

터널 화재 시 제트팬에 의한 연기교란특성 연구

김종윤, 서태범, 임경범*, 이동호**

인하대학교 기계공학과, 한국소방안전협회*, 인천대학교 안전공학과**

A Study on the characteristics of smoke disturbance by jet fan in tunnel fires

Jong-Yoon Kim, Tae-Beom Seo, Kyung-Bum Lim*, Dong-Ho Rie**

*Department of Mechanical Engineering Inha University, Korea Fire Safety Association,

**Department of Safety Engineering University of Incheon

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 적절한 임계풍속의 공급이 이루어지지 않고 작은 풍속이 공급되는 경우는 터널의 상류방향으로 연기의 역류현상이 발생하며 과도한 풍속이 공급 되는 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 제어하여야 한다.

또한 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.

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

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⁾

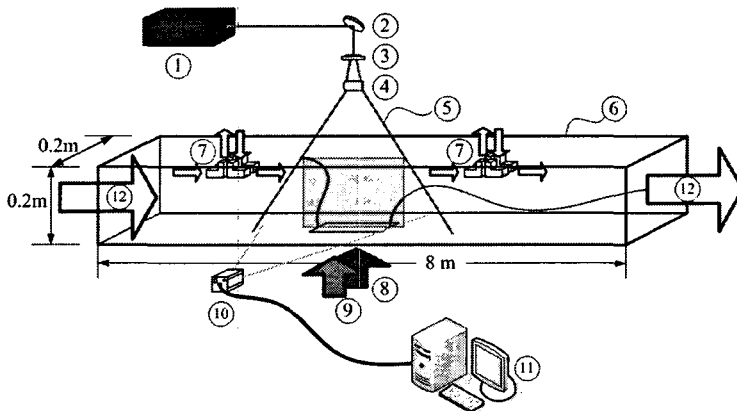
$$\frac{Q_m}{Q_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (1) \quad \frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2) \quad \frac{t_m}{t_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

여기서 L_f 는 실제터널높이, L_m 은 모형터널 높이, V_f 는 실제 풍속, V_m 은 모형 풍속이며 발열량 Q_m 과 Q_f 는 공급열량, t_m 과 t_f 는 시간을 나타낸다. 본 실험에 사용된 터널 및 화원에 대한 축소법칙은 위 식을 이용하여 결정하였다.

3. 실험

3.1 실험장치

Figure 1.은 화재 시 터널 내 제트팬의 위치 및 운전방식에 따른 연기의 교란 특성을 연구하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 실험 장치는 1/40 축척의 높이 20cm, 폭 20cm, 길이 8m인 사각형 터널로서 두께 5mm의 아크릴로 제작하였다. 화재모사를 위한 화원은 전기열선을 사용하여 열원을 공급하였으며 터널 화원위치의 바닥면에 30cm×7.5cm 면적의 입구를 만들어 터널 하부로부터 열 공급이 가능하도록 하였다. 또한 연기발생장치를 이용하여 화원 하부에 설치함으로써 열부력에 의하여 연기가 상승할 수 있도록 하였으며 레이저와 광학장치를 이용하여 터널 천장부에서 하부로 2차원 평면광을 조사하였다. 터널 정면에 CCD 카메라를 설치하여 터널 내부의 연기이동을 촬영할 수 있도록 구성하였고 컴퓨터에 이미지 보드를 설치하여 1/30초당 1 프레임의 화상을 획득할 수 있도록 하였다.



1	Diode laser	5	Laser light sheet	9	Smoke generator
2	Mirror	6	Reduce scale tunnel	10	CCD camera
3	Spatial filter	7	Jet fans	11	Control computer
4	Cylindrical lens	8	Fire source	12	Air flow

Figure 1. Schematic diagram of experimental devices

터널 내부에 유량을 공급하기 위하여 터널 입구 위치에 축류형 팬을 설치하였으며 제트팬에 의한 연기교란 모사를 위해 터널 천장에 모형 제트팬을 설치하였다. 모형 제트팬은 4cm×4cm의 정사각형 단면을 가지고 있으며 링블로워와 연결되어 있어 하류(출구)방향으로 유량의 공급과 상류(입구)방향의 유량의 제거를 동시에 할 수 있도록 설계하였다. 또한 유량계를 설치하여 정확한 유량공급을 할 수 있도록 하였으며 터널 종방향으로 설치 위치를 이동 시킬 수 있도록 하였다. 축류형 팬은 인버터에 의해 팬의 회전수를 제어하여 유량이 조절될 수 있도록 하였으며 터널 단면에 균일한 풍속이 공급될 수 있도록 하였다.

3.2 실험방법

화재 강도는 PIARC²⁾에서 제시한 터널 내 화재발생 시나리오 중 버스 또는 로리 1대에 대한 발열량인 30MW를 기준으로 하여 축소법칙으로 환산한 값인 2.96kW를 실험에 적용하였다. 화원의 면적은 실제 버스의 크기 1/40 축척인 30cm×7.5cm이며 터널 바닥면으로부터 열 공급을 실시하였다. 발열량이 정상상태에 도달하면 연기발생장치를 이용하여 열과 함께 연기를 공급하였다. 이 때 연기의 발생량은 80m³/s을 기준으로 하여 축소 환산 값인 0.008m³/s (475 lpm)를 공급하였으며 연기가 가지고 있는 발열량은 무시하였다. 축소법칙에 의해 계산된 실험제원을 Table 1. 에 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 정상상태에 도달한 후 촬영하였으며 1/30초당 1장씩 총 300장을 획득하였다. 여기서 획득한 사진을 이용하여 휘도와 농도의 상관관계에 따라 농도 분포 화상으로 변환시켜 나타내었으며 PIV 해석 기법을 이용하여 연기의 유동을 벡터로 나타내었다.

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)

본 연구에서는 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 fan 1), 하류측 제트팬(Jet fan 2)의 조합에 의하여 공급하였으며, 제트팬의 위치를 변경 하며 연기의 유동 및 교란특성에 대하여 실험을 실시하였다. 여기서 터널 종방향으로 설치된 상류측 제트팬과 하류측 제트팬 사이의 이격 거리는 100m ($L_m:250\text{cm}$)를 유지하였으며 화원의 위치는 두 제트팬 사이에 설정하였다. Table 2.에 제트팬 운전방식에 따른 교란특성 연구에 대한 실험 조건을 나타내었다.

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]	25, 50, 75
2	○	○	○	L_f [m]	25, 50, 75
3	○	×	○	L_f [m]	25, 50, 75

4. 실험결과

화재 발생 지점과 제트팬과의 거리가 충분히 이격 되어 있어 터널단면 전체에 유량이 일정하게 공급되는 상태를 모사하기 위하여 터널 입구에 축류팬을 설치하여 터널 단면 전체에 균일한 풍속을 공급하였다. 풍속은 먼저 Kennedy식에 의해 계산된 임계풍속 값을 기준으로 공급하였으며, 이 후 RPM 인버터를 이용하여 축류팬의 회전 속도를 조절하며 실험을 실시하였다. Figure 2.에 원거리에서 임계풍속 공급 시 가시화에 의한 연기제어의 결과를 나타내었다. 실험결과, Kennedy식에 의해 계산된 임계풍속 값 $0.38\text{m/s}(V_f=2.42\text{m/s})$ 보다 약 10%증가된 값인 $0.41\text{m/s}(V_f=2.59\text{m/s})$ 에서 안전하게 제어되었다. 또한 이 때 매연 농도를 보면 화재 상류 방향의 매연 농도는 13.55mg/m^3 이하로 나타나 NFPA 502에서 제시한 한계 매연 농도인 39.5mg/m^3 를 만족하였다. 따라서 이 풍속을 임계풍속으로 결정하고 터널 내 총 공급유량을 약 980 l/min 으로 설정하여 각 실험 조건에 적용하였다.

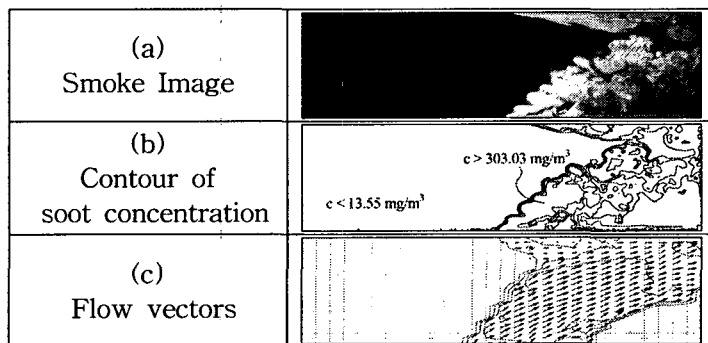


Figure 2. Visualization of smoke control by fully developed flow

다음은 제트팬 운전방식에 따른 교란특성 연구에 대한 실험결과를 Figure 3.에 나타내었다. 실험 결과, Case 1과 Case 2의 첫 번째 경우와 같이 화원 상류의 제트팬을 화원으로부터 25m($L_m:62.5cm$)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 하며 제트팬과 화원의 거리는 최소 50m($L_m:125cm$)이상 이격 시켜야 한다. 화원과 제트팬의 이격 거리가 50m일 경우 연기분포가 천장부에서부터 하단부까지 수직형태의 모양으로 가장 안정적인 제연이 이루어졌으며 제트팬의 이격거리가 75m($L_m:187.5cm$)이상 일 경우 임계풍속 공급 시 터널의 중간 높이 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 화원과과의 거리는 50m($L_m:125cm$) 부근에서 결정되는 것으로 나타났다.








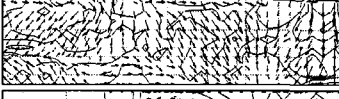








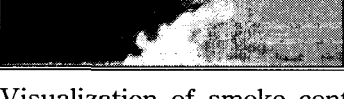

Case	Distance	Smoke image	Flow vectors
1	25m ($L_m:62.5cm$)		
	50m ($L_m:125cm$)		
	75m ($L_m:187.5cm$)		
2	25m ($L_m:62.5cm$)		
	50m ($L_m:125cm$)		
	75m ($L_m:187.5cm$)		
3	25m ($L_m:62.5cm$)		
	50m ($L_m:125cm$)		
	75m ($L_m:187.5cm$)		

Figure 3. Visualization of smoke control by Jet fans

case 3의 경우와 같이 화원 하류 방향 근접 거리의 제트팬 작동 시에는 이격거리가 25m에서도 연기의 역류는 발생하지 않았으며 연기는 안전하게 제어 되었다. 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 발생 되었으며 그 결과 터널 하류방향의 연기에 대한 성층화가 불가능하게 되었다. Figure 4.에 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 확보하기 어렵기 때문에 사용 불가능 한 것으로 나타났다.

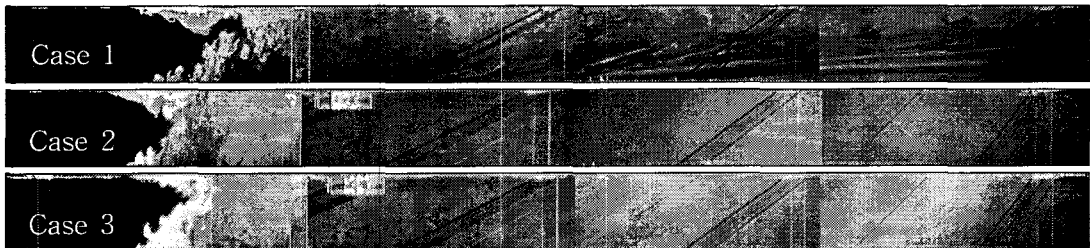


Figure 4 Visualization of smoke stratification by Jet fans

5. 결 론

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

- 1) 화원 상류방향 근접 거리의 제트팬 운전 시에는 이격 거리에 따른 연기의 역류를 고려하여야 하며 제트팬과 화원의 거리는 최소 50m이상 이격 시켜야 한다.
- 2) 화원과 제트팬의 이격 거리가 50m일 경우 연기가 가장 안정적인 제연이 이루어지며 성층화도 안정적으로 이루어진다.
- 3) 화원 하류 방향에서의 제트팬 운전 시에는 모든 조건에 대하여 연기의 역류가 발생하지 않으며 하류측 제트팬은 이격거리와 관계없이 연기의 역류에 영향을 주지 않는다. 그러나 하류방향으로 흐르는 연기에 영향을 주게 됨으로서 성층화를 유지할 수 없게된다.

6. 참고문헌

1. Thomas, P.H. "The movement of smoke in horizontal passages against an air flow.", Fire Research Station, UK, Sept. 1968.
2. PIARC, 1999, Fire and smoke control in road tunnels, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC.
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, 35, pp. 363-390, 2000