

# 터널화재시 부분배연설비에 의한 배연효율 향상에 관한 연구

## Study of the Smoke Extraction Efficiency Improvement by the Partial Smoke Extraction System in Tunnel Fire

유용호\*<sup>1</sup>, 이의주<sup>2</sup>, 신현준<sup>3</sup>, 신한철<sup>4</sup>, 윤영훈<sup>5</sup>

Yoo, Yong-ho · Lee, Eui-ju · Shin, Hyun-jun · Shin, Han-chol · Yoon, Young-hoon · Kim, Chang-whan

### Abstract

The objective of this study is to analyze the smoke movement and the smoke extraction efficiency using by the partial extraction system for case of tunnel fire. Based on Froude modeling and iso-thermal model, the 1/20 scaled model tunnel (12m long) was constructed. In the case of the upper critical velocity in the main tunnel, the smoke extraction efficiency shows almost same between group damper and distributed damper. Finally, if the fire occurs on a traffic jam in a tunnel, it is proposed that the open dampers in partial gallery extract smoke from the main tunnel without jet fan operation. Then, after the passengers have escaped the tunnel, the jet fans work on. On the other hand, If the traffic is uncongested in the tunnel, the jet fans (smoke control system) and partial extraction system (smoke exhaust system) are operated at once in tunnel fire.

**Keywords:** Tunnel fire, isothermal model, smoke movement, the smoke extraction efficiency, the partial extraction system

### 요 지

본 연구는 프라우드 상사와 등온기체모델을 적용한 축소모형실험을 실시하여, 터널화재시 연기의 거동과 부분배연설비의 배연효율을 분석함으로써 방재설비의 운영방안을 제시하고자 하였다. 실험 결과 터널 화재시 임계유속 이상의 제연 풍량이 유지 될 경우, 부분 배연 갤러리의 배연효율은 그룹댐퍼와 균일댐퍼 모두 거의 유사하였다. 또한, 터널내 차량이 정체시 화재가 발생할 경우, 화재초기에는 화원 앞·뒤에 위치해있는 부분 배연 갤러리만을 열어 연기의 성층화를 유지하면서 연층을 배연시키고 제트팬은 가동시키지 않고, 이후 승객이 모두 대피할 수 있는 충분한 시간이 지난 후 제트팬을 함께 가동시켜 터널 내의 연기를 배출하도록 하며, 교통 소통이 원활한 경우에는 터널의 제연설비를 가동하여 연기의 후방전파를 차단하고 동시에 부분배연 설비를 가동할 것을 제안하였다.

**주요어:** 터널화재, 등온기체모델, 연기거동, 배연효율, 부분배연설비

\*1 정회원, 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부, 선임연구원 (ventil@kict.re.kr)

2 부경대학교 안전공학부, 조교수

3 정회원, 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부, 부장

4 한미파슨스(주) GK설계팀, 이사

5 대우건설 GK설계팀, 부장

## 1. 서론

터널화재시 원활한 탈출로 확보 및 연층 제어를 위한 방재시스템은 장대 터널을 건설하는데 있어 매우 중요한 설계사항이다. 그러나, 국내외적으로도 장대 터널의 건설 및 운영사례는 그리 많지 않으며, 최근 발생한 대규모의 화재 사고 후 터널내 방재설계기준의 전반적인 재정립이 요구되고 있다. 일반적으로 도로터널은 일반도로보다 사고 발생율은 적으나, 인명피해 측면에서 위험도는 일반도로보다 매우 높다. 지금까지 발생한 터널화재사고를 고찰해 볼 때, 장대 산악 터널에서의 화재는 대규모의 피해를 야기하였음을 보이고 있으며, 일례로 1999년 화재로 인해서 39명의 사망자가 발생한 알프스 산맥을 관통하는 몽브랑 터널의 경우, 2년 9개월간 터널을 폐쇄할 수밖에 없었으며 터널폐쇄로 인한 간접적인 피해를 고려하지 않더라도 경제적인 피해는 총 3억9천2백만 유로에 달하는 것으로 보고되기도 하였다 (건설교통부, 2004). 또한, 대형인명피해가 발생한 화재의 경우, 제연시설의 용량 부족과 화재시 운영미숙으로 인하여 시야확보가 곤란하였던 점이 가장 큰 원인으로 판명되고 있다.

지금까지 터널 화재에 관한 연구는 주로 임계속도를 결정하는 것에 관심이 집중되어 있으며, W. D. Kennedy (1982), D. Tetzner (1999), Y. Wu (2000) 등의 실험식이 대표적이다. 국내에서도 최준석 등 (2002)은 대전 터널 실물화재실험을 실시하였고, 김정엽 등 (2004)은 축소모형실험을 수행하여 임계속도는 Kenedy 식에 의한 계산치 보다 커야 함을 보였다. 유용호 등 (2005)은 화재시 연기 전파특성을 고려한 피난 연락갱의 설치간격 및 수직갱의 배연효율 등에 관한 실험을 실시하였다. 김명배 등 (2004)은 횡류방식에 대한 실험을 실시하여 연기전파거리와 연기축적을 새로운 환기설계의 개념으로 제안하였다. 일반적으로 횡류환기방식의 경우 배연은 용이하나 연기흐름을 제어하는 제연능력이 떨어지며, 종류 환기방식은 제연능력은 우수하나 배연능력이 부족하기 때문에, 적절한 환기방식별 화재 발생시나리오에 따른 최적의 배연 또는 제연설계기술의 개발은 터널 화재 안전을 위하여 매우 중요한 요소이다. 그러나, 장대도로터널의 경우 화재시 발생하는 유독성 연기를 배출하기 위한 배연시스템의 구축에 많은 어려움이 있기 때문에, 배

연보다는 제연개념을 기반으로 연기의 유동방향을 제어함으로써 승객의 대피로를 확보하는 개념에서 화재시 안전에 대처하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 두 환기 방식이 가지는 문제점을 보완하기 위하여, 종류식 환기방안과 부분배연설비가 혼합된 터널을 대상으로, 화재시 연기 배출 특성을 알아보고 그 결과를 토대로 부분배연설비의 운영 방안을 고찰하여 보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 등온기체모델

등온기체 모델이란 화원을 공기보다 가벼운 기체 (일반적으로 헬륨)를 이용하여 화재시 발생하는 연층을 모사하여 연기의 거동을 파악하는 방식이다. 최근 Megret and Vauquelin의 연구 (2000)에서 보면 실험 결과를 바탕으로 이론적 관계식을 전개하여 화재에서 생성되는 연기의 유량과 온도를 전체발열량에 대해 얻었다. 또한, 예측된 연기 유량을 PIARC (1988)에서 권고된 값과 비교하여 타당성을 입증하였으며, 향후의 터널화재에 있어서 실제 화원을 모사 할 수 있는 연기 발생량을 결정할 수 있는 단서를 제공하였다. 화원의 크기에 따른 스모크 유량의 산정기법 개발은 등온기체 모델을 보다 현실적으로 만들었고, 실제 실험에 이용하여 제트팬에 의한 제연효과를 검증하였다. (O. Vauquelin and O. Megret, 2002)

연료를 헵탄 (Heptane)으로 사용한 풀화재의 경우 직경이 Dm라고 가정하면, 다음과 같이 화염과 발생하는 연기를 특성화 할 수 있으며, 실험에 적용될 화재 규모별 등온기체모델을 위한 모델 변수는 표 1과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m} S \Delta H_c \\ \dot{m} &= \dot{m}_\infty (1 - e^{-\alpha \beta D}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{m}_\infty$  : 휘발성물질의 질량감소율 (0.0784Kg /m<sup>2</sup>sec,  $\alpha \beta = 0.8m^{-1}$ )

$\Delta H_c$  : 휘발성물질의 연소열, (44.9□0<sup>6</sup>J/kg)

D : 풀화재의 직경, (m)

S : 화원단면적, (m<sup>2</sup>)

표 1. 화재 규모별 등온기체 모델 변수 (천장높이=7m)

HRR (MW)	Dia. (cm)	Q (l/min)	Air (%)	He (%)
1	4.3	156	52.5	47.5
2	5.5	286	48.8	51.2
5	7.8	625	43.8	56.2
10	10.5	1212	39.4	60.6
15	12.5	1747	36.9	63.1
20	14.3	2282	35.1	64.9

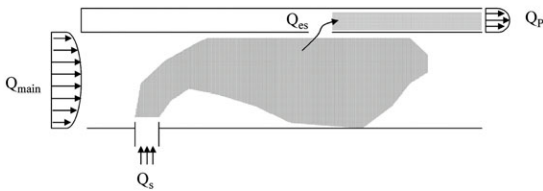


그림 1. 부분배연 설비의 배연효율

또한, 측정된 갤러리의 유량과 산소분율을 이용한 배연효율 ( $\epsilon$ )의 그림 1에 보이는 바와 같이 화원에서 발생되는 혼합공기와 부분배연 갤러리를 통하여 배출되는 혼합공기와의 관계로부터 얻어질 수 있으며, 계산식은 식 (2)로 표현될 수 있다. 즉, 부분배연 갤러리의 효율을 산소 농도계측을 통해 계산하기 위해서는 화원의 유량과 화원에서의 산소분율은 알고 있는 값이므로 부분배연 갤러리에서의 유량 (속도)과 산소 농도를 함께 측정하면 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{(\%O_2)_{amb} - (\%O_2)_{es}}{(\%O_2)_{amb} - (\%O_2)_s} \cdot \frac{Q_{es}}{Q_s} \quad (2)$$

- 여기서,  $(\%O_2)_{amb}$  : 대기중의 산소분율, (%)
- $(\%O_2)_{es}$  : 갤러리의 산소분율, (%)
- $(\%O_2)_s$  : 화원에서 배출되는 혼합가스의 산소분율, (%)
- $Q_{es}$  : 갤러리 유량, ( $m^3/sec$ )
- $Q_s$  : 화원에서 배출되는 혼합가스의 유량, ( $m^3/sec$ )

## 2.2 상사법칙

축소모형실험은 차원분석을 통해 실험결과를 일반화시키고 스케일링법칙을 만족시키는 무차원 매개변수들을 이끌어내는 것이 매우 중요하다. 유동을 해석하기 위한 대표적인 방법은 압력모델링과 Froude모델링이 있다. 압력모델링은 모델의 주위압력을 변화시킴으로써 실제상황을 모사할 수 있으나, 도로터널 환기시스템의 경우 모형의 주위압력을 변화시키면서 실험을 행하기가 현실상 어렵기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 일반적이다. Froude 모델링은 주위와 같은 상태에서 실험을 행할 수 있으며, 화재의 Froude 모델링은 기하학적 형태가 보존되어야 하므로 차원분석을 통하여  $V/L^{1/2}$ 와  $Q/L^{5/2}$ 를 일정하게 유지시킨다. Froude 모델링의 한계는 점착력이 매우 큰 경우이지만, 난류조건이 지배적인 화재인 경우 점착력은 무시될 수 있기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 가능하며, 모형터널과 실제터널의 열방출율 및 속도는 식 (3)과 같이 스케일링된다. (Oka Y. and Atkinson G.T., 1995)

$$\left(\frac{Q_m}{Q_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{5/2}$$

$$\left(\frac{V_m}{V_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2} \quad (3)$$

- 여기서,  $Q$  : 열방출율, (kW)
- $L$  : 터널길이, (m)
- $V$  : 환기속도, (m/sec)
- 하첨자 'm' : 축소모형에서 스케일된 값
- 하첨자 'r' : 실제 터널에서의 값

식 (3)을 이용하여 축소모형터널에서의 열방출율, 환기 속도 등을 계산하였으며, 그 결과를 실험에 적용하였다.

## 3. 축소모형실험

### 3.1 실험장치

터널모형은 1:20의 길이비로 축소하여 제작되었으며,

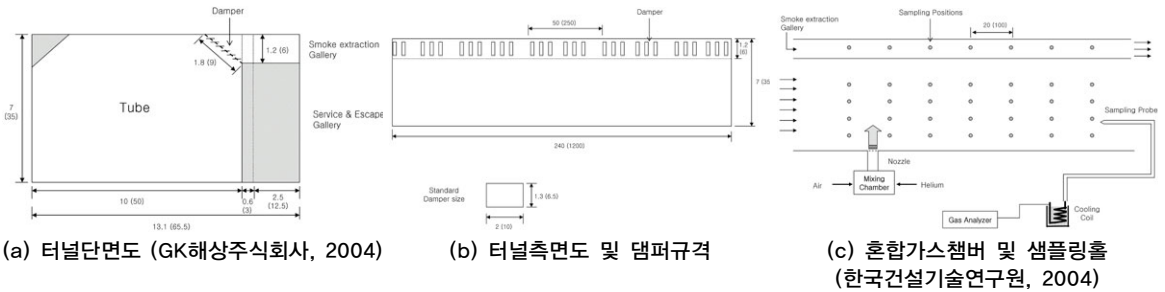


그림 2. 등온기체 모델을 이용한 실험의 개략도

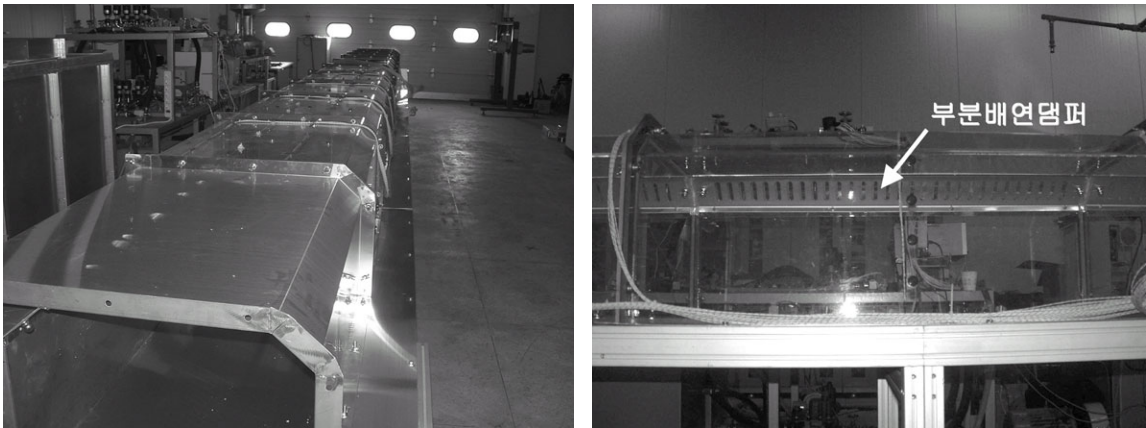


그림 3. 터널 축소모형 및 댐퍼

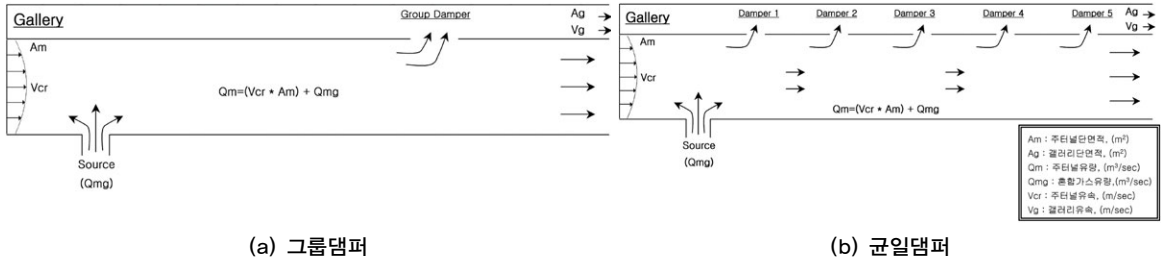
그림 2에 단면도, 측면도 및 적용된 댐퍼의 규격을 도시하였다. 도면에 표시된 값은 실제터널의 길이로서 미터 (m) 단위이고 괄호안의 값은 모형의 길이로서 단위는 센티미터 (cm)이다. 가스 농도 및 유속의 측정은 터널의 길이방향으로 1m 간격에 위치한 8개의 샘플링홀과 배연 갤러리 중앙에서 측정하였다. 터널 내에서의 산소 분율은 산소 가스분석기 (Horiba, 3100A)를 사용하였으며, 계측기 반응시간 (response time)을 고려하여 1분의 측정 간격을 유지하여 농도계측을 수행하였고, 유속측정에는 열선유속계 (Kanomax)가 이용되었다.

또한, 그림 3에서 보는 바와 같이 주터널과 부분배연을 담당할 갤러리에는 상부 6cm 지점에 일정간격(250cm)의 댐퍼 (10 $\phi$  5cm)를 설치하여, 그룹댐퍼와 균일댐퍼 일 경우를 나누어 실험하도록 제작하였으며, 주터널과 갤러리에 설치된 팬에 의하여 유량을 조절한다.

화원에 적용될 헬륨과 공기의 완전 혼합을 위한 챔버는 실린더 형의 원통으로 제작하였고 압축공기와 헬륨의 라인을 각각 2라인으로 나누어 엇갈리게 공급하도록 설계되었으며, 중간에 메쉬를 이용하여 균일한 유속으로 분출되도록 하였다. 압축공기는 대용량 컴프레서를 통해 공급하였으며, 컴프레서를 통해 나온 공기는 수분제거를 한 후 ON/OFF 밸브를 거쳐 면적식 유량계로 유량을 조절한다. 헬륨가스는 99.9%의 고순도 가스가 들어있는 3개의 실린더를 연결 하였으며, 유량은 공기와 동일한 면적식 유량계를 이용하여 조절하였다.

### 3.2 실험방법

실험방법은 그림 4에서 보는 바와 같이 크게 그룹댐퍼와 균일댐퍼일 경우로 구분된다. 그룹댐퍼는 화재위치로



(a) 그룹댐퍼

(b) 균일댐퍼

그림 4. 그룹댐퍼와 균일댐퍼

표 2. 배연효율 실험조건

구분 (그룹댐퍼)	주터널유속	Gallery fan inverter voltage
Case 1.	0.5m/sec	1.5 volt,
Case 2.		2.0 volt,
Case 3.		2.5 volt,
Case 4.		3.0 volt,
Case 5.		3.5 volt,
Case 6.		4.0 volt,
Case 7.	0m/sec	1.5 volt,
Case 8.		2.0 volt,
Case 9.		2.5 volt,
Case 10.		3.0 volt,
Case 11.		3.5 volt,
Case 12.		4.0 volt,

구분 (균일댐퍼)	주터널유속	Gallery fan inverter voltage
Case 13.	0.5m/sec	1.5 volt,
Case 14.		2.0 volt,
Case 15.		2.5 volt,
Case 16.		3.0 volt,
Case 17.		3.5 volt,
Case 18.		4.0 volt,
Case 19.	0m/sec	1.5 volt,
Case 20.		2.0 volt,
Case 21.		2.5 volt,
Case 22.		3.0 volt,
Case 23.		3.5 volt,
Case 24.		4.0 volt,

부터 약 4.5m 지점에 단면적 200cm<sup>2</sup>의 댐퍼가 위치하며, 균일댐퍼의 경우 단면적 40cm<sup>2</sup>를 가지는 댐퍼가 2m 간격으로 총 5곳에 위치하여 전체적인 댐퍼의 단면적은 그룹 댐퍼의 단면적과 동일하다. 또한, 표 2에 나타낸바와 같이, 각 경우에 대하여 주터널에 임계유속을 유지하고 있을 경우와 그렇지 않을 경우로 세분하여 각 경우에 갤러리의 유량을 6단계로 변화시켜 배연효율 및 터널의 연층 단면을 측정하였다.

## 4. 실험결과

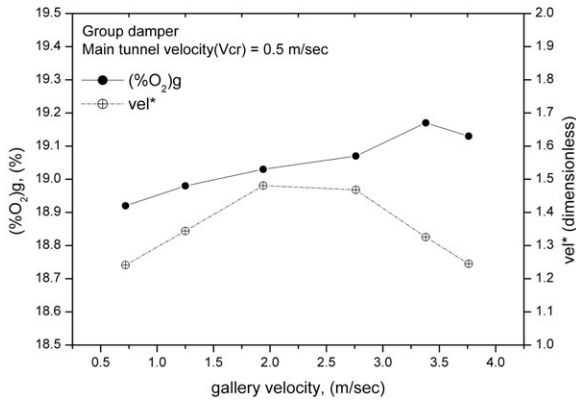
### 4.1. 유량비 및 배연효율

그룹댐퍼가 적용된 경우 주터널의 유속을 0.5 m/sec로 유지할 경우 갤러리의 유량 및 산소분율의 측정 결과

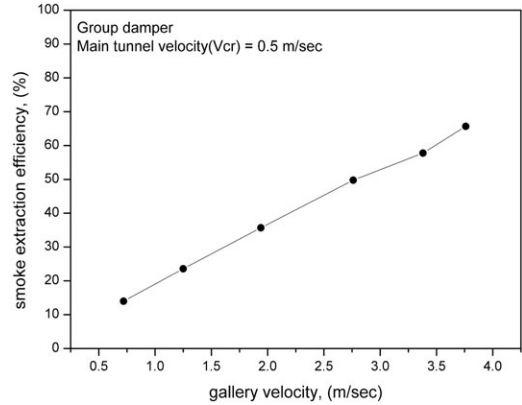
는 그림 5에 도시하였다. 그림에서, vel\*는 화원에서 배출되는 혼합가스에 의한 갤러리의 유량 증가치를 나타내는 것으로, “vel\* > 1”은 화재시 부력으로 인하여 상승한 연기가 갤러리를 통하여 배연되고 있음을 의미한다.

$$vel^* = \frac{\text{측정된 갤러리의 유속, (m/sec)}}{\text{화원에서 혼합가스 배출이 없을 경우 갤러리의 유속, (m/sec)}} \quad (4)$$

갤러리의 팬 인버터를 증가 (1.5~4voltage) 시킴에 따라 갤러리의 유속은 0.72~3.76m/sec로 증가하였으며, 이때의 갤러리에서 측정되는 산소 분율은 18.92~19.17% 범위의 값을 보였다. 비교적 비례적으로 증가하는 갤러리의 유속에 비하여 산소 분율은 거의 일정한 값을 보이고 있는데, 그 이유는 주터널 내부에서 유지되고 있는 임계유속으로 인하여 화원에 배출된 혼합가스가 충분히 혼합되어 배연되기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 갤러리의 유량 증가치 (vel\*)는 1.24~1.48의 값을 보여서 화재로 인하여 가벼워진 연기가 천장부의 갤러리를 통하

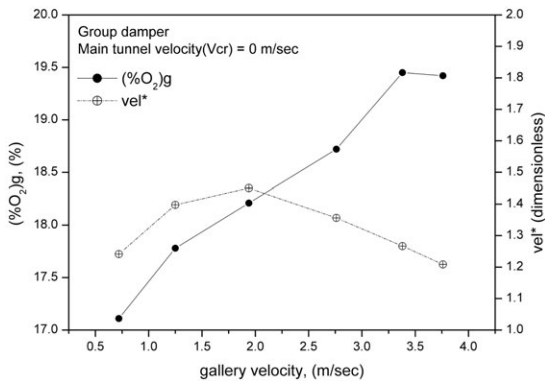


(a) 산소 분율 및 유속비

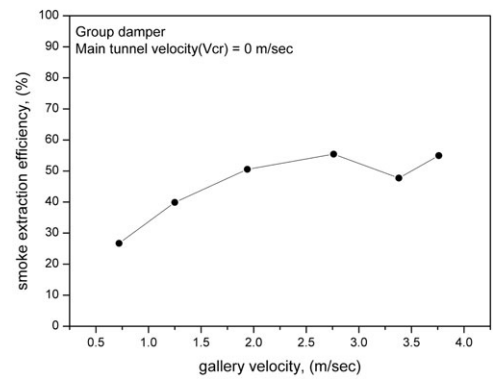


(b) 배연효율

그림 5. 그룹댐퍼 실험 결과 (주터널 유속 = 0.5m/sec)



(a) 산소 분율 및 유속비



(b) 배연효율

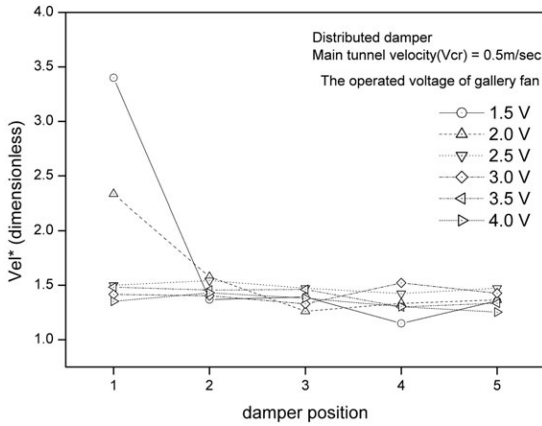
그림 6. 그룹댐퍼 실험 결과 (주터널 유속 = 0m/sec)

여 원활히 배연될 수 있음을 나타내주고 있으며, 배연 효율도 13.98~67.39% 정도를 나타내었다.

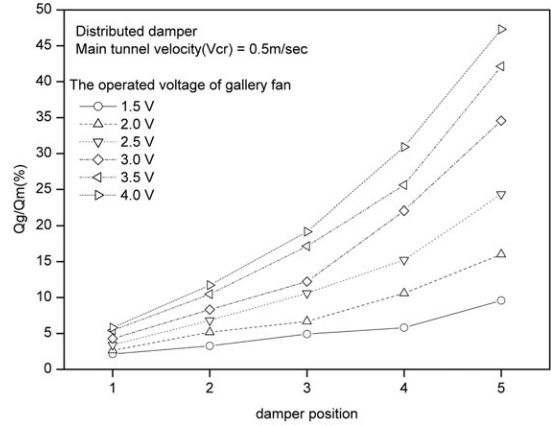
그림 6은 화재시 주터널의 제연설비를 가동하지 않고, 그룹댐퍼를 적용한 갤러리의 배연 설비만을 가동할 경우의 실험 결과를 나타내었다. 갤러리의 유속은 0.72~3.65 m/sec로 전자의 경우와 유사하나, 산소 분율은 17.11~19.42%로 전자와는 차이를 보인다. 또한, 배연효율도 26.7~55.42% 범위로 나타내었으며, 작은 유속 범위에서는 전자 보다 좋은 배연효율을 나타내었다. 이는 갤러리의 팬 가동 조건은 이전의 실험과 동일하였기 때문에 유량은 유사한 결과를 보이나 주터널 팬이 가동되지 않아 화원에서 배출된 혼합가스가 완전히 혼합되지 않고

성층을 이루고 있음을 의미한다.

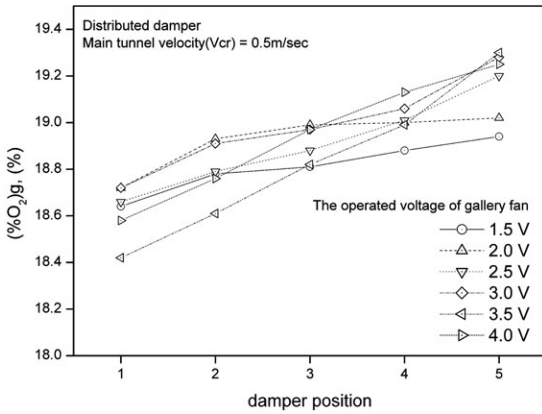
그림 7은 균일댐퍼가 적용된 모델 터널에 주터널 유속을 0.5m/sec로 유지하고, 갤러리 팬의 가동 조건을 변화시키면서 각 댐퍼에서의 유량변화 및 배연 효율을 측정 한 결과이다. 각 댐퍼에서의 유량은 갤러리 팬의 가동 전압에 비례적으로 증가하며, 배연효율도 증가한다. 갤러리의 유량 및 배연 효율은 댐퍼 1~5를 통과하는 하는 동안 지속적인 누적으로 인하여 증가함을 보이나, 최종적으로 댐퍼 5를 지난 지점에서의 측정 결과는 유속 0.76~3.75m/sec, 산소분율 18.94~19.28%, 그리고 배연 효율 14.76~47.3%를 나타내어, 그룹댐퍼가 적용된 경우와 유사함을 보였다. 특히, 화원에 가장 근접하여 위치



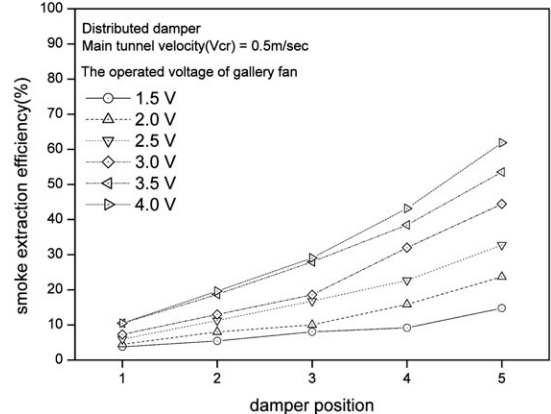
(a) 댐퍼 위치별 유속비



(b) 댐퍼 위치별 갤러리 유량비



(c) 댐퍼 위치별 산소분율



(d) 댐퍼 위치별 배연효율

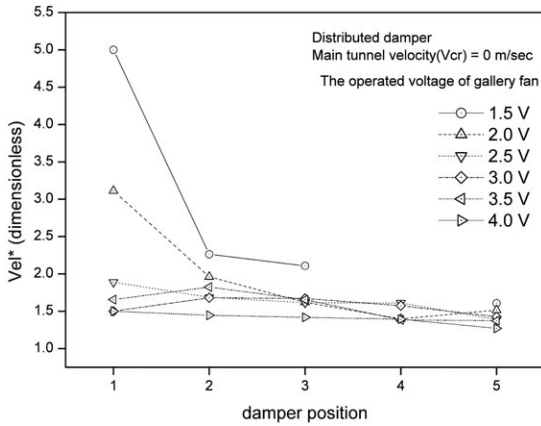
그림 7. 균일댐퍼 실험 결과(주터널 유속=0.5 m/sec)

한 댐퍼 1에서의 유속비 (vel\*)는 갤러리의 팬이 저속으로 운영될 경우 (case 7, 8) 2.3~3.4 범위의 값을 보인다. 이는 화재시 발생된 연기의 댐퍼를 통한 유입에 따른 갤러리의 유량 증가가 매우 많았음을 의미하는 것으로 최종적인 효율은 그룹댐퍼와 유사하나 균일 댐퍼의 경우 화재시 터널 내부의 전체적인 연기 확산을 방지할 수 있음을 보여준다.

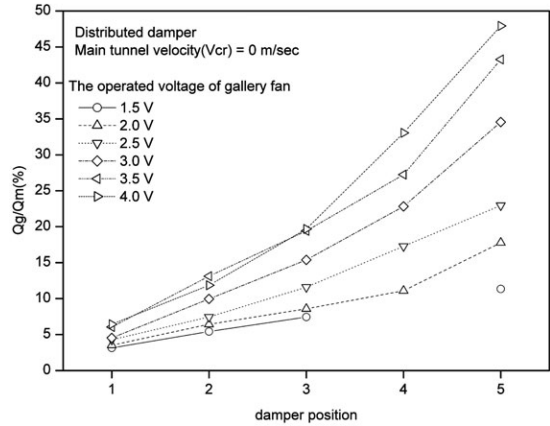
주터널의 제연설비를 가동하지 않고, 균일 댐퍼가 설치된 갤러리의 팬만으로 배연을 시도하는 경우의 실험 결과는 그림 8에 나타내었다. 주터널에 임계유속을 유지할 경우와 유사한 결과로, 각 댐퍼에서의 유량은 갤러리

팬의 가동 전압에 비례적으로 증가하며, 배연효율도 증가한다. 그러나, 댐퍼 5를 지난 지점에서의 측정 결과는 유속 0.9~3.8m/sec, 배연효율 30.43~82.14%를 나타내어, 주터널에 임계유속을 유지할 경우보다 월등히 좋은 결과를 보였다. 지금까지의 전술한 실험결과와 같이 터널의 유속이 없기 때문에 터널내부 연기의 성층이 유지되면서, 화재 부근의 댐퍼로부터 보다 많은 양의 배연이 이루어지고 있음을 의미한다.

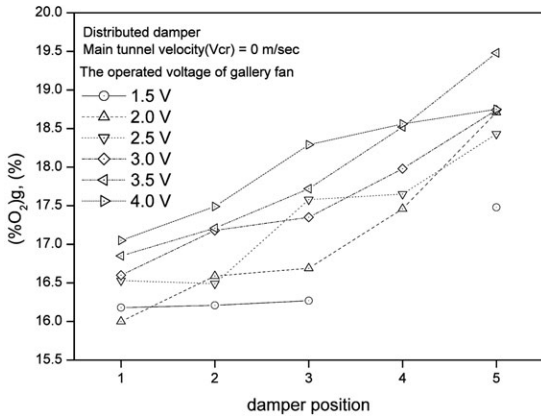
지금까지 각 경우를 살펴본 결과를 종합하여 간략히 정리하면 다음과 같다. 먼저, 갤러리의 배연설비만을 가동할 경우, 터널의 성층화가 유지되어 터널 전체에 연기



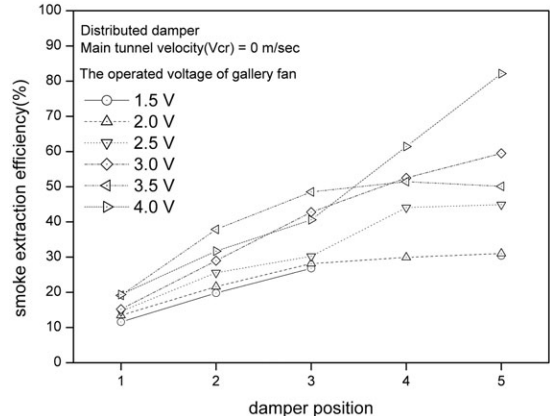
(a) 댐퍼 위치별 유속비



(b) 댐퍼 위치별 갤러리 유량비



(c) 댐퍼 위치별 산소분율



(d) 댐퍼 위치별 배연효율

그림 8. 균일댐퍼 실험 결과 (주터널 유속 = 0m/sec)

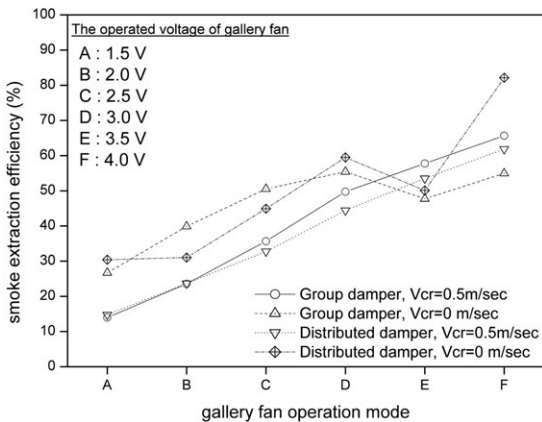


그림 9. 그룹댐퍼와 균일댐퍼의 배연효율 비교

가 혼합되는 것을 막을 수 있으며, 주로 상부에 존재하는 많은 연층의 배연에도 도움이 된다. 이러한 성층화에 의한 배연효과와 증가는 그림 9와 같이 그룹댐퍼인 경우, 갤러리의 유속이 작을 경우에 보다 크게 나타나지만, 갤러리의 유속이 증가하면 배연효율은 거의 변화가 없다. 반면, 균일댐퍼의 경우는 갤러리의 유속 증가와 비례적으로 배연효율도 증가함을 보였다. 그러므로 화재 발생 시 연층을 효과적으로 제어하기 위해서는 터널내부에 적당한 유속을 유지하여 연층의 성층화를 유지하면서, 균일 댐퍼를 통하여 성층화된 연층 상부의 연기를 배연시켜야 한다.



## 4.2 단면분포 및 성층화

터널 단면에서의 연기 분포는 “SDI (Smoke Dilution Index)”를 이용하여 비교하였으며, 식 (5)에 정의하였다. SDI는 0~100 사이의 값을 가지며, “SDI = 0”은 (% O<sub>2</sub>)<sub>measure</sub>와 (% O<sub>2</sub>)<sub>source</sub>가 같은 경우로 화원에서 배출된 연기가 전혀 혼합 혹은 배연되지 않음을 의미하며, “SDI = 100”은 (% O<sub>2</sub>)<sub>measure</sub>와 (% O<sub>2</sub>)<sub>ambient</sub>가 같은 경우로 연기가 완전 배연되었음을 의미한다.

$$SID = \frac{(\% O_2)_{measure} - (\% O_2)_{source}}{(\% O_2)_{ambient} - (\% O_2)_{source}} \times 100 \quad (5)$$

여기서, (% O<sub>2</sub>)<sub>measure</sub> : 측정된 산소분율, (%)  
 (% O<sub>2</sub>)<sub>source</sub> : 화원에서 산소분율, (%)  
 (% O<sub>2</sub>)<sub>ambient</sub> : 대기중의 산소분율, (%)

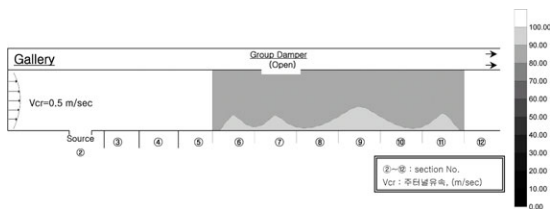
그림 10은 주터널 내부의 SDI 분포를 보여주고 있다. 터널에서 화재가 발생하면 화원에서 발생한 연기는 일차적으로 터널 상층을 따라 전파되다가 터널 천정과의 마찰로 인한 열손실에 따른 밀도의 증가로 점차 하강하여 층을 이루게 된다. (a)와 (c)의 경우 주터널의 임계유속을 유지해 줌으로써 역기류를 억제함으로써 제연의 목적

은 달성할 수 있으나, 연기의 완전 혼합 때문에 연기의 성층화가 유지되기는 어렵다. 반면, (b)와 (d)의 경우처럼 갤러리의 부분제연설비만을 가동할 경우, 주터널 단면의 성층화가 유지됨을 확인할 수 있다. 특히, 균일댐퍼의 경우 화원의 상부는 댐퍼 1 (섹션 ③)의 배연효과에 의하여 100% 배연되었다.

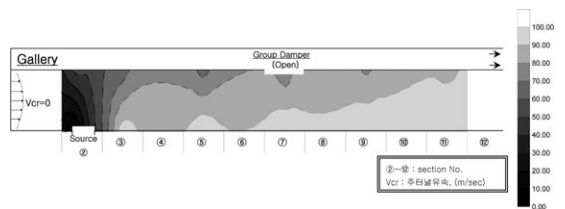
## 5. 결론 및 논의

본 연구에서는 종류식 환기방안과 부분배연설비가 혼합된 터널을 대상으로, 화재시 연기 배출 특성 및 환기 설비의 운영 방안을 고찰하기 위한 축소 모형 실험을 실시하였으며 다음과 같은 결과로 요약할 수 있다.

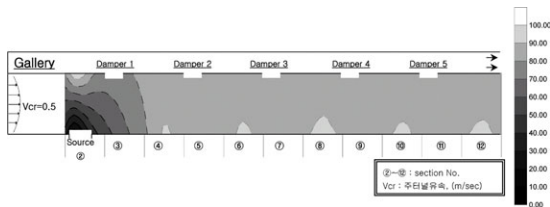
1. 터널 화재시 주터널에 임계유속 이상의 제연 풍량이 유지 될 경우, 부분 배연 갤러리의 배연효율은 그룹댐퍼와 균일댐퍼 두 경우 모두 유사하다. 이는 터널내의 제연 풍량으로 인하여 화원에서 발생한 연기가 부분 배연 댐퍼를 통하여 배연되기 전에 이미 완전 혼합되었기 때문으로 판단된다.
2. 부분 배연 갤러리의 배연설비만을 가동할 경우, 연기



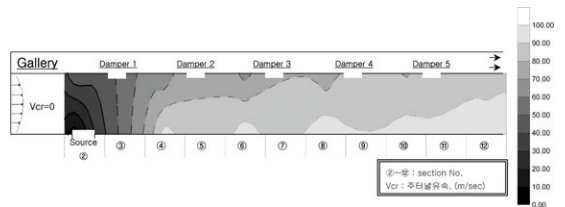
(a) 터널의 단면 분포 (그룹댐퍼, Vcr = 0.5m/sec, Vg = 1.25m/sec)



(b) 터널의 단면 분포 (그룹댐퍼, Vcr = 0m/sec, Vg = 1.25 m/sec)



(c) 터널의 단면 분포 (균일댐퍼, Vcr = 0.5m/sec, Vg = 1.4m/sec)



(d) 터널의 단면 분포 (균일댐퍼, Vcr = 0m/sec, Vg = 1.4 m/sec)

그림 10. 터널의 단면 분포

가 터널내 공기와 완전 혼합되기 이전에 댐퍼를 통하여 배연되기 때문에 연기의 성층화가 유지되어 터널 전체에 연기가 혼합되는 것을 막을 수 있으며 상부에 존재하는 많은 연층의 배연에도 도움이 된다.

3. 화재시 부분 배연 설비에 의한 성층화 유지는 연층의 하강을 억제하여 승객들의 피난에 큰 도움을 줄 수 있기 때문에 균일 댐퍼를 이용한 운영방안을 제안 할 수 있다.
4. 터널 화재시 임계속도에 의한 제연방식은 발생지점 이후 (출구방향)의 차량과 인명 모두가 심각 위험에 노출되는 문제점을 가지게 된다. 따라서 이 경우 화재초기에 제트팬의 가동을 중지하고 화원 앞·뒤에 위치해있는 부분 배연 댐퍼만을 개방하여 연기의 성층화를 유지하면서 연층을 배연시키고 이후, 인명 대피가 종료되고 난 후 제트팬을 가동하여 터널 내의 연기를 배출하도록 한다. 반면, 교통 소통이 원활한 경우에는 기존의 운영과 동일하게 터널의 제연설비를 가동하여 연기의 후방전파를 차단하고 동시에 부분배연 설비를 가동하여 배연 효과를 극대화한다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)대우건설 “부산-거제 침매터널 환기 및 방재시스템 최적화 연구”용역의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부 (2004), “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업 1차년도 최종보고서”.
2. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식 (2004), “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구”, 터널기술, 제6권 2호, pp. 129-139.
3. 김정엽, 신현준, 강세구, 안경철, 김택곤 (2004), “도로 터널 제연설비 축소모형실험에 관한 연구”, 한국터널공학회 2003 정기학술발표회 논문집, pp. 12-22.
4. 유용호, 윤찬훈, 윤성욱, 김진(A) (2005), “장대 교통터널의 피난연락경 설치 간격에 관한 실험적 연구”, 터널과 지하공간, 15권1호, pp. 61-70.
5. 유용호, 윤찬훈, 윤성욱, 김진(B) (2005), “장대 교통터널 화재시 수직갱의 배연효과에 관한 실험적 연구”, 터널기술, 7권1호, pp. 27-36.
6. GK해상도로주식회사 (2004), “침매터널 환기 및 제연 방식 검토 (안)”.
7. 최준석 외 (2002), “터널내 자동차화재와 풀화재 비교 분석”, 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회, pp. 5-36.
8. 한국건설기술연구원 (2004), “부산-거제 침매터널 환기 및 방재시스템 최적화 연구:1단계”
9. D. Lacroix (1998), “The New PIARC report on fire and smoke control in road tunnels”, Third International conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France, pp 185-197.
10. D. Tetzner, R. Pollak and M. sippel (1999), “Critical Velocity – Comparative assesment of test results and CFD simulation”, International Conference on tunnel fire and Escape from Tunnels, pp. 181-190, Lyon, France.
11. N. H. Danziger and W. D. Kennedy (1982), “Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels.”, 4th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 169-181, BHRGroup 2000 Vehicle tunnel.
12. Oka Y. and Atkinson G. T. (1995), “Control of smoke flow in tunnel fires”, Fire Safety Journal, 25, pp. 305-322.
13. O. Megret and O. Vauquelin (2000), “A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics”, Fire safety Journal, Vol. 34, pp. 393-401.
14. O. Vauquelin and O. Megret (2002), “Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel”, Fire safety Journal, Vol. 37, pp. 525-533.
15. Y. Wu and M. Z. A. Baker (2000), “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation System – A Study of the Critical Velocity”, Fire safety Journal, Vol. 35, pp.3 63-390.



**유용호**

한국건설기술연구원 화재 및 설비연  
구부 선임연구원  
ventil@kict.re.kr



**이의주**

부경대학교 안전공학부, 조교수  
ejlee@pknu.ac.kr



**신현준**

한국건설기술연구원 화재 및 설비연  
구부 부장  
hjshin@kict.re.kr



**신한철**

한미파슨스(주) GK설계팀 이사  
hcshin@naver.com



**윤영훈**

대우건설 GK설계팀 부장  
yoon21c@dwconst.co.kr