

대면교행터널에서 배연시스템의 구축과 화재모형실험에 의한 적정성 평가

이상은^{1)*}, 이창우²⁾

Construction of the Smoke Exhaust System and Its Applicability by the Fire Model Test for a Bidirectional Tunnel

Sang-Eun Lee and Chang-Woo Lee

Abstract In a bidirectional tunnel, the accident rate is 1.5 times as high as that of one directional tunnel, the risk of a fire is increased. On fire, there is a problem that the jet fan should not be operated until completion of refuge. To be special, as the great damages occur owing to the expansion of smoke in long tunnels, there is a need to minimize fatality by constructing cross passage and smoke removal system. This study aims at verifying the efficiency of smoke exhaust system through fire propagation simulation as well as scale model test. The results show that completion of escape through emergency exit requires 335 seconds, while addition of smoke exhaust system reduce the escape time to 185 seconds. Also, near the fire source temperature decreased by about 60°C. Without the exhaust system, fire propagation speed was in the range of 0.36 and 0.82 m/s, and it dropped to 0.27~0.58 m/s with the exhaust system on. Taking into account the escape speed of tunnel users, usually 0.7~1.0 m/s, the emergency exit built every 150m is sufficient for the safe egress. The ultimate goal of this study is to provide fundamental information for the smoke exhaust system in bidirectional tunnels.

KeyWords Bidirectional tunnel, Smoke exhaust system, Fire propagation simulation, Scale model test

초 록 대면 교행 터널의 경우 차량의 교행으로 사고 위험성이 일방향 터널에 비해 1.5배 정도 높으므로 화재가 발생할 위험성도 커지게 되며, 터널내 화재시 입출구로 이용객이 대피하므로 인명 대피 완료전까지 제트팬을 가동하지 못하는 문제가 있다. 특히 장대터널의 경우 연기확산으로 인하여 대형 인명 피해가 발생하기 때문에 터널내에 별도의 인명 대피 통로와 배연 시스템을 구축하여 인명 피해를 최소화하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 화재 시뮬레이션 및 축소모형실험을 수행하여 터널내에 구축된 배연시스템의 효과를 검증하였다. 실험결과 대피 통로만 설치시는 최종 인명 대피 시간이 335초가 소요되었으나, 배연 시스템을 구축할 때는 185초가 소요되었다. 또한 화재원 부근의 온도가 60°C 정도 감소되었으며, 연기 확산 속도는 배연 시스템 미가동시 0.36~0.82 m/sec이고, 가동시는 0.27~0.58 m/sec로 현격히 감소하였다. 위 결과로부터 대피자의 이동 속도가 0.7~1.0 m/sec인 점을 고려할 때, 150 m 간격으로 설치된 피난문을 통해 안전한 대피가 가능하였다. 본 연구는 배연시스템에 대한 화재모형실험 분석을 통해 향후 대면 교행 터널의 방재에 대한 기초자료를 제공하는데 그 의미가 있다.

핵심어 대면교행터널, 배연시스템, 화재 시뮬레이션, 축소모형실험

1. 서 론

최근 급속한 경제성장과 더불어 물동량이 급증하고 여가를 위한 차량통행량이 많아지면서 도로건설이 활

발히 추진되고 있다. 산지가 70% 이상인 우리 국토의 지리적 특성상 도로건설시 환경훼손을 최소화하기 위해 터널공사는 필연적이며, 국내 터널기술의 발달과 더불어 1km 이상의 장대터널이 급증하고 있는 추세이다. 이와 같은 추세와 더불어 터널내 차량충돌 및 고장 등으로 인한 화재시 방재에 대한 중요성이 확대되고 있고 최근 국내에서 발생된 홍지문 터널(1.9 km, 2003년)과 해외의 고타드 터널(16.9 km, 2001년), 몽브랑 터널(11.6 km, 1999년), 타우언 터널(6.4 km, 1999년)

¹⁾ 정회원, (주)삼보기술단 이사

²⁾ 정회원, 동아대학교 지구환경공학부 교수

* 교신저자 : lee9367@empal.com

접수일 : 2005년 8월 19일

심사 완료일 : 2005년 10월 20일

등이 그 좋은 예라고 할 수 있다¹⁾. 위 사고에서 알 수 있듯이 터널에서 화재가 발생하면 밀폐된 공간을 급격히 분출되는 화재와 열로 인한 대형인명사고가 발생되는데, 대형사고 발생의 문제점은 초동진압의 실패, 대피통로의 미확보, 신속한 화재자동경보 및 시스템 가동 실패, 배연방식 및 운영상의 오류 등을 들 수 있다.

일방향 국도 및 고속도로 터널의 경우는 터널화재에 대비하여 터널과 터널사이를 이용객의 이동속도를 고려한 적정 간격의 피난연결통로를 활용하여 이용객이 대피하고 있으나, 대면교행터널은 터널화재시 피난연결통로가 없기 때문에 양쪽 갭문을 통해 대피할 수 밖에 없다. 이때 터널연장 1 km 이상의 장대터널은 이용객이 갭문쪽으로 대피하기 전에 열 및 연기확산 등에 의해 인명피해가 발생할 가능성이 높으므로 이에 대한 대책을 강구하는 것이 필요하다.

최근 대구지하철 및 홍지문 터널 등의 화재사고로 인하여 방재에 대한 기준이 강화되면서 터널설계시 다양한 방재시스템을 구축하여 사고에 대비하고 있으나, 대면교행터널의 경우는 그 기준이 불명확하여 발주처 및 설계자의 의도에 따라 터널내에 대피통로나 대피소를 계획하든가 본선터널과 인접하여 소규모 대피용 터널을 설치하여 화재사고에 대응하고 있는 실정이다. 이와 같이 각종 터널의 특성에 부합되는 방재시스템을 구축하여 운영되고 있으나, 화재사고에 대비한 방재시스템의 적합성을 실제 터널에서 평가하기란 대단히 어렵기 때문에 대부분 화재 시뮬레이션 및 모형실험을 통해 그 평가를 수행하고 있는 실정이다.

화재모형실험에 대한 연구동향을 살펴보면 국외의 경우 화원의 모양, 크기 및 위치를 변화시키면서 임계속도를 평가한 연구²⁾, 터널의 경사도에 따른 임계속도 변화³⁾, 배연속도에 따른 발열량 및 화재성장⁴⁾ 등 많은 연구들이 진행된 바 있다. 국내에서는 배연속도가 연소율 변화에 미치는 영향⁵⁾, 화재발생시 연기유동⁶⁾, 도로터널내 화재시 온도분포 및 연기유동⁷⁾, 수직갱의 배연효과⁸⁾ 등의 연구가 꾸준히 수행되고 있으나 대면교행터널의 경우에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 전남 ○○터널을 대상으로 하였으며, 방재계획 일환으로 배연시스템을 개발하였고, 개발된 시스템의 타당성을 입증하고 화재시 이용객의 안전한 대피 검증을 위해 화재 시뮬레이션 및 모형실험을 수행하였다.

2. 배연 시스템의 개발

터널환기방식은 크게 종류식, 반횡류식 및 횡류식의

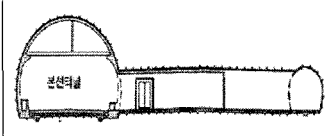
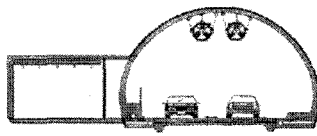

3가지로 분류할 수 있다. 종류식은 터널 크라운부에 설치되어 있는 제트팬의 풍향에 의해 터널내에서 발생하는 매연, CO, Nox 등을 갭외로 배출시키는 형태이며, 반횡류식은 터널외부 환기소로부터 터널내부 덕트를 통하여 급기나 배기중 1가지만을 운영하여 환기시키는 방식이고 횡류식은 급기 및 배기가 동시에 이루어져 터널내 오염물질을 배출시키는 방식이다. 이중 터널내 화재시 배연이 가능한 방식은 반횡류식과 횡류식이며, 종류식의 경우는 배연이 불가능하다. 즉 터널내 화재시 이용객의 안전한 피난을 위해 열 및 연기확산을 방지시킬 수 있는 시스템이 필요한데, 반횡류식 및 횡류식의 경우는 덕트를 통하여 연기를 신속히 배출시키는 반면 종류식은 제트팬을 이용하여 한쪽방향으로 풍향을 조정함으로써 연기를 갭외로 배출시킨다.

일방향 터널은 위 3가지 환기방식과는 무관하게 화재시 터널과 터널사이의 피난연결통로를 통하여 이용객이 대피함으로써 어느 정도 인명피해를 최소화시킬 수 있으나, 대면교행터널의 경우는 피난연결통로가 없으므로 이용객은 갭문으로 대피해야만 한다. 이때 화재규모에 따라 다르지만 연기확산속도가 이용객의 피난속도보다 큰 규모의 화재라면 심각한 인명피해를 초래하게 된다. 따라서 최근 터키 및 대안설계에서 대면교행터널에 대한 이용객의 피난시나리오가 보다 상세히 검토되었으나 각 방재시스템에 따라 차이가 있으며 그 특징을 살펴보면 Table 1과 같다.

Table 1에서 나타낸 바와 같이 대피터널과 피난연결통로를 설치한 방식이 가장 안전하나 경제적 부담감 가중으로 터널연장이 특별히 긴 경우에 적용되며, 피난소 시설은 터널내 화재가 장기간 노출될 경우 몽블랑 터널과 같은 사고를 초래하는 단점이 있다. 격벽 대피시설은 출입문이 가깝게 위치하여 대피가 용이하지만 대형 화재시 온도의 급격한 상승이나 격벽파손시 대피기능이 상실되어 위험에 노출될 우려가 있다. 또한 피난터널과 연결통로와는 달리 피난소 및 격벽 대피시설은 배연설비를 갖추지 못하기 때문에 터널내 대형화재시 열 및 연기확산속도가 빠르게 진행되어 현재 국내기준에서 적용하고 있는 250 m 간격의 피난문으로는 대피가 불가능한 것으로 판단된다. 즉 연기확산속도가 이용객의 대피속도보다 빠르게 되어 피난문으로 대피하기 전에 질식될 우려가 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 Fig. 1과 같이 격벽시설과 배연시스템을 구비한 방재계획을 개발하였다.

Fig. 1의 원리를 설명하면 터널의 우측 격벽을 설치하고 그 격벽을 상하로 분리하여 하부시설은 이용객의 피난을 위한 대피통로로 사용되며 상부시설은 외부 배연

Table 1. 대면교행터널의 화재시 대피를 위한 방재시스템 적용사례 분석

구분	대피터널과 피난연결통로	피난소 시설	격벽 대피시설
개요도			
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 본선터널과 분리되어 완벽한 대피시설 제공 · 유지관리 통로, 비상시 소방차 및 구급차 통행으로 구난효율성 확보 · 설치비용 고가로 경제적 부담감 가중 	<ul style="list-style-type: none"> · 대피인원 피난소 대피후 구조대 도착 대기 · 터널내 화재가 장기화 될 경우 열에 노출되어 위험 · 터널 외부로 피난할 수 없어 심리적인 공포감 가중 · 매우 경제적인 	<ul style="list-style-type: none"> · 출입문이 가깝게 위치하여 용이한 대피 가능 · 화재시 연기유입 용이 · 온도상승이나 격벽 파손시 대피통로의 기능상실 · 터널단면 확대로 다소 비경제적임
적용사례	배후령 터널(L=4,530 m)	들입재 터널(L=1,130 m)	곰티재 터널(L=1,030 m)

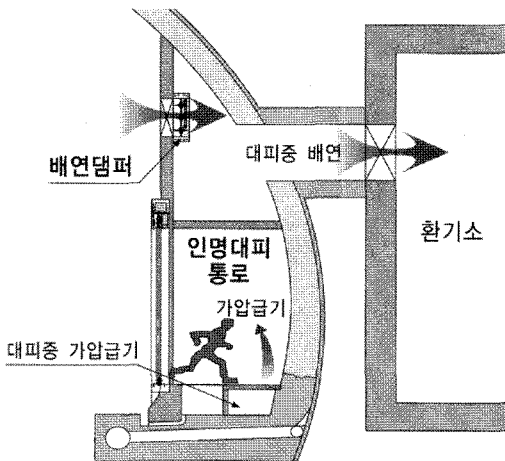


Fig. 1. 격벽대피통로와 배연시스템

축류팬을 통해 연기를 신속히 제거할 수 있는 구조이다. 이때 하부시설은 이용객의 안전한 대피를 위해 2부분으로 나누어 진 공동구를 통해 외부공기가 유입되도록 계획하였으며, 2명이 동시에 통과가 가능하도록 1.2 m의 폭과 2.0 m의 높이로 대피통로를 설치하였다. 또한 상부시설의 배연풍도는 50 m마다 댐퍼를 설치하였으며, 화재발생시 화재원에서 가장 근접한 댐퍼를 중심으로 자동적으로 4개가 동시에 열리면서 집중적으로 연기를 배출토록 계획하였다.

3. 화재 시뮬레이션 및 축소모형실험

대면교행터널에서 배연풍도를 구비한 방재시스템의 적정성을 평가하기 위해 화재 시뮬레이션 및 축소모형

실험을 수행하였다.

3.1 화재 시뮬레이션

본 연구에서 사용한 화재 시뮬레이션 모델은 터널환기 전용 CFD 모델로 개발된 미국 Innovative Research사의 SOLVENT ver. 1.0(2000, 11)이다. COMPACT-3D를 기초로 하여 프로그램 된 SOLVENT는 1988~1999년까지 10여년간에 걸쳐 화재규모 10~100 MW를 대상으로 총 98회 수행된 미국 Memorial 터널 화재시험(9) 프로그램인 MTFVIP의 결과를 통하여 광범위하고 체계적으로 검증이 되었으며 그 주요 특징은 아래와 같다.

- ① MTFVIP의 결과를 상당부분 모델내에 포함 하므로 현실성있는 분석이 가능하다.
- ② 화재발생시 입구와 화재발생지점 사이에 정체차량의 배치특성에 따른 환기저항계수를고려한 K Blockage의 실험결과를 입력할 수 있다.
- ③ 실험결과에 근거하여 Radiation에 의한 에너지 손실의 고려가 가능하다.

본 연구의 시뮬레이션 조건은 20 MW 규모의 화재가 터널 중간에서 발생한다고 가정하였고 격벽 상부시설의 배연풍도는 가동한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 분석하였으며, 화재 시뮬레이션 입력자료를 가정하여 나타내면 Table 2와 같다.

3.2 축소모형실험

(1) 모형터널의 제작

실제 화염의 거동을 묘사하기 위해 실제 터널 500 m 구간에 대하여 1/20의 축척을 적용하였으며, 모형실험에 대한 장치를 나타내면 Fig. 2와 같고, Fig. 3은 그

Table 2. 화재 시뮬레이션 및 축소모형실험

구분	입력자료		비고
터널	길이	1,360 m	
	경사	-2%	
화재발생위치	입구로부터 680 m		
배연풍도	면적	1.776 m ²	냄퍼는 화재원 부근 4개소만 개방
	배연풍량	35.2 m ³ /sec	
	댐퍼	0.5 m(H)×1.2 m(W) 간격 : 50 m	
화재규모	20 MW Heating value : 42,600,000 J/kgf Fuel consumption rate : 0.487 kgf/s		화재크기 : 길이(5.0 m)× 폭(2.8 m)×높이(3.5 m)
Radiation loss factor	0.3		
시뮬레이션 시간	600sec		$\Delta t=5$ sec
터널내 초기온도	0oC		ΔT 의 의미로 해석
제트팬 가동대수 (ϕ 1,030)	0		
정체차량길이	양차선 모두 1/2구간 정체		화재발생위치에서 전방차량은 모두 대피 가정
K Blockage	0.2387		차량정체구간의 마찰 저항계수

전경을 나타낸 것이다. 이때 모형터널의 수평길이는 25 m이고 높이는 0.346 m로 제작하였다(Fig. 4). 화원에서 발생하는 열에 의한 변형을 막기 위해 두께 5 mm의 강화아크릴을 사용하였다.

Fig. 2의 모식도는 3.1절의 화재 시뮬레이션과 동일한 조건을 만족하도록 500m 길이의 분석대상 구간에는 하향구배쪽 경구로부터 140 m, 280 m, 420 m, 560 m, 즉 140 m 간격으로 제트팬을 2대씩 병렬 설치하였으며 10개의 댐퍼와 3개의 대피통로 피난문을 포함하였다.

또한 정체차량이 가장 많은 10 km/hr의 경우를 분석 대상으로 하였으며, 단위 구간별 정체차량의 분포밀도가 동일한 것으로 가정하여 총 55대를 고려하여 배치하였다.

(2) Froude 상사를 이용한 변수 분석^{9,10)}

Froude 수에 의한 상사는 여러 학자들에 의하여 터널 화재의 모형실험에 적용되어 왔다. Froude 상사의 기본은 모든 축소변수에 동일한 Froude 수를 유지하는 것이

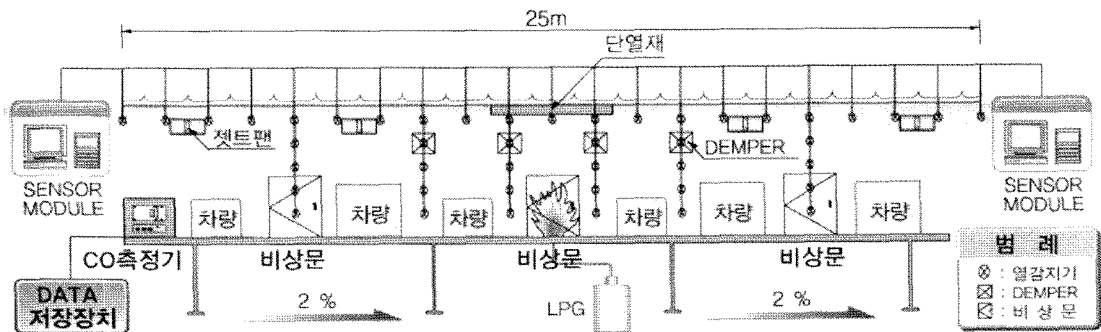


Fig. 2. 모형실험장치 모식도

다. 즉 Froude 수를 유지하기 위해서는 모형이 선형적으로 축소제작된 경우(linear scaling)에 열량과 풍속 모두를 변화시켜야만 한다. 이와 같은 조건을 만족하는 Froude 상사에 의한 변수를 요약하면 Table 3과 같다.

(3) 화재원의 결정

모형의 화재원은 외국의 축소모델실험에서 일반적으로 사용하는 방법인 17.7 cm×17.7 cm 크기의 프로판 가스 버너에 화염의 일정한 분포를 위하여 버너 상부에 1 cm 지름의 스틸 구슬을 2중으로 덮어서 실험을 수행하였다. 프로판 가스의 연소량은 체적유량계 및 봄베(bomb)의 질량감소율을 동시에 측정 계산하였다. 화재 규모는 실제 화재규모인 20 MW와 화재규모 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 15 MW 규모를 실험대상으로 하였다.

프로판의 연소열은 46.4 MJ/kgf 정도이며 상대분자량은 44 kgf/mol이다. 따라서 프로판 1 l/min의 연소열은 다음 식과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 1\text{ l/min} &= \frac{1}{22.4} \times 44.0\text{ gf/min} \\
 &= \frac{1}{22.4} \times 44.0 \times 46.4 \times \frac{1}{60} \text{ kJ/sec} \quad (1) \\
 &= 1.5\text{ kW}
 \end{aligned}$$

즉 프로판 1 l/min의 발열량은 1.5 kW 정도이므로 본 축소모형의 요구 발열량(11.18 kW)를 얻기 위해서는 7.5 l/min의 프로판 가스가 필요하다9).

(4) 열전대의 설치

Fig. 2와 같이 화재원 직상부에 R-type 열전대를 설치하여 화재발생전후 온도변화를 실시간 측정하였다.

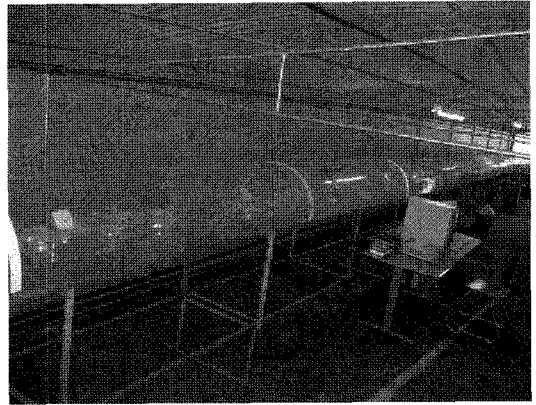


Fig. 3. 모형실험 전경

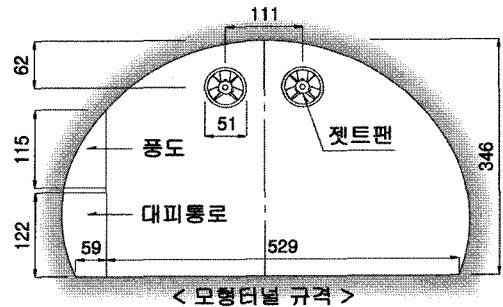


Fig. 4. 축소모델의 터널단면 형태(단위 : mm)

상향구배의 온도를 측정하기 위하여 화재원으로부터 1.25 m(실제 25.0 m)마다 총 9개 지점에서 T-type 열전대를, 1.25 m, 3.75 m, 5.0 m 지점에서는 단면상의 온도변화를 측정하기 위하여 단면상에 수직으로 5개의 측정점(7.5 cm~32.6 cm)을 설치하였다. 이때 하향구배의

Table 3. Froude 상사에 의한 변수

변 수	Fullscale	Model	Froude 상사법칙
분석구간 길이	500 m	25 m	Linear scaling, $\frac{H_{model}}{H_{fullscale}} = \frac{1}{20}$
터널 높이	6.922 m	34.6 cm	Linear scaling, $\frac{H_{model}}{H_{fullscale}} = \frac{1}{20}$
화재 강도	20 MW	11.18 kW	$Q_{model} = Q_{fullscale} \times \left(\frac{H_{model}}{H_{fullscale}}\right)^{\frac{5}{2}}$
	15 MW	8.39 kW	
배연 풍량	35.2 m ³ /s	1.18 m ³ /s	$Q_{model} = Q_{fullscale} \times \left(\frac{H_{model}}{H_{fullscale}}\right)^{\frac{5}{2}}$

온도측정은 상향구배의 열전대 설치방법과 동일하게 설치하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 화재원 온도변화

3.1절과 같이 배연팬을 가동한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 화재규모 20 MW로 화재 시뮬레이션을 수행한 결과 화재원의 온도변화를 나타내면 Table 4 및 Fig. 5와 같다. 화재발생 후 100초까지는 변화가 거의 없으며 200초 경과시는 배연팬을 가동한 경우가 10.9°C 감소, 그리고 200초 이후부터는 배연팬을 가동한 경우의 온도가 급격히 감소하였다.

한편, 화재원 직상부에 높이 6.52 m(모델 높이 32.6 cm) 지점에 설치된 열전대에서 측정한 온도변화를 나타내면 Table 5 및 Fig. 6과 같다. 화재 시뮬레이션 분석결과와 마찬가지로 온도변화는 화재규모에 상관없이 200초 이후 배연팬 가동시 온도변화가 뚜렷하였다. 또한 화재원 온도 변화 역시 2가지 분석 모두 다소 차이가 있으나 유사한 경향을 보였다. 그러나 Fig. 6의 550초 정도에서 배연팬 가동이나 미가동시 동일한 온도를

Table 4. 시뮬레이션 분석에 의한 화재원 온도변화

시간(sec)	화재원의 온도(°C)		온도변화(B-A)
	배연팬가동(A)	배연팬미가동(B)	
100	72.7	73.7	1.0
200	135.0	145.9	10.9
400	234.5	279.1	44.6
600	230.2	340.5	110.3

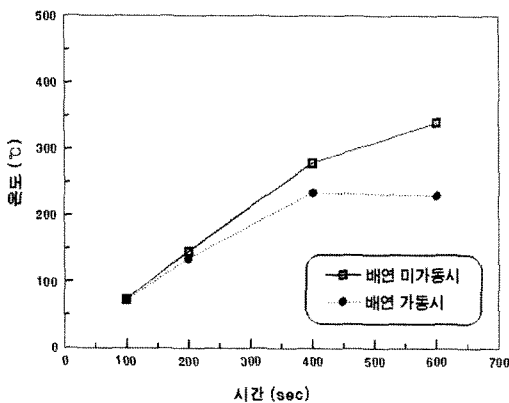
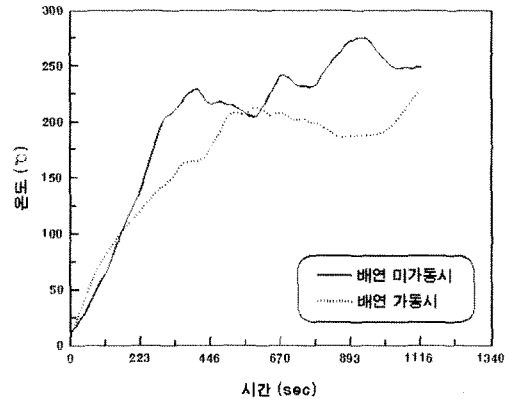


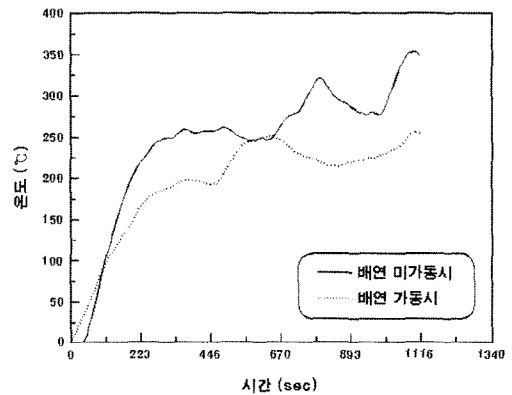
Fig. 5. 화재원 온도변화(시뮬레이션)

Table 5. 모형실험 분석에 의한 화재원 온도변화

화재규모	화재높이	배연여부	온도(°C)	
			268초	최대
20 MW	0.6 m	가동	180	250
	0.6 m	미가동	240	350
15 MW	1.2 m	가동	135	225
	1.2 m	미가동	177	275



(a) 화재규모 20MW



(b) 화재규모 15MW

Fig. 6. 화재원 온도변화(모형실험)

관찰할 수 있는데 이것은 500 m의 터널연장을 모형화 하였기 때문에 일시적으로 외부공기가 화재원으로 유입된 시간과 일치하는 현상으로 볼 수 있다.

4.2 연기 확산속도

화재 시뮬레이션 분석결과 배연을 하지 않는 경우 약

Table 6. 이용객의 대피속도 기준

구 분	대피속도 (m/s)	비 고
'99 PIARC Report	0.5~1.5	연기속의 가시성, 조명, 비상구표시의 시안성 등에 따라 달라짐
NFPA-130	약 1.0	4% 이하 진입로, 복도, 플랫폼에 적용
고속도로 터널 방재시스템 연구	0.8~0.9	경사가 없는 직선터널에서 조명 등에 따라 달라짐
터널기술(2003, Vol.4, No.1)	1.19	고속도로 대피속도
건설교통부 지침	0.7~1.0	-

500초까지 1.1 m/sec 정도의 속도로, 배연을 하는 경우에는 155초 정도까지 0.5 m/sec 정도의 저속으로 연기가 확산된다. 건설교통부 지침(Table 6)에 의거 이용객의 대피속도를 0.7 ~1.0 m/sec로 할 경우 배연을 하지 않는 경우는 20 MW 규모 화재시 연기 확산속도가 이용객의 대피속도를 초과하므로 피난문에 도달하기 전에 질식사할 위험에 노출되나, 배연팬을 가동시에는 대피속도보다 작기 때문에 안전하게 대피할 수 있어 대면교행터널에서 배연시스템은 인명구난을 위해 필요한 시설임을 알 수 있다.

한편 화재 모형실험시 프로판 가스는 거의 완전연소가 이루어지므로 발생연기의 확산을 시각적으로 평가하기가 불가능하다. 따라서 다른 전문가 집단에 의한 터널화재 모델실험에서와 같이 온도변화 경계면을 연기의 경계면으로 규정하고 분석하였다. 연기의 경계면은 온도상승이 2.5°C인 경계면으로 정의하였으며), 2.5°C는 열전대로부터 측정된 오차를 최소화하기 위한 목적으로 정의된 값이다. 모든 실험은 배연팬을 가동한 경우와 가동하지 않은 경우를 비교할 수 있도록 수행하였으며 결과의 요약은 Table 7과 같다. 배연팬 미가동시 연기 확산속도는 0.36 m/sec에서 가동시 0.27 m/sec로, 그리고 미가동시 0.82 m/sec에서 가동시 0.53 m/sec로서 가동시는 미가동시에 비해 25~29% 정도의 연기 확산속도가 감소되었다. 시뮬레이션 분석결과와 비교할 때 미가동시는 모형실험에 의한 연기 확산속도가 작은 값을 나타내고 있고, 가동시는 20 MW의 경우 거의 유사한 연기 확산속도를 보이고 있다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 Table 6의 이용객의 대피속도를 고려할 경우 가동시는 연기 확산속도보다 대피속도가 빠르기 때문에 20 MW 및 15 MW의 화재발생시 안전하게 대피할 수 있다. 그러나 배연팬 미가동시는 일부 연

Table 7. 모형실험분석에 의한 연기 확산 속도

주요 실험변수		실제경과 시간(초)	확산속도(m/s)	
화재규모	화재높이		미가동	가동
20MW	0.6m	268	0.67	0.58
		402	·	0.51
		536	·	·
	1.2m	268	0.57	0.54
		402	0.50	0.46
		536	·	0.43
15MW	0.6m	268	0.82	0.53
		402	·	0.52
		536	·	·
	1.2m	268	0.50	0.39
		402	0.38	0.32
		536	0.36	0.27

※ 빈칸은 연기 확산거리가 250 m를 초과하여 계속되지 않은 경우임

기 확산속도가 이용객의 이동속도를 초과하여 터널내 20 MW 규모의 화재시 위험에 노출되게 된다. 따라서 화재 시뮬레이션과 마찬가지로 대면교행터널에서 배연시스템은 화재시 인명구난을 위해 필요한 시설임 입증되었다.

4.3 CO 확산속도

본 실험에서 상향구배방향 모델 갱구에서의 CO 가스층의 도달시간은 연기 확산속도를 추정해볼 수 있는 변수이다. Fig. 7은 화재규모 20 MW일 때 상향구배 방향 모델 갱구에서의 CO 농도분포를 보여주고 있다. 배연팬을 가동할 경우 많은 발생가스가 배연풍도를 통하여 제거되므로 도달시간이 상대적으로 늦음을 알 수 있다.

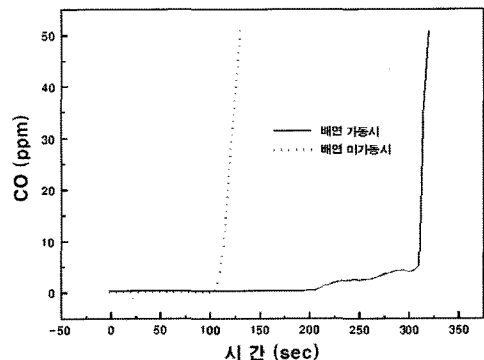


Fig. 7. 갱구부 CO 농도 분포

Fig. 7의 CO 가스층 확산속도 0.55 m/sec 및 0.17 m/sec는 온도변화로 추정된 연기층의 확산속도에 비해 비교적 느리게 나타난다. 그러나 프로판 연료의 불완전 연소에 따른 CO 가스의 발생량은 총 연기 발생량에 비하여 비교적 작은 양이므로 CO 가스층의 확산속도에 비하여 높은 온도변화 추정에 의한 연기층의 정의가 비교적 합리적이라고 판단된다.

4.4 피난문 부근 연기 도달거리 및 온도변화

본 모형실험은 화재발생 지점이 대피로 진입문 바로 전면이므로 화재발생시 가장 빨리 받는 화재원으로부터 각각 150 m 거리에 있는 상하 양방 2개의 피난문에서의 온도변화 및 연기 도달시간이 대피가능여부를 결정하는 주요 변수가 된다. 여기서 피난문 간격 150 m는 건설교통부 지침의 대피자 이동속도 0.7~1.0 m/sec와 대피가능시간 4분을 고려하여 결정한 것이다.

하향구배 및 상향구배에 따른 4분 경과시 연기 도달 거리를 나타내면 Table 8과 같다. 이용객의 대피허용시간을 4분(240초)으로 규정할 경우 하향구배시는 배연팬 가동에 상관없이 150 m 떨어진 피난문까지 연기가 확산되지 않고 있다. 따라서 이 시간동안 하향구배 구간에 놓인 모든 대피통로 피난문까지 본터널을 이용한 대피가 가능하다. 그러나 상향구배시는 배연팬 미가동시 4분 경과 후 연기 도달시간이 150 m 떨어진 피난문까지 확산되어 이용객 대피가 곤란한 반면 배연팬 가동시는 4분 이내에 안전하게 대피할 수 있음을 알 수 있다.

한편 화재 시뮬레이션 분석결과 시간경과에 따른 인접 피난문에서의 온도증가를 나타내면 Fig. 8과 같다. 배연 미가동시 225초후 9.57°C까지 증가하며 그 이후 급속히 증가하여 600초 경과시는 98.6°C까지 증가한다. 반면 배연 가동시는 225초후 3.84°C까지 증가하며 400 초 경과시 최대 8.64°C까지 증가하나 그 증가량이 미소하므로 배연팬 작동에 의한 효과를 입증할 수 있었다.

화재 모형실험 분석에 의해 268초 경과시 피난문에서의 온도증가를 나타내면 Fig. 9와 같다. 배연팬 가동시

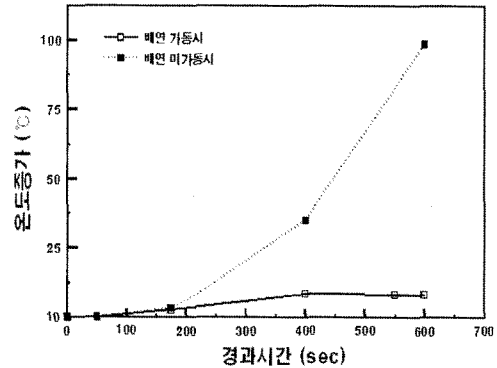


Fig. 8. 시뮬레이션 분석결과에 의한 인접 피난문의 온도증가

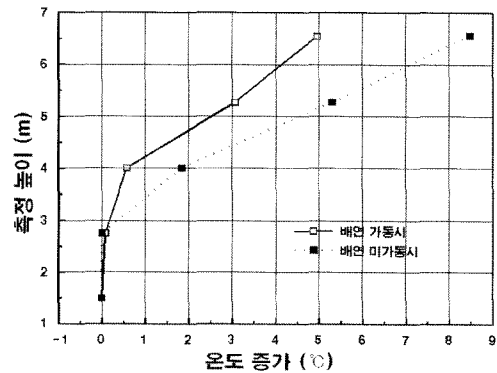


Fig. 9. 모형실험 분석결과에 의한 인접 피난문의 온도증가

측점높이 6.52 m에서 미가동시에 비해 3.5°C의 온도가 감소됨에 따라 시뮬레이션 결과와 다소 차이가 있으나 이것 역시 배연팬 작동효과를 확인할 수 있었다.

4.5 실험결과와 고찰

본 연구에서는 일방향 터널의 화재시 이용객의 안전한 대피를 위하여 배연시스템을 개발하였으며, 이것을 검증하기 위해 화재 시뮬레이션 및 모형실험을 수행하

Table 8. 모형실험 분석에 의한 4분 경과시 연기도달거리

화재규모	화재높이(m)	하향구배방향 연기 도달거리(m)		상향구배방향 연기 도달거리(m)	
		미가동시	가동시	미가동시	가동시
20 MW	0.6	86.6	77.6	161.1	140.3
	1.2	83.5	86.6	137.2	131.4
15 MW	0.6	74.6	68.7	197.0	128.3
	1.2	74.6	62.7	119.4	92.5

였다. 이용객의 안전한 대피를 위하여 화재원 온도변화, 연기 확산속도, CO 확산속도, 피난문까지의 연기 도달 거리 및 온도변화등 등 각각적인 검토를 수행하였다. 이중 가장 중요한 것은 15 MW 및 20 MW의 화재규모를 기준으로 할 때 연기 확산속도보다 이용객의 이동속도가 빠르면 150 m로 계획된 피난문까지 안전한 대피가 가능하다는 것이다.

화재 시뮬레이션 분석은 터널의 중간지점에서 화재가 발생하였을 경우이며, 화재 발생 후 출구편의 차량은 모두 빠져나가고 입구편에는 신속한 교통차단이 안된 상황의 극심한 정체를 보이는 경우를 가정하였다. 이때 차량대수 및 탑승인원은 Table 9 및 10과 같다.

시뮬레이션 결과 배연을 하지 않은 경우 탑승인원 752명 전원 대피하는 시간이 335초가 소요되었으나 배연을 한 경우는 185초가 소요되었으며, 이를 나타내면 Fig. 10과 같다. 이 결과로부터 배연시스템을 가동한 경우 대피가능시간 4분, 즉 240초 이내에 인명손상없이 대피가 가능함을 알 수 있다.

한편 화재 시뮬레이션 및 모형실험으로부터 분석된 결과를 요약하여 나타내면 각각 Fig. 11 및 12와 같다.

Fig. 11은 화재 시뮬레이션 결과로서, 배연팬 미가동시는 화재발생 후 연기 확산속도가 135 m 지점에서 이용객의 대피속도(0.7 m/sec)를 추월하여 일부 대피인명의 피해발생이 우려되며, 배연팬 가동시는 안전구역 대피 후 연기가 도달되므로 모든 이용객이 안전하게 대피할 수 있음을 보이고 있다.

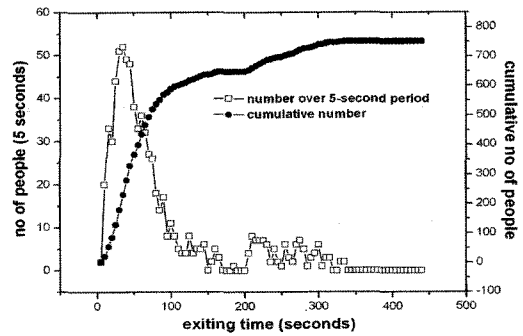
Fig. 12는 모형실험결과로서, 배연팬 미가동시는 연기 확산속도 영역과 대피자의 이동속도 영역이 일부 중첩되어 화재시 연기에 질식하는 등의 인명피해가 발생할 가능성이 있음을 보여주고 있으며, 배연팬 가동시는 연기 확산속도 영역과 대피자의 이동속도 영역이 중첩되지 않으므로 인명피해가 발생되지 않는 것을 확인할 수 있다.

Table 9. 정체차량

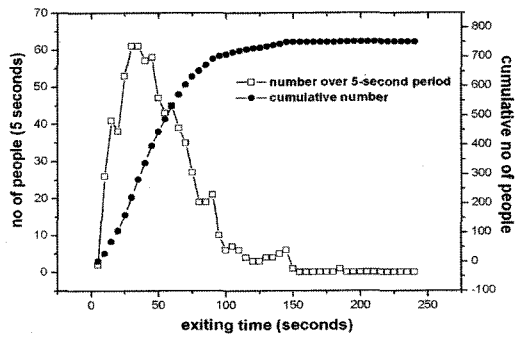
구간	승용차	버 스		트 리 크			계
		소형	대형	소형	중형	대형	
상행	70	11	2	22	12	5	122
하행	67	10	2	20	10	4	119

Table 10. 차량별 탑승인원

구분	승용차	버 스		트 리 크		
		소형	대형	소형	중형	대형
인원수 (명)	2	10~15	33	1	1	1



(a) 배연하지 않은 경우



(b) 배연한 경우

Fig. 10. 화재시 대피인원 분포

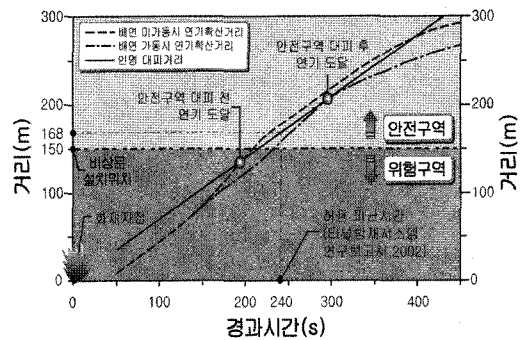


Fig. 11. 화재 시뮬레이션 분석결과에 의한 인명대피 가능성 분석

위와 같이 화재원의 온도변화, 연기확산속도, 피난문의 연기도달거리 및 온도분포, CO 확산속도 등을 토대로 대면교행터널에 적용한 배연시스템의 효과를 해석적·실험적으로 입증하였으나, 향후 실제 터널을 대상으로 화재 실험을 실시하는 것이 필요하다.

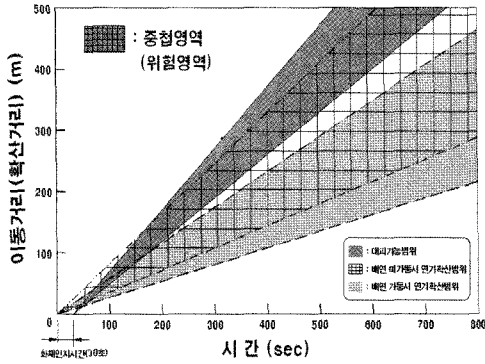


Fig. 12. 모형실험 분석결과에 의한 인명대피 가능성 분석

5. 결론

본 연구에서는 대면교행터널의 방재계획 일환으로 배연시스템을 개발하고 화재 시뮬레이션 및 모형실험을 통해 배연능력에 대한 적정성을 검토하였다. 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 화재원의 온도변화는 배연팬 가동시 200초 정도 경과 후 뚜렷한 변화를 보였다. 시뮬레이션 결과에서는 110°C, 모형실험은 60°C까지 온도가 감소하였다.
2. 연기확산속도에 대한 시뮬레이션 분석결과 배연팬 미가동시는 1.1 m/sec, 가동시는 0.5 m/sec이며, 모형실험에서는 미가동시는 0.36~0.82 m/sec, 가동시는 0.27~0.58 m/sec로 연기확산 속도가 감소되었다.
3. 이용객의 대피허용시간을 4분으로 규정할 경우 피난문 부근의 연기도달거리는 하향구배방향에서는 배연팬 미가동시 74.6~86.6 m이고, 가동시는

- 62.7~86.6 m이다. 상향구배방향에서는 미가동시 119.4~197.0 m이고 가동시는 92.5~140.3 m이다.
4. 피난문 부근의 온도증가는 시뮬레이션 분석 결과 98.6°C까지 증가하나 가동시는 8.64°C까지 미소하게 증가한다. 모형실험결과는 배연팬 가동시가 미가동시에 비해 0~3.5°C까지 감소하였다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2004, “도로터널 방재시설(비상시설) 설치기준 개정 작성을 위한 연구”, II. 터널사고사례분석
2. Y. Oka and G. T. Atkinson, 1995, “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires”, Fire Safety Journal, Vol. 25, No. 4, pp. 395-322
3. G. T. Atkinson and Y. Wu, 1996, “Smoke Control in Sloping Tunnels”, Fire Safety Journal, Vol. 27, No. 4, pp. 335-341
4. R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt, 2001, “The Influence of Longitudinal Ventilation Systems on Fire in Tunnels”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 3-21
5. 유홍선, 양승신, 2005, “터널화재시 배연속도가 연소율 변화에 미치는 실험적 연구” 터널기술 제7권 2호, pp. 109-117
6. 김정엽, 신현준, 강세구, 안정철, 2004, 도로터널 화재발생시 연기유동에 관한 축소모형실험 연구”터널기술 제6권 2호, pp. 141-148
7. 최태희, 윤영표외 5인, 2002, “도로터널내 화재시 온도분포 및 연기유동분석 연구” 터널기술 제4권 1호, pp. 27-43
8. 유용호, 윤찬훈외 2인, 2005, “장대 교통터널 화재시 수직갱의 배연효과에 관한 실험적 연구”. 터널기술 제7권 1호, pp. 27-35
9. Bechtel and Parson Brinckerhoff, 1999, “Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program”, Phase, IV Report
10. EUREKA, 1995, Fires in Transport Tunnel : Report on Full-Scale Tests, EUREKA EU 499 : RIRETUN. Pub. Studingesellschaft Stahlanwendunge. V. Düsseldorf.

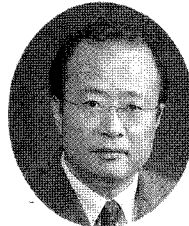
이 상 은



1991년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1993년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 02-3433-3084
 E-mail: lee9367@empal.com
 현재 삼보기술(주) 지반부 이사, 삼척대학교 겸임교수

이 창 우



1978년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1983년 미국 펜실베이니아주립대학교 대학원 자원시스템공학 공학석사
 1986년 미국 펜실베이니아주립대학교 대학원 자원환경공학 공학박사

Tel: 051-200-7769
 E-mail: cwlee@daum.net, donga.ac.kr
 현재 동아대학교 지구환경공학부 교수