

종류식 환기 시스템에서 임계속도 도달 전 스모크 확산 영역에 관한 실험적 연구

김영민^{1)*}, 윤성욱²⁾, 윤찬훈³⁾, 김진⁴⁾

An experimental study on the smoke-spread region before reaching the critical velocity for the case of fires in tunnels employing longitudinal ventilation system

Youngmin Kim, Sungwook Yoon, Chanhoon Yoon and Jin Kim

Abstract An experimental study was carried out on a reduced scale tunnel model to grasp the behavioral feature of fire-induced smoke in the long tunnels. Based on Froude modeling, the 1/50 scaled tunnel model (20 m long) was constructed by acrylic tubes and paraffin gas was released inside the tunnel to simulate the 20 MW fire-induced smoke. The test results show, that after approximately 2 minutes of fire generation, was descended from the tunnel ceiling through the decrease of buoyancy, then it was symmetrically propagated about 90 meters for 4 minutes before jet fans were operated. The smoke was effectively controlled when the jet fans were operated and an air stream velocity was getting closed to reach a critical velocity (the minimum air velocity that requires to suppress the smoke spreading against the longitudinal ventilation flow during the tunnel fire situations). It was also found out that a range of smoke was spreaded about 3 meters from the origin of fire but the range was not propagated to the escape direction anymore. The early stage of the fan operation, however, showed that the smoke was hardly controlled. It means that the operation of emergency ventilation system has many dangerous factors such as an intercepting breathing zone.

Key words Reduced scale tunnel model, Smoke, jet fan, Critical velocity

초 록 본 연구에서는 장대터널 화재 시 발생하는 스모크의 거동특성을 파악하기 위해 축소모형실험을 실시하였다. Froude 상사를 기초로 실제 터널을 1/50로 축소한 20 m 의 아크릴 터널 모형을 제작하였으며, 파라핀 기체로 만든 스모크를 터널 내부에 주입시킴으로써 20MW의 실제 화재를 모사하였다. 실험에서 화재 발생 약 2분 후에 스모크는 부력효과의 감소로 아래로 하강하였으며, 제트팬 가동 전까지 4분 동안 스모크는 약 90 m를 이동하였다. 제트팬이 가동되고 기류속도가 임계속도 (도로터널 화재 중 발생하는 스모크의 역기류를 제압하기 위한 최소 공기속도)에 가까워질수록 스모크의 제어가 효율적으로 이루어지며, 스모크의 분포는 화원에서 약 3 m 정도로 더 이상 탈출 방향으로의 스모크 전파가 이루어지지 않았다. 하지만, 제트팬 가동 초기에 스모크의 제어가 거의 이루어지지 않음을 보였고 오히려 이 단계에서 탈출자의 호흡선 차단 등의 위험요소가 내재되어 있음을 알 수 있었다.

핵심어 축소모형실험, 스모크, 제트팬, 임계속도

1. 서 론

산지가 전 국토의 70%를 차지하고 있는 우리 국토의 지리적 특성과 고속도로 건설정책이 주변 자연생태계를 최대한 보전하는 생태 순환형 개념의 eco-highway 건설정책으로 전환됨으로써 고속도로 연장 및 터널공사는 필연적으로 증가하고 있고 규모면에서도 3차로, 4차로 터널로 장대화 되어가는 추세이다. 이와 같은 추

¹⁾ 인하대학교 자원공학과 석사과정
²⁾ (주)GS건설 기술본부 연구개발팀 과장
³⁾ 인하대학교 환경토목공학부 박사과정
⁴⁾ 인하대학교 환경토목공학부 부교수

* 교신저자 : min1255@gmail.com

접수일 : 2006년 12월 1일

심사 완료일 : 2006년 12월 22일

세와 더불어 터널구조물에 대한 방재기능의 중요성이 확대되고 있다. 최근 해외에서 발생된 몽블랑 터널화재, 타우에른 터널화재, 고타드 터널화재 사고에서 알 수 있듯이 터널 화재가 발생할 경우 터널 내부는 외부와의 통로가 한정되고 고립된 공간 특성을 가지기 때문에 화재로부터 분출되는 스모크와 열로 인해 대형 인명사고가 발생 할 수 있다.

특히 화재에 의한 열적 피해보다 일산화탄소 및 각종 유해가스를 포함한 스모크에 의한 인명피해는 심각하다. 1994년 화재통계연보에 따르면 질식사 사망의 원인 중 47.5 %로 가장 크게 나타나고 있으며, 몽블랑 터널화재에서도 대부분의 사망자가 스모크 질식에 의한 것이라는 소방관의 증언으로 볼 때 도로터널 화재 사망률에서 스모크의 기여도가 큼을 알 수 있다. 터널 화재 시 발생하는 스모크는 가시도(visibility)를 낮추고, 이로 인해 승객들이 탈출로를 찾지 못하며, 짧은 기간 동안의 호흡기 노출도 의식불명 그리고 장기간의 노출은 사망까지도 초래할 수 있기 때문에 스모크의 억제 매우 중요하다. 현재 우리나라의 도로 터널의 경우, 터널 화재에 대비한 방재시스템은 구축하고 있지만, 터널의 장대화 및 화물운송 차량의 대형화, 운반 물류의 다양화에 따른 추가적인 연구가 필요한 실정이며, 가연물의 규모, 터널 내 기류속도, 화재 시나리오 등 다양화된 제반 조건을 세부적으로 고려한 화염확산 형태 및 스모크 거동 메커니즘에 대한 연구가 반드시 이루어져야한다.

따라서 본 연구에서는 화재에 의한 스모크의 거동을 파악하기 위해, Froude 상사를 기초로 축소모형실험을 실시하였으며, 화재 시나리오를 바탕으로 제트팬 가동 전과 제트팬이 가동되어 임계속도에 도달하기 전까지 2 가지 상황으로 나누어 진행되었다. 이 연구를 바탕으로 화재 발생시 터널 내부의 스모크 분포, 풍속 및 스모크 거동 특성을 분석함으로써 합리적인 제연시스템의 디자인 및 화재 대피 시나리오를 구축할 수 있으며 인명피해를 최소화할 수 있는 효과적인 방안을 마련할 수 있을 것이다.

2. 축소모형실험

2.1. 상사법칙

도로터널 화재실험은 실제 터널에 화재를 발생시키고 스모크의 거동을 살펴보는 것이 가장 이상적이고, 현실에 가까운 데이터를 얻을 수 있는 방법이지만 실제 상황에서 실험을 행하는 것이 불가능한 경우가 많으며, 경제적인 면과 시간적인 면을 보았을 때 CFD(computational fluid dynamics)와 함께 축소모형실험을 행하는 것이 효율적이다. 또한 축소모형실험에서 얻은 데이터가 정량적인 수치가 아니라라도 계의 거동과 메커니즘에 대한 통찰력을 준다는 면에서 이 분야의 많은 연구가 이루어지고 있다. 도로터널의 유동 해석 방법은 Froude modeling 과 압력 모델링 등이 있다. 압력 모델링은 모델 주위의 압력을 변화시킴으로써 실제 유동을 모사하는 방법으로 압력변화가 용이하지 않은 도로터널 환기 모형 실험에는 적합하지 않다. 따라서 주위의 조건이 은 상황에서 실험을 할 수 있는 Froude modeling을 적용하는 것이 타당하다. Froude modeling은 기하학적 형태가 보존되어야 하므로 차원 분석을 통한 수치를 일정한하게 유지시키면 된다. 모형터널과 실제터널의 열방출율 및 속도는 식 (1)을 적용하여 모델링한다(Oka Y. and Atkinson G.T., 1995).

$$\left(\frac{V_m}{V_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2} \left(\frac{A_m}{A_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 \tag{1}$$

$$\left(\frac{Q_m}{Q_r}\right) = \left(\frac{V_m}{V_r}\right) \cdot \left(\frac{A_m}{A_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{5/2}$$

- 여기서, Q : 열방출량, [kW]
- L : 터널길이, [m]
- V : 환기속도, [m/sec]
- A : 터널 단면적, [m²]
- m : model tunnel
- r : real tunnel

2.2. 모형터널

모형 실험장치는 Fig. 1과 같다. 제작모형은 실제터널

Table 1. The scaling of experimental factor

	Full scale	Reduced scale
reduced ratio	50	1
the time of jet fans operated	after 4 min.	after 34 sec.
Critical velocity	2.62 m/s	0.37 m/s
quantity of smoke	80 m ³ /s	4.5×10 ⁻³ m ³ /s (271 LPM)

에 최대한으로 근사하도록 기하학적 형상을 모사하였으며, 터널부분은 실제 터널 단면의 1/50 로 축소하였고, 길이 20 m, 단면직경 0.2 m의 아크릴 원 관에 노면에 상당하는 아크릴판을 삽입하여 단면을 실제의 터널 기준단면과 거의 동일하게 하였다. 화원 부분은 아크릴 원형 관에 직경 25 mm의 구멍을 뚫어 스모크의 유입이 용이하도록 제작하였으며, 나머지 터널 부분은 기본적으로 1 m 간격의 조립식으로 하여 smoke generator로부터 발생된 스모크의 수직 및 수평 거동의 관찰이 가능하도록 하였다. 터널 내의 기류는 터널 부 말단에 원심력 팬을 연결하여 팬의 회전속도를 조절함으로써 터널 내부의 기류를 제어하도록 하였고, 정확한 기류속도 측정을 위해 Testo 350 M/XL control unit 과 Testo hot wire probe를 사용하였으며, 얻어진 화원 주변부의 기류 속도 data는 Testo control unit 에 연결된 컴퓨터에 실시간으로 기록되도록 프로그래밍하였다.

2.2.1 화재 디자인

터널 내 화재가 발생하면 화원에서는 열을 방출한다. 초기에는 화재의 크기 즉 열 발생량이 적다가 시간의 흐름에 따라 그 크기는 점점 커진다. 이 때 화재가 방출하는 열량은 시간의 제곱에 비례하며 식 (2)와 같다.

$$Q = a \cdot t^2 \tag{2}$$

Q 는 화재발생열량(kW), t 는 화재지속시간(s), a 는 화

재성장계수로 a 값은 화재의 성질에 따라 다른 값을 가진다. Table. 2는 화재 유형에 따른 a 값이다.

a 는 화재성장곡선의 기울기 즉, 화재 성장의 빠르기를 나타내며 연소 물질의 종류에 따라 각각 다른 값을 가진다. 예를 들어 ultra-fast에 속하는 연소 물질로는 얇은 합판, 천이 둘러진 가구류 또는 가솔린과 같은 인화성 물질에 의한 pool식 화재가 이에 해당한다. 모형터널의 화재 디자인은 최악의 상황을 고려하여야 하므로 본 연구에서는 ultra-fast의 a 를 적용하였다. 화재의 강도는 화원 즉, 사고차량에서 발생하는 열량의 크기에 비례하며 차량의 크기나 용량 또는 인화성 물질의 선적 여부에 따라 화재의 강도는 달라진다. 이 화재강도에 의해서 화염의 온도, 스모크 발생량 등이 결정되므로 스모크의 발생량 결정을 위한 화재강도의 계산은 매우 중요하다. Table. 3에 도로터널 방재시설 지침서의 일반적인 설계화재강도를 나타내었다.

PIARC(permanent international association road congress)에서 제시된 자료에 의하면 장대터널 내 사고 차량의 80% 이상이 강도 20MW급의 화재였으며 나머지 19% 정도가 40MW급의 화재를, 1%가 40MW급 이상의 화재강도를 차지한다. 본 연구에서는 터널 내부의 차종 별 화재 빈도수를 고려하여 20MW급의 ultra-fast 화재를 적용하였으며, Fig. 2에 적용된 화재의 성장곡선을 나타내었다. 일반적으로 화재가 발생한지 약 25분 후에는 화재가 진화되어 열 발생량이 줄어들게 되지만 실험에서 고려하는 시간은 화재 발생시점에서 25분 이

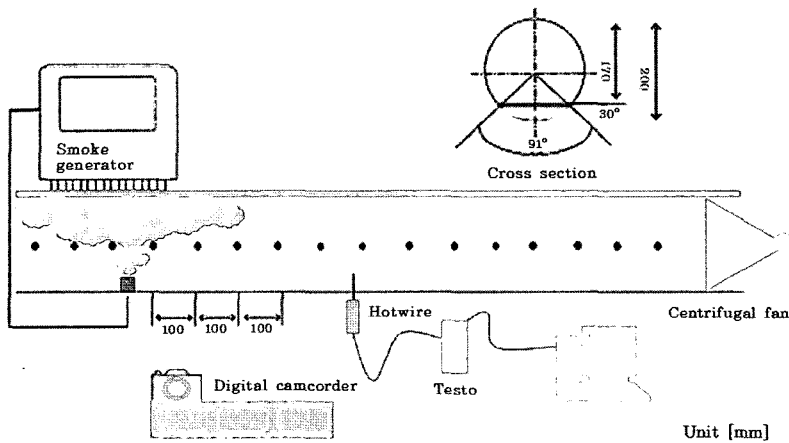


Fig. 1. The outline of reduced scale tunnel model

Table 2. Classification of fire types

fire type	ultra-fast	fast	medium	slow
a	0.17778	0.04444	0.01111	0.00278

내이므로 화재는 20MW의 발열량을 지속한다고 가정하였다.

2.2.2 Smoke generator

smoke generator는 액체 파라핀을 끓여 파라핀의 증기를 분사하는 장치로 Fig. 3에서처럼 파라핀을 가열하는 heater와 가열된 파라핀을 분사구로 주입시켜주는 control machine, 스모크의 유량을 조절할 수 있는 discharger로 이루어져 있다. 파라핀 증기의 주입량은 실제 화재에서 발생하는 스모크 유량과 흡사하도록 밀도와 물질량, 물 부피를 고려하여 계산하였으며, 도로터널 방재 시설 지침서의 일반적인 설계화재강도 및 이에 따른 연기발생량을 적용하였다. 화재 디자인에서 결정된 화재강도 20MW에서 발생하는 실제 스모크의 발생량은 60~80 m³/s 이며 실험에서는 안전율을 고려하여 80 m³/s를 채택하였다. 스모크 발생량은 모형실험에 맞추기 위해 상사법칙을 적용하였으며 20MW-80 m³/s 화재는 모형에서 기체파라핀 271 LPM에 해당한다. 스모크 제네레이터에 공급되는 파라핀은 액체이므로 적절한 파라핀의 양을 계산해야한다. 파라핀의 밀도와 물 질량을 이용해 물 수를 계산한 후 상태방정식을 이용하여, 물 부피를 구할 수 있다. 계산결과, 스모크 제네레이터에 유입되는 액체 파라핀은 1.4 LPM에 해당되었다. 스모크의 발생량도 화재강도와 마찬가지로 시간에 따라 증가함을 가정한다면 액체 파라핀의 양을 화재강도가 20MW에 도달하는 시간인 47초까지 서서히 증가시켜야하나, 파라핀의 유량을 단계적으로 증가하는데 어려움이 있어 화재발생 시점에서 바로 smoke generator를 가동시켰다. 그러나 smoke generator가 가동될 때 스모크가 즉각 분사되지 않고 서서히 분사량이 증가되기 때문에 얻어진 자료의 신뢰도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

2.3. 실험개요

Fig. 4.에 본 실험의 개요를 도시하였다. 최초 화재강도 20MW에 해당하는 스모크를 모형터널 내에 분사하고 화재발생 시점에서 제트팬 가동까지 약 4분 동안의 스모크의 확산을 관찰하였으며, 제트팬 가동 후에 기류

Table 3. Heat release rate of vehicles

	Heat release rate (MW)	Smoke flow rate (m ³ /s)
A motorcar	~5	20
A bus	20	60~80
A truck	30	80
A tanklorry	100	200

속도가 임계속도에 도달하기까지 다섯 단계로 구분하여 스모크의 분포 및 거동을 관찰하였다. 여기서 4분은 화재가 발생한 시점에서 터널 관리자가 화재를 인지하여 제트팬을 가동하는데 걸리는 시간으로 화재 발생 후에 비상환기시스템이 가동되는 시점을 화재 시나리오를 바탕으로 산정한 값이다. 화재 시나리오는 제연설비를 가동시키는데 소요되는 시간과 대피시간 등에 대한 연구 자료들을 취합 정리해 터널 내 운전자들의 대피시간을 산정하고, 비상경보기, 비상전화, 개인휴대전화, 화재감지기 등을 통한 터널 관리자의 화재 인지 시점을 분석하여 작성하였다. 비상경보기에 의해 환기시스템이 가동되는데 소요되는 시간은 약 230초, 개인휴대전화가 약 250초로 개연성이 있는 자료를 선정하였으며, 이를 토대로 비상환기시스템(Jet fan)의 가동시점이 4분으로 결정되었다.

위에서 제시된 시나리오를 바탕으로 결정된 터널 내 임계속도는 2.62 m/s로 이 값을 축소 모형실험을 실시하여 D. Tetzner 식에 보정계수 β 값 0.5를 적용해 얻은 값이다. 모형터널에 적합한 속도를 스케일링 한 결과 0.37 m/s라는 결과를 얻었다. 모형터널에 장착된 원심력 팬을 가동하면서 터널 내부의 속도를 측정하였고, 팬 회전수와 기류속도와의 관계를 추정해 터널 내부 기류속도를 조절할 수 있게 하였다. 이를 바탕으로 기류속도를 일정한 간격으로 구분하였으며, 임계속도에 도달하는 과정을 Table. 4에 다섯 단계로 나타내었다. 스모크 거동은 digital camcorder로 연속 촬영하였다.

3. 실험결과

3.1. 제트팬 가동 전 스모크 거동

실제 터널 화재에서 벽면과 천장은 열을 지속적으로 받게 되며 이는 벽면과 천장 주위의 공기와 가스층을 더욱 가열하므로 보다 빠른 연소가 이루어지게 된다. 실질적으로 화재에서 발생하는 열량의 작은 부분만이 화재를

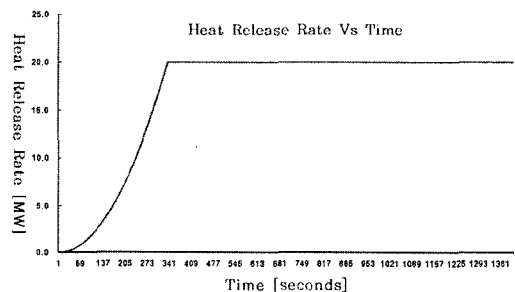


Fig. 2. Ultra-fast heat release rate versus time curve for 20MW fire

지속시키며, 남은 열은 공기 중이나 연소 가스로 공급되어 스모크의 확산 속도가 빨라지게 된다. 이렇게 전파된 스모크는 터널의 천장을 따라 수평으로 이동하지만 거리가 멀어짐에 따라 열에 의한 부력효과의 감소로 사람의 호흡선인 1~2 m 까지 하강하게 된다. Fig. 5에 화재 발생 후 4분 동안의 스모크 분포를 나타내었다.

뜨거운 스모크의 유동은 천장 아래에 층을 이루면서 공기와 혼합되지 않고 긴 거리까지 진행한다. 화재 발생 1분 후에는 스모크 주입부에서 분사된 연기가 천장을 가득 메우고 있으며, 터널 아래쪽으로는 스모크의 부력 효과 때문에 연기의 전파가 이루어지지 않고 있다. 화재 발생 2분 후에 서서히 스모크가 열에 의한 부력을 잃어 터널 아래쪽으로 하강하며 잠시 후에 스모크는 사람의 호흡지역까지 하강하게 된다. 이 때 스모크의 전파거리는 약 50 m이다. Fig. 6에 호흡선까지 하강한 스모크의 분포를 도시하였다.

실험 결과, 약 2분 후에 최소 25 m에서 최대 50 m까지 스모크는 공기와 혼합되지 않고 천장부를 따라 이동하였다. 이는 천장부에 smoke extraction 설비가 갖춰진 터널의 경우, 스모크가 하강하기 전, 즉 화재 발생 후 2분

전에 시스템이 가동되어야 효율이 극대화가 될 수 있음을 보인다. Table. 5에 시간에 따른 스모크의 확산거리를 나타내었다. 터널 내부에 화재 발생 후 제연 시설 가동 전까지 4분 여 동안 스모크의 이동거리는 약 90 m이었다.

PIARC의 자료에 의하면 터널 탈출자의 걷는 속도는 약 0.5~1.5 m/s로 스모크에 의한 가시도 저하에 따라 탈출자의 걷는 속도 변화가 크다. 보다 일반적으로 적용할 수 있는 탈출속도는 스웨덴의 Lund University에서 발표한 Modeling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuations 2003)에 있으며 Benelux 터널 탈출실험에서 얻어진 1.1 m/s이다. 이 값은 터널 내에서 실제 화재 상황을 연출하고 피실험자의 탈출 시뮬레이션으로부터 얻은 값으로 Table. 6에 피실험자가 실시한 9 번의 탈출 평균속도와 표준편차를 나타내었다.

탈출속도 실험에서 test 8 과 test 9 실험을 포함한 평

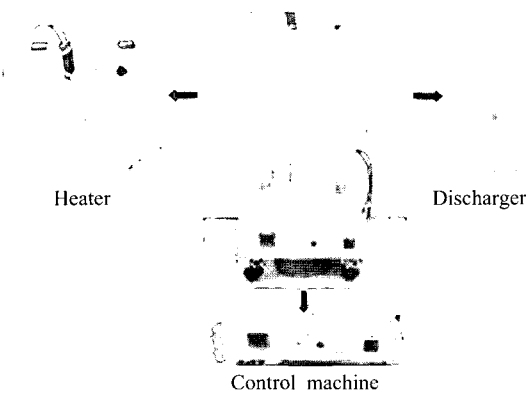


Fig. 3. smoke generator

Table 4. The scaling of air stream velocity

	Full scale velocity [m/s]	Reduced scale velocity [m/s]
stage 1	0.0 ~ 0.5	0.00 ~ 0.07
stage 2	0.5 ~ 1.0	0.07 ~ 0.14
stage 3	1.0 ~ 1.5	0.14 ~ 0.21
stage 4	1.5 ~ 2.0	0.21 ~ 0.28
stage 5	2.0 ~ 2.6	0.28 ~ 0.37

Table 5. The distance of smoke diffusion for 4minutes

Time [min]	smoke diffusion
1	15 ~ 20 m
2	25 ~ 50 m
3	75 ~ 80 m
4	80 ~ 90 m

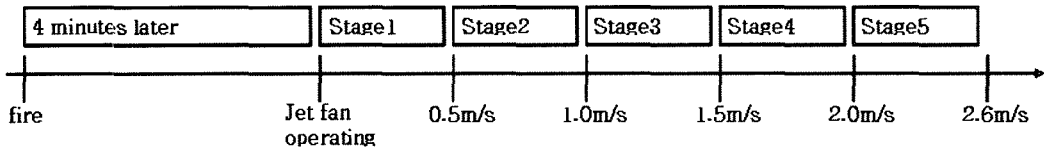


Fig. 4. The outline of fire experiment

Table 6. The average evacuation velocity & standard deviation

test	1	2	3	4	5	6	7	8	9
mean (m/s)	1.56	1.38	1.06	1.38	1.34	1.39	1.44	1.24	1.10
Std dev.	0.60	0.53	0.38	0.74	0.52	0.53	0.52	0.58	0.46

균 탈출속도는 1.33 m/s, 표준편차 0.55 의 값을 나타낸다. 하지만 두 실험의 장소가 터널 화재 발생장소로부터 멀리 떨어진 지역에서 이루어졌기 때문에 이 지역의 피실험자는 화재 상황을 인지하지 못하고 주변의 상황에 영향을 받아 대피로로 향했을 가능성이 높다. 따라서 이 두 지역에서 얻어진 피실험자의 데이터는 신뢰할 수 없다. 1-7 test의 결과를 기본으로 평균 탈출 속도는 Fig. 7 에 나타난 확률분포함수에 맞춰진다.

위의 결과에 따라서 터널의 탈출속도를 1.1 m/s로 가정한다면, 제트팬을 가동하기까지 걸리는 시간인 4분 동안에 탈출자가 이동할 수 있는 거리는 약 240 m이지만, 탈출자의 화재 인지시간 및 급박한 상황에서 오는 정신적인 혼동시간 2분을 고려한다면 최종적으로 탈출할 수 있는 거리는 약 100 m라고 할 수 있다. 이는 화재 발생 4분 후에 제연 시설이 가동되더라도 탈출자가 안전거리 내에 있

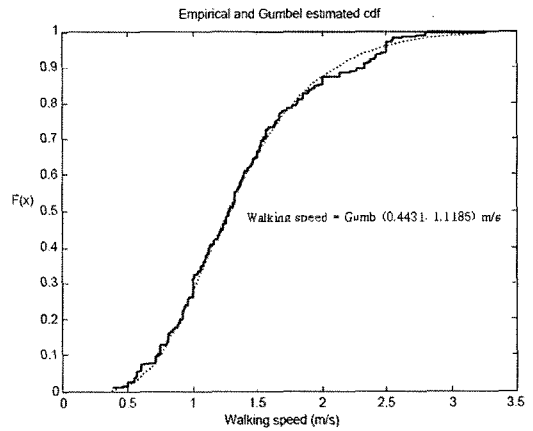
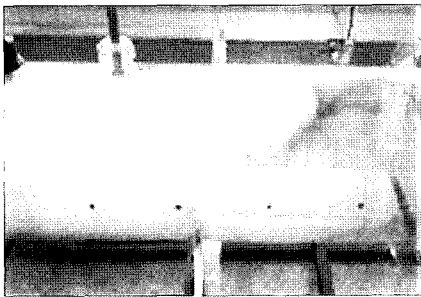
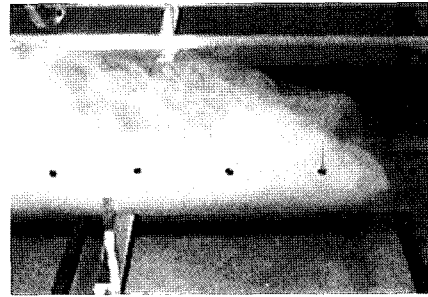


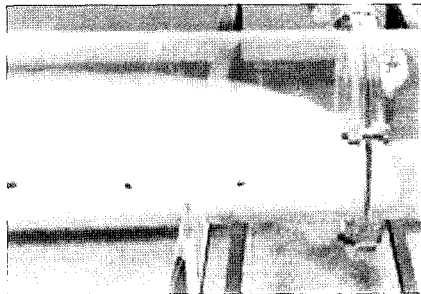
Fig. 7. The estimated Gumbel distribution



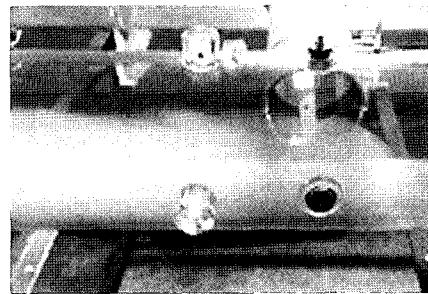
화재발생 1분 후



화재발생 2분 후



화재발생 3분 후



화재발생 4분 후

Fig. 5. The smoke-spread region before operating jet fan

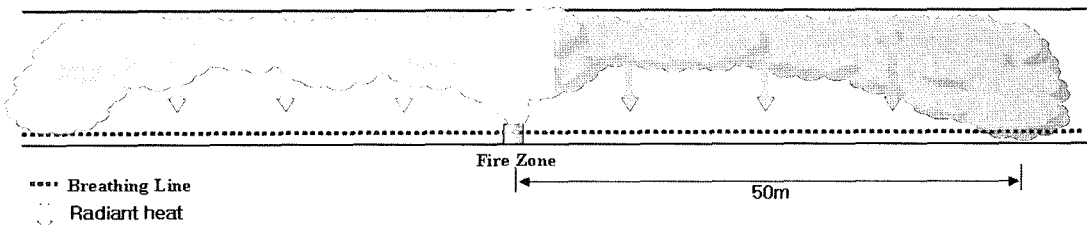


Fig. 6. The distribution of smoke, fire after 2 minutes

음을 보인다. 하지만 운전자는 혼란에 의해 예기치 않는 행동을 할 확률이 높으며, 스모크 층의 복사열에 의한 피해를 간과해서는 안 될 것이다.

3.2. 제트팬 가동 후 스모크 거동

화재가 발생하고 4분 후 터널의 내부에는 연기가 층만 하게 되며, 터널 운영자는 화재를 인지하고 화재에 의해 발생된 스모크의 역기류를 제압하기 위해 제연설비를 가동하게 된다. 제연설비 즉, 제트팬이 가동되고 일정한 시간이 흐르면, 터널 내의 기류속도가 안정화되며, 스모크 전파방향과 반대방향의 기류에 의해 스모크는 화원 쪽으로 후퇴하게 된다. Fig. 8에 제트팬 가동 후 스모크의 후퇴를 도시하였다.

화원 방향으로의 스모크 후퇴는 제트팬에 의한 기류 속도에 의해 결정되었다. Fig. 9는 각 stage 별로 나타낸 스모크 층의 후퇴 거리를 나타낸 값이다. 제트팬이 가동되고 기류속도가 0.5 m/s에 도달하였을 때 스모크는 화원으로부터 90 m에서 100 m 사이에 분포한다. 제트팬 가동 초기인 stage 1에서는 스모크 층의 전파속도가

제트팬에 의한 기류속도보다 크기 때문에 스모크의 후퇴가 거의 일어나지 않는 것을 볼 수 있다. stage 2에서는 제트팬의 속도가 점차 증가함에 따라 스모크의 후퇴 속도도 증가하는데, stage 1에서 극복하지 못했던 스모크의 전파속도를 기류속도가 약 1 m/s인 stage 2에서 이겨내고 스모크를 화원으로부터 80여 m까지 밀어내었다. stage 3과 stage 4에서는 기류속도에 대한 스모크의 후퇴거리가 가장 큰 구간으로 다른 구간과 비교할 때 같은 량의 속도 증분에 가장 큰 스모크 층의 후퇴를 보였다. 스모크는 화원으로부터 20 m 떨어진 곳까지 후퇴했음을 보인다. stage 5에서는 화재에 의해 발생한 역기류를 제압할 수 있는 구간으로 기류의 속도는 입계속도에 도달하게 된다. 스모크는 화원의 주변에만 분포할 수 있으며 더 이상 터널 탈출로의 진행 방향으로 전파되지 못하고 따라서 탈출자의 대피에 스모크의 영향이 없어지게 된다. Fig. 10에 단계 별 스모크 분포를 나타내었다.

3.3. Smoke 제연과 잠재 위험성

스모크는 제트팬 가동 전 까지 약 90 m를 진행하였다.

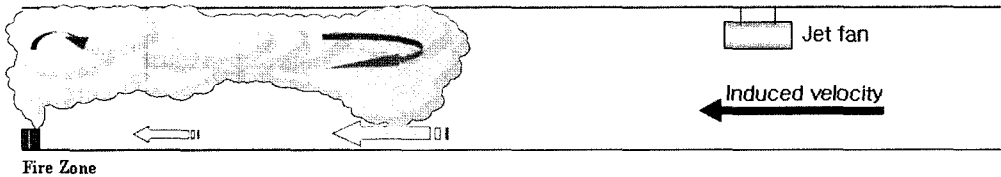


Fig. 8. The smoke behavior after operating jet fan

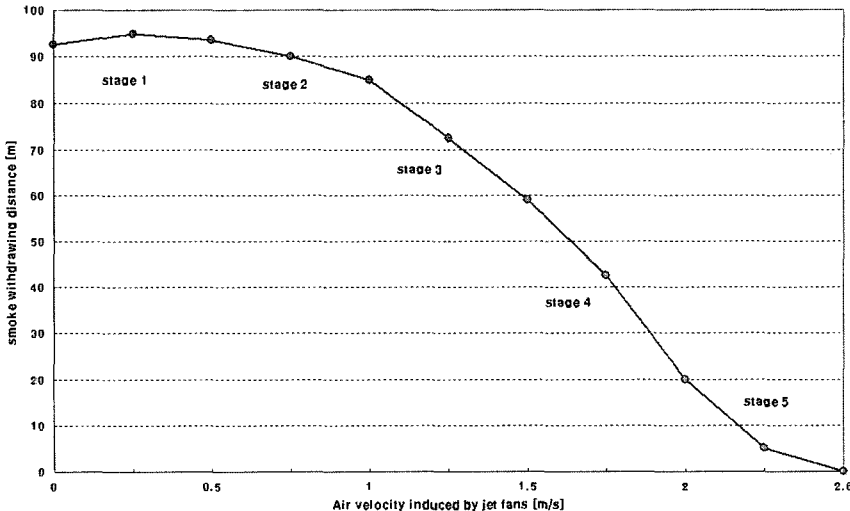


Fig. 9. The retreat distances of smoke from fire

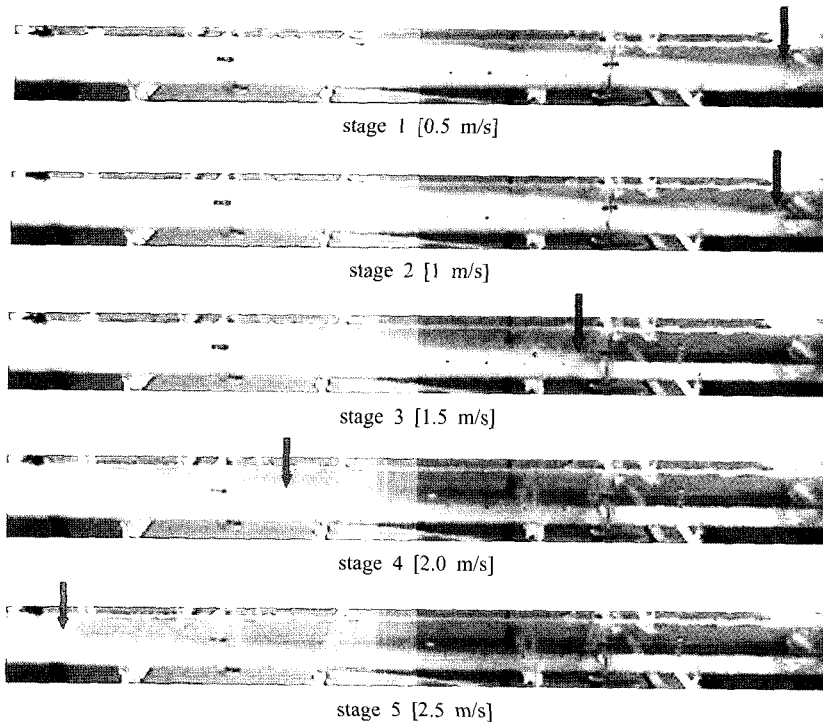


Fig. 10. The smoke distribution each stage

터널 내의 기류속도가 점차 증가함에 따라 연층의 후퇴가 일어나게 되고 처음 터널 내 기류속도가 0.5 m/s가 되었을 때, 스모크의 진행이 점차 느려지면서 서로 다른 두 방향의 기류 충돌이 생긴다. 이로 인해 와류가 발생하며 와류 발생지점에서 스모크가 터널 내부에 가득 차게 되고 잠시 동안 머무르는 현상을 볼 수 있었다. 이 내 스모크의 방향은 기류속도 1 m/s가 되면서 운전자의 탈출 방향과 반대로 진행하게 된다. 그 후 기류속도는 가속되어, 임계 속도에 가까워지며 스모크의 제연 속도는 더욱 더 빨라지게 된다. 임계속도에 도달하게 되면 스모크는 더 이상 진행되지 않으며 완벽히 제어됨을 볼 수 있다. 그러나 Fan 가동 초기에 스모크의 방향이 바뀌기 시작하면서 연층의 침단이 급격히 두꺼워지는 현상과 제연시간의 지연은 탈출자의 호흡선 차단을 가져오므로 오히려 탈출에 방해가 되는 요인이 될 수 있다. 제연을 목적으로 한 제트 팬 가동이 오히려 인명피해를 유발할 수 있는 요인으로 작용할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

터널 내 화재 발생 시 인명피해를 줄이기 위해서는 스모크가 터널 입구 방향으로 확산되는 영역을 파악하고

그에 합당한 방재 시스템을 디자인하는 것이 매우 중요하다. 이를 위한 연구로 실제 터널에서 실험을 실시하는 것이 이상적이나 비용이 많이 들고 위험부담이 많기 때문에 본 연구에서는 Froude 모델링을 통한 모형실험을 실시하였다. 스모크의 거동을 제트팬 가동 전과 제트팬 가동 후로 나누어 터널 내 기류가 정상화되기 전까지 관찰하고 분석하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 터널 내 화재 발생 직후 스모크의 거동은 터널 천장을 따라 입구 쪽으로 대칭으로 확산되며 화재 발생 2분 후에 열에 의한 부력 효과의 감소로 스모크는 사람의 호흡선인 1~2 m까지 하강하게 된다. 하강한 스모크는 터널의 바닥으로부터 2~3 m의 두께를 유지하며 터널 입구 쪽으로 확산하는데 제트팬이 가동되기 전까지 총 4분 동안 스모크는 약 90 m까지 이동하였다.

2. 터널 운영자의 화재 감지 후 제트팬이 가동되고 기류가 임계속도에 도달하는 과정에 따라 단계적으로 세분하여 스모크의 거동을 관찰하였다. 팬 가동 초기 즉, 기류속도 약 0.5~1.0 m/s에 비해 스모크

의 확산속도가 상대적으로 크므로 기류 방향으로 스모크가 거의 후퇴하지 않았으며, 서로 다른 두 방향의 기류 충돌로 인해 와류가 발생하면서 스모크가 터널 내에 가득 차는 현상이 나타났다. 기류속도 1.5~2.0 m/s에서 스모크는 화원으로부터 약 20 m까지 밀려났으며, 다른 구간과 비교할 때 같은 양의 속도 증분에 가장 큰 스모크 층의 후퇴를 보였다. 이 구간은 스모크의 제어가 효과적으로 일어나기 시작하는 구간으로 볼 수 있다. 기류속도가 임계속도에 도달했을 때 완벽한 스모크의 역기류 제압이 이루어졌고, 스모크는 더 이상 화원에서 탈출 방향으로의 전파가 이루어지지 않았다.

3. 화재 발생 후에 스모크는 천장을 따라 이동하므로, smoke extraction system의 가동시점을 2분 이내로 해야 효과적이다. 제트팬이 가동되기 전, 즉 화재 발생 후 4분 동안 터널 탈출자의 탈출속도를 1.1 m/s로 가정하면, 탈출 가능거리는 100 m로 스모크 전파거리 90 m와 비교했을 때 충분한 탈출이 가능하다는 결론을 내릴 수 있다. 하지만 탈출자의 부상 및 공황상태 등의 예기치 못한 상황과 스모크 층의 복사열을 감안하면 결코 안전한 상황이 될 수 없다. 제트팬 가동 초기 터널 내 기류속도가 약 1.0 m/s에 도달할 즈음 스모크의 확산방향이 바뀌기 시작하면서, 기류 충돌로 인해 와류가 발생하며 와류 발생지점에서 스모크가 가득 차게 된다. 이는 제연시간의 지연을 가져올 뿐만 아니라, 사람의 호흡선을 차단하게 되어 터널의 탈출에 방해가 되는 요인이 될 것으로 사료된다. 제트팬의 운영 및 설비 시에 고려해야 할 점이다.

감사의 글

본 연구는 GS건설(주) “장대터널 환기시스템 최적화 연구”용역의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 2004, “도로터널 방재시설 설치지침”, pp. 67~68.
2. 이성룡, 유홍선, 김충익, 2004, “수직갱이 설치된 터널내 화재시 연기거동에 관한 실험적 연구”, 설비공학논문집, 제16권 제2호, pp. 135-141.
3. 이성룡, 정진용, 김충익, 유홍선, 2002, “터널화재시 환기방식에 따른 연기거동에 관한 실험적 연구”, 설비공학논문집, 제14권 제9호, pp. 691-698.
4. 유용호, 2005, “장대터널 화재시 임계속도 결정 및 수직갱의 배연효과에 관한 연구”, 인하대학교 박사학위청구논문.
5. Anders Norén, Joel Winér, 2003, Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels "Data and design for faster evacuations", Department of Fire Safety Engineering, Report 5127, pp. 38-39.
6. Busan-Geoje Fixed Link, Immersed Tunnel, "Partial smoke extraction system CFD calculations", 2004.6.
7. National Fire Protection Association, 1998, NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridge, and Other Limited Access Highways A.10.5.1
8. O. Vauquelin, D. Telle, 2005, "Definition and experimental evaluation" of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires, Fire Safety Journal, pp. 320-330.
9. Oka Y. and Atkinson G.T., 1995, "Control of smoke flow in tunnel fires", Fire Safety Journal, 25, pp. 305-322.
10. Yooshin, 2003, "Means of Escape and Fire Risk Assessment Baehooryung Tunnel", pp. 13-15
11. Y. Wu, M.Z.A. Bakar, 2000, "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity", Fire Safety Journal, pp. 363-390.

김 영 민

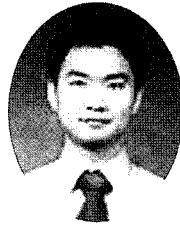
2005년 인하대학교 자원공학과 공학사



Tel: 032-872-7551
E-mail: min1255@gmail.com
현재 인하대학교 환경토목공학부 석사과정

윤 성 욱

1993년 서울대학교 자원공학과 공학사
1997년 서울대학교 자원공학과 공학석사
2002년 영국 Imperial College 환경공학과 공학박사



Tel: 02-2005-9239
E-mail: yoonsw@gsconst.co.kr
현재 (주)GS건설 기술본부 연구개발팀 과장

윤 찬 훈

2002년 인하대학교 자원공학과 공학사
2004년 인하대학교 자원공학과 공학석사



Tel: 032-872-7551
E-mail: yoon0940@naver.com
현재 인하대학교 환경토목공학부 박사과정

김 진

1987년 인하대학교 공학사
1990년 미국 University of Kentucky 공학석사
1995년 미국 University of Missouri-Rolla 공학박사



Tel: 032-860-7558
E-mail: jinkim@inha.ac.kr
현재 인하대학교 환경토목공학부 부교수