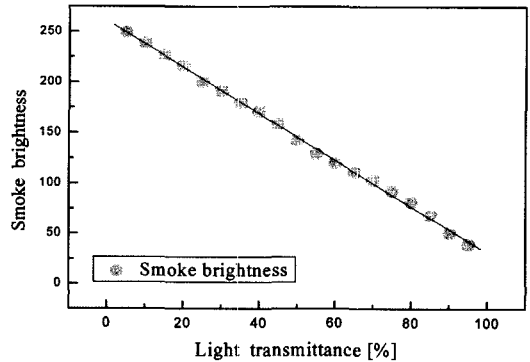
또한 가시화 기초실험에 의하여 연기발생장치에서 생성된 연기의 투과율을 반복 측정하여 이에 대한 휘도 값을 구하였으며 식 (2)~식 (5)를 이용하여 연기의 농도와 휘도와의 상관관계를 계산하였다.

식 (1)에서 제시한 바와 같이 투과율 T는 지수함수(e^x)의 형태이므로 x축을 ln T로 그래프에 적용(semi-log graph)하여 나타내면 Figure 2의 (a)와 같이 투과율에 따른 연기의 농도 변화는 선형적으로 감소하는 그래프로 나타낼 수 있다.

따라서 Figure 2의 (a)와 (b)에 따라 투과율에 따른



(a) Smoke concentration according to transmittance



(b) Smoke brightness according to transmittance

Figure 2. Relationship between smoke concentration and brightness.

연기의 농도 변화와 휘도 변화를 일차식으로 각각 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Con} &= -131 \ln T + 605 \\ \text{Br} &= -2.30T + 261 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 Con은 연기의 농도 이며 Br은 연기의 휘도, T는 투과율이다. 또한, 두 식을 정리하여 연기의 농도와 휘도와의 상관관계를 나타내면

$$\text{Br} = 261 - 2.30e^{\left(\frac{605 - \text{con}}{131}\right)} \quad (9)$$

이 된다. 본 실험에서는 다이오드 레이저를 광원으로 사용하여 휘도를 측정하였으며, 미국 NFPA 130에서 제시한 한계 연기농도인 39.5 mg/m³은 식 (8) 및 (9)에 의하여 투과율 74%, 가시거리 10 m, 휘도 90의 값으로 나타났다. 따라서 가시화 실험 시 촬영된 화상에 휘도 90 값을 적용하여 등농도선을 표시함으로써 화연의 형상 및 이동거리를 평가하였다.

3.2 실험장치

Figure 3은 화재 시 터널 내 제트팬의 위치 및 운전 방식에 따른 연기의 교란 특성을 연구하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 실험 장치는 1/40 축척의 높이 20 cm, 폭 20 cm, 길이 8 m인 사각형 터널로서 두께 5 mm의 아크릴로 제작하였다. 화재모사를 위한 화원은 전기열 선을 사용하여 열원을 공급하였으며 터널 화원위치의 바닥면에 30 cm×7.5 cm 면적의 입구를 만들어 터널 하부로부터 열 공급이 가능하도록 하였다. 또한 연기 발생장치를 화원 하부에 설치함으로써 열부력에 의하여 연기가 상승할 수 있도록 하였으며 레이저와 광학 장치를 이용하여 터널 천장부에서 하부로 2차원 평면 광을 조사하였다. 터널 측면에 CCD 카메라를 설치하여 터널 내부의 연기이동을 촬영할 수 있도록 구성하였고 컴퓨터에 이미지 보드를 설치하여 컴퓨터에 의해 화상을 해석할 수 있도록 하였다.

터널 내부에 유량을 공급하기 위하여 터널 입구 위치에 축류형 팬을 설치하였으며 제트팬에 의한 연기교란 모사를 위해 터널 천장에 모형 제트팬을 설치하였다. 모형 제트팬은 4 cm×4 cm의 정사각형 단면을 가지고 있으며 링블로워와 연결되어 있어 하류(출구)방향으로 유량의 공급과 상류(입구)방향의 유량의 제거

를 동시에 할 수 있도록 설계하였다. 또한 유량계를 설치하여 정확한 유량공급을 할 수 있도록 하였으며 터널 종방향으로 설치 위치를 이동시킬 수 있도록 하였다. 축류형 팬은 인버터에 의해 팬의 회전수를 제어하여 유량이 조절될 수 있도록 하였으며 터널 단면에 균일한 풍속이 공급될 수 있도록 하였다.

3.3 실험방법

화재 강도는 PIARC⁷⁾에서 제시한 터널 내 화재발생 시나리오 중 버스 또는 로리 1대에 대한 발열량인 30 MW를 기준으로 하여 축소법칙으로 환산한 값인 2.96 kW를 실험에 적용하였다. 화원의 면적은 실제 버스의 크기 1/40 축척인 30 cm×7.5 cm이며 터널 바닥면으로부터 열 공급을 실시하였다. 발열량이 정상상태에 도달하면 연기발생장치를 이용하여 열과 함께 연기를 공급하였다. 이 때 연기의 발생량⁸⁾은 80 m³/s를 기준으로 하여 축소 환산 값인 0.008 m³/s(475 l/min)를 공급하였으며 연기가 가지고 있는 발열량은 무시하였다. 축소법칙에 의해 계산된 실험제원을 Table 1에 나타내었다.

터널 내부에 유량공급은 입구에 장치된 축류형 팬을 이용하여 원거리에서의 유량 공급을 모사 하였으며 터널 단면에 균일한 풍속을 공급하였다. 또한 2열 2쌍의 제트팬을 터널 천장에 설치하여 종방향으로 이동시키면서 화재발생 시 제트팬에 의한 연기교란 실험을 실시하였다. 레이저 광학장치를 이용하여 터널 천장부에서 하부로 2차원 평면광을 조사하였으며 터널 정면에 CCD 카메라를 설치하여 연기이동을 촬영하였다. CCD 카메라에 의한 촬영은 화재가 일정한 상태에 도달한 후 촬영하였으며 여기서 획득한 화상을 이용하여 휘도와 농도의 상관관계에 따라 화재 발생 시 터널 내부의 농도 분포를 계산하였다.

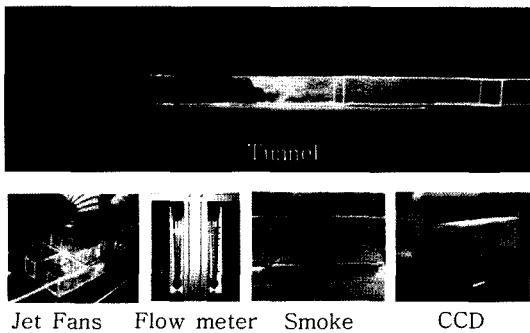
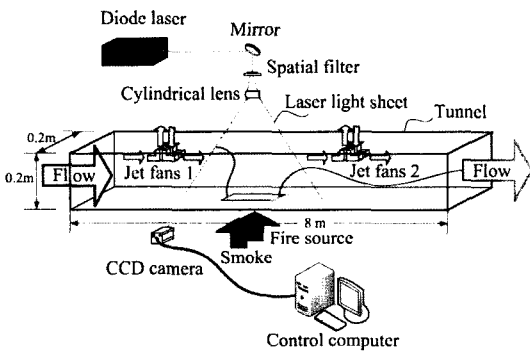


Figure 3. Experimental setup for smoke disturbance measurement.

Table 1. Experimental Specifications for smoke disturbance measurement

Elements	Prototype	Scale model
Height	8 m	0.2 m
Width	8 m	0.2 m
Length	320 m	8 m
Fire intensity	30 MW	2.96 kW
Fire size	12 m×3 m	0.3 m×0.075 m
Smoke generation rate	80 m ³ /s	0.008 m ³ /s (475 l/min)
Jet velocity	30 m/s (77 m ³ /s)	4.74 m/s (455 l/min)

Table 2. Experimental case for smoke disturbance measurement

Case	Operation			Separation distance from fire				
	Axial fan	Jet fans 1	Jet fans 2					
0	○	×	×	-				
1	○	○	×	L_f [m]	jet1	25	50	75
2	○	○	○	L_f [m]	jet1	25	50	75
					jet2	75	50	75
3	○	×	○	L_f [m]	jet2	25	50	75

본 연구에서는 실제 제트팬에서 발생하는 선회유동에 의한 연기의 확산은 고려하지 않았으며 터널 중심에서의 2차원 단면 해석을 위하여, 터널의 폭 방향의 연기농도는 일정하다고 가정하였다. 또한 레이저 광원은 터널 천정부에서 공급하였기 때문에 발생한 연기에 의해서 터널 높이방향으로 광량의 감쇄가 존재할 것으로 사료되며 이 감쇄 오차에 대해서는 검토하지 않았다.

본 연구에서 터널에 공급되는 임계풍속 값은 원거리 균일 풍속에 의해 결정된 임계 풍속 값을 이용하여 각 조건에 대해 유량을 결정하여 실험을 실시하였다. 유량은 원거리 축류팬(Axial fan)과 상류측 제트팬(Jet fans 1), 하류측 제트팬(Jet fans 2)의 조합에 의하여 공급하였으며, 제트팬의 위치를 변경 하며 연기의 제어 특성에 대하여 실험을 실시하였다. 여기서 터널 종방향으로 설치된 상류측 제트팬과 하류측 제트팬 사이의 이격 거리는 100 m(L_m : 250 cm)를 유지하였으며 화원의 위치는 두 제트팬 사이에 설정하였다.

Table 2에 제트팬 운전방식에 따른 교란특성 연구에 대한 실험 조건을 나타내었다.

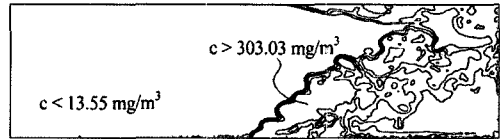
4. 실험결과

4.1 제트팬 이격거리에 따른 연기제어특성

화재 발생 지점과 제트팬과의 거리가 충분히 이격되어 있어 터널단면 전체에 유량이 일정하게 공급되는 상태를 모사하기 위하여 터널 입구에 축류팬을 설치하여 터널 단면 전체에 균일한 풍속을 공급하였다. 풍속은 먼저 Kennedy y 식에 의해 계산된 임계풍속 값을 기준으로 공급하였으며, 이 후 RPM 인버터를 이용하여 축류팬의 회전 속도를 조절하며 실험을 실시하였다. Figure 4에 원거리에서 임계풍속 공급 시 가시화에 의한 연기제어의 결과를 나타내었다. 실험결과, Kennedy 식에 의해 계산된 임계풍속 값 0.38 m/s($V_f=2.42$ m/s)보다 약 10% 증가된 값인 0.41 m/s($V_f=2.59$ m/s)에서 안전하게 제어되었다. 또한 이 때 연기 농도를 보면 화



(a) Smoke Image



(b) Contour of smoke concentration

Figure 4. Visualization of smoke control by fully developed flow.

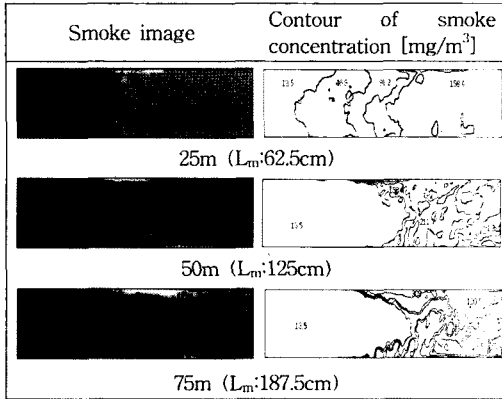
재 상류 방향의 연기 농도는 13.55 mg/m³ 이하로 나타나 NFPA 130에서 제시한 한계 연기 농도인 39.5 mg/m³를 만족하였다. 따라서 이 풍속을 임계풍속으로 결정하고 터널 내 총 공급유량을 약 980 l/min으로 설정하여 각 실험 조건에 적용하였다.

4.2 제트팬 이격거리에 교란 특성

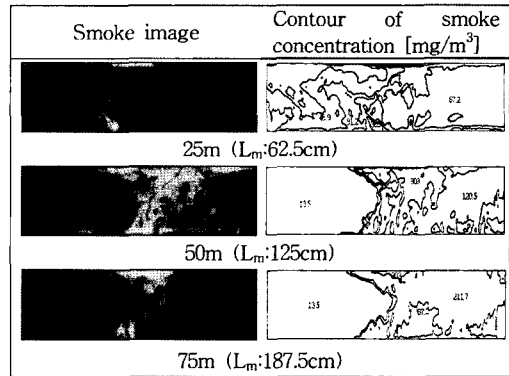
Figure 5에 제트팬 이격거리에 따른 교란특성에 대한 실험결과를 나타내었다.

실험 결과, Case 1과 Case 2의 첫 번째 경우와 같이 화원 상류의 제트팬을 화원으로부터 25 m(L_m : 62.5 cm)의 근접거리에서 작동하였을 때 연기는 터널 천장근처 벽면의 양측면에서 제트팬 주기류의 진행방향으로 이동하지 않고 오히려 터널 상류 방향으로 끌려 올라가는 경향이 발생하였다. 이는 제트팬 출구풍속이 주위의 유속 보다 매우 빠르기 때문에 나타나는 현상으로 터널 중앙부에는 제트팬에 의해 빠른 유동이 발생하고 이 유동에 영향을 받아 터널 양단부에 2차 유동(secondary flow)이 발생하기 때문이다. 따라서 상류방향에서의 근접 거리 제트팬 운전 시에는 이격 거리에 따른 연기의 역류를 고려하여야 한다. 화원과 제트팬

Case 1



Case 2



Case3

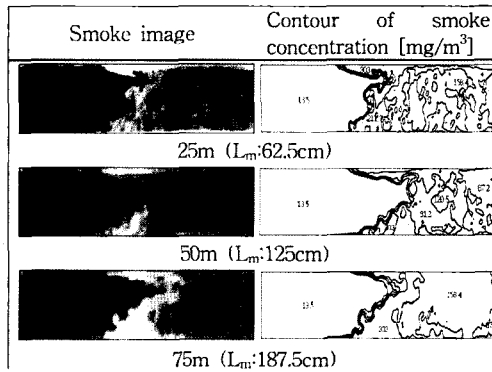


Figure 5. Visualization of smoke control by Jet fans.

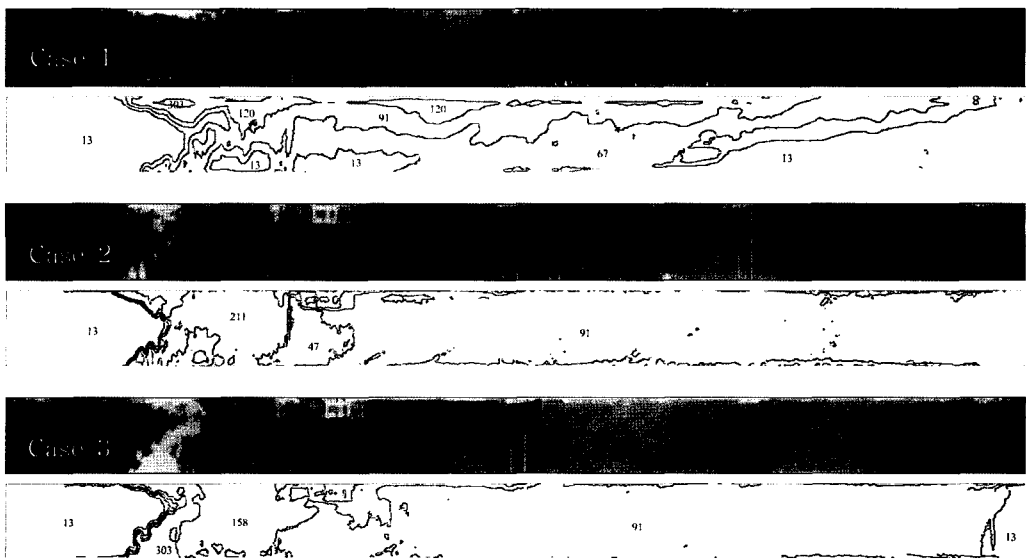


Figure 6. Visualization of smoke stratification by Jet fans.

의 이격 거리가 50 m일 경우 연기분포가 천장부에서부터 하단부까지 수직형태의 모양으로 가장 안정적인 제연이 이루어졌으며 제트팬의 이격거리가 75 m(L_m : 187.5 cm) 이상일 경우 임계풍속 공급 시 터널의 중간 높이가 부근의 풍속이 천장과 하부보다 과풍속 경향이 나타났다. 이 때 제연 형상은 원거리에서의 균일 풍속 공급과 거의 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 화재 상류 방향에서의 근접 거리 제트팬 운전 시 가장 이상적인 임계풍속 산정을 위한 제트팬의 화원과의 거리는 50 m(L_m : 125 cm) 부근에서 결정되는 것으로 나타났다.

Case 3의 경우와 같이 화원으로부터 하류방향으로 근접한 제트팬작동 시에는 이격거리가 25 m에서도 연기의 역류는 발생하지 않았으며 연기는 안전하게 제어되었다. 또한 하류 방향에서의 제트팬 운전 시에는 모든 조건에 대하여 연기의 역류가 발생하지 않았으며 이에 따라 하류측 제트팬은 이격거리와 관계없이 연기의 역류에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 터널 천장을 따라 하류측 출구방향으로 이동하는 연기는 제트팬의 작동에 의하여 교란이 발생되었으며 그 결과 터널 하류방향의 연기에 대한 성층화가 불가능하게 되었다. Figure 6에 제트팬에 의한 제연 시 연기의 성층화를 나타내었다. 그림에 나타나는 바와 같이 연기의 성층화가 유지된 경우는 터널 상류 방향에서의 제트팬 작동에 의한 제연 결과에서만 나타났고 나머지 하류에서의 제트팬 운전 시에는 모든 조건에서 연기의 교란이 발생한 것으로 나타났다. 따라서 화재 발생 시 하류측의 제트팬을 이용한 제연 방식은 연기의 성층화를 유지할 수 없게 되어 출구 방향의 차량에 대한 대피환경을 열악하게 하므로 사용 불가능 한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 실험에서는 제트팬의 이격거리 및 운전방식에 따른 연기의 유동 및 교란을 가시화함으로써 연기의 전파특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 화원으로부터 상류방향으로 근접한 제트팬의 운전 시에는 이격 거리에 따른 연기의 역류를 고려하여야 하며 제트팬과 화원 거리는 최소 50 m 이상 이격시켜야 한다.
- 2) 화원과 제트팬의 이격 거리가 50 m일 경우 연기가 가장 안정적인 제연이 이루어지며 성층화도 안정적으로 이루어진다.
- 3) 화원으로부터 하류방향으로 근접한 제트팬의 운전 시에는 모든 조건에 대하여 연기의 역류가 발생하

지 않으며 하류측 제트팬은 이격거리와 관계없이 연기의 역류에 영향을 주지 않는다. 그러나 하류방향으로 흐르는 연기에 영향을 주게 됨으로서 성층화를 유지할 수 없게 되므로 사용이 불가능하다.

기호설명

- I_i : 발광원에서의 빛의 강도(Light intensity at the emissions)
- I : 수광원에서의 빛의 강도(Light intensity at the receiving)
- t_r : 실제 시간 [s] (Time of prototype)
- t_m : 모형 시간 [s] (Time of scale model)
- K : 소광계수 [m^{-1}] (extinction coefficient)
- T : 투과도 (light transmittance)
- V_f : 실제터널 풍속 [m/s] (Velocity of prototype)
- V_m : 축소모형터널 풍속 [m/s] (Velocity of scale model)
- Q_r : 실제 화재 강도 [kW] (Heat intensity of prototype)
- Q_m : 축소모형 화재 강도 [kW] (Heat intensity of scale model)
- L_r : 실제터널 길이 [m] (Tunnel length of prototype)
- L_m : 축소모형터널 길이 [m] (Tunnel length of scale model)

후 기

이 논문은 2007학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. W.D. Kennedy and B. Parsons, "Critical Velocity: Past, Present and Future, One Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels", London, U.K. (1996).
2. D. Tetzner, R. Pollak, and M. Sippel, "Critical Velocity-Comparative Assessment of Test Results and CFD Simulation", Int. Conf. on tunnel fire and Escape from Tunnels, Lyon, France, pp.181-190 (1999).
3. Y. Wu and M.Z.A. Baker, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems - A Study of the Critical Velocity", Fire Safety Journal, Vol.35, pp.363-390(2000).
4. Y. Oka and G.T. Atkinson, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", Fire Safety Journal, Vol.25, pp.305-322(1995).

5. Society of Fire Protection Engineers, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd Edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA(2002).
6. National Fire Protection Association, "NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems", NFPA, USA(2003).
7. PIARC, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC(1999).
8. William D. Kennedy, "NFPA 502, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, 2003 Edition", NFPA(2003).