

## 터널화재시 부분배연설비에 의한 연기 배출 특성에 관한 실험적 연구

유용호, 이의주, 신현준, 신한철\*, 윤영훈\*\*, 김창환\*\*  
한국건설기술연구원, 한미파슨스(주)\*, 대우건설 GK 시공사업단\*\*

### Performance of the partial smoke extraction system in tunnel fire

Yongho Yoo, Euiju Lee, Hyunjun Shin, Hanchol Shin\*,  
Yunghoon Yoon\*\*, Changwhan Kim\*\*  
Korea institute of construction technology, HanmiParsons Inc\*,  
Busan-Geoje Fixed link project construction consortium\*\*

#### 1. 서 론

지금까지 터널 화재에 관한 연구는 임계속도를 결정하는 것에 관심이 집중되어 왔으며 [1][2][3], 국내 고속도로터널의 환기방식 역시 경제적인 이점을 가지는 종류식이 선호되어 왔으므로, 종류식과 관련된 연구가 주를 이루어 왔다. 일반적으로 횡류환기방식의 경우, 배연은 용이하나 연기흐름을 제어하는 제연능력이 떨어지며, 종류환기방식은 제연능력은 우수하나 배연능력이 부족하기 때문에, 적절한 환기방식별 화재 발생시나리오에 따른 최적의 배연 또는 제연설계기술의 개발은 터널 화재 안전을 위하여 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 이러한 두 환기 방식이 가지는 문제점을 보완하기 위하여, 종류식 환기방안과 부분배연설비가 혼합된 부산-거제간 침매터널을 대상으로 화재시 연기 배출 특성을 알아보고 그 결과를 토대로 설비의 운영 방안을 고찰하여 보았다.

#### 2. 이론적 배경

##### 2-1. 등온기체모델

본 연구에서 이용한 등온기체 모델이란 화원을 공기보다 가벼운 기체(일반적으로 헬륨)를 이용하여 화재시 발생하는 연층을 모사하여 연기의 거동을 파악하는 방법이다. 최근의 Megret and Vauquelin의 연구[4]에서는, 실험 결과를 바탕으로 이론적 관계식을 전개하여 화재에서 생성되는 연기의 유량과 온도를 전체발열량에 대해 얻었다. 또한, 예측된 연기 유량을 PIARC[5]에서 권고된 값과 비교하여 타당성을 입증하여, 향후 터널화재실험에 있어서 실제화원을 모사할 수 있는 연기 발생량을 결정하였다. 연료가 헵탄(Heptane)인 풀화

재의 경우 직경이 Dm라고 가정하면, 표 1과 같이 화염과 발생하는 연기를 특성화 할 수 있으며, 본 연구에서는 실험 여건을 고려하여 5MW를 1/20으로 축소하여 실험을 수행하였다.

표 1. 화재 규모별 등온기체 모델 변수(천장높이=7m, 1/20 축소모형)

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

또한, 측정된 갤러리의 유량과 산소분율을 이용한 배연효율( $\epsilon$ )의 계산식은 (식 1)로 표현된다[6].

$$\epsilon = \left( \frac{21 - (\%O_2)_g}{21 - (\%O_2)_s} \right) \times \frac{Q_g}{Q_s} \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $(\%O_2)_g$  : 갤러리의 산소분율, (%)

$(\%O_2)_s$  : 화원에서 배출되는 혼합가스의 산소분율, (%)

$Q_g$  : 갤러리 유량, ( $m^3/sec$ )

$Q_s$  : 화원에서 배출되는 혼합가스의 유량, ( $m^3/sec$ )

## 2-2. 상사이론

기본적인 상사이론은 Froude 상사를 적용하였다. Froude 모델링은 주위와 같은 상태에서 실험을 행할 수 있으며, 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 2와 같이 스케일링된다[7].

$$\left( \frac{Q_m}{Q_r} \right) = \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^{5/2}, \quad \left( \frac{V_m}{V_r} \right) = \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^{1/2} \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $Q$  : 열방출율, (kW)

$L$  : 터널길이, (m)

$V$  : 환기속도, (m/sec)

하첨자 'm' : 축소모형에서 스케일된 값  
 하첨자 'r' : 실제 터널에서의 값

### 3. 축소모형실험

터널모형은 1:20의 길이비로 축소(0.5m(W)×0.35m(H)×12m(L))하여 제작되었으며, 가스 농도 및 유속의 측정은 터널의 길이방향으로 1m 간격에 위치한 8개의 샘플링홀과 배연 갤러리 중앙에서 측정하였다.

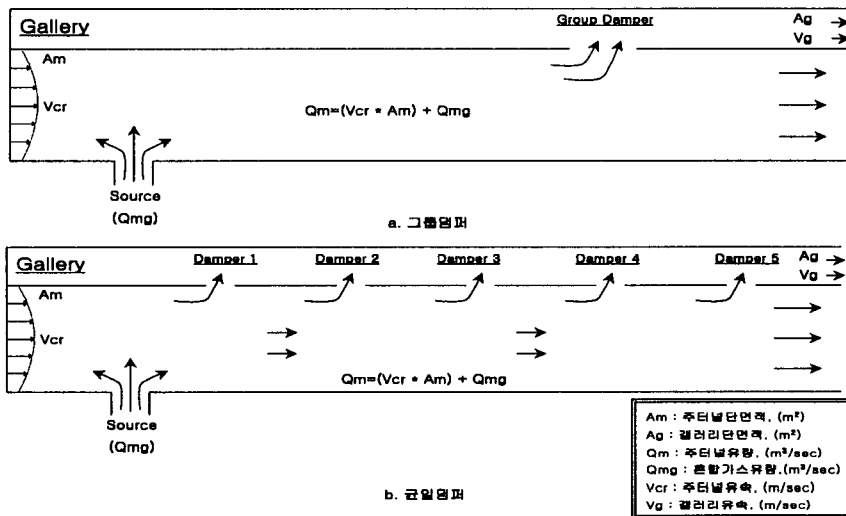


Fig. 1. 그룹댐퍼와 균일댐퍼.

실험방법은 그림 1에서 보는 바와 같이 크게 그룹댐퍼와 균일댐퍼일 경우로 구분된다. 그룹댐퍼는 화재위치로부터 약 4.5m 지점에 단면적 200 cm<sup>2</sup>의 댐퍼가 위치하며, 균일댐퍼의 경우 단면적 40 cm<sup>2</sup>를 가지는 댐퍼가 2m 간격으로 총 5곳에 위치하여 전체적인 댐퍼의 단면적은 그룹 댐퍼의 단면적과 동일하다. 또한, 각 경우에 대하여 주터널에 입계유속을 유지하고 있을 경우와 그렇지 않을 경우로 세분하여 각 경우에 갤러리의 유량을 6단계로 변화시켜 총 24번에 걸쳐 배연효율 및 터널의 연층 단면을 측정하였다.

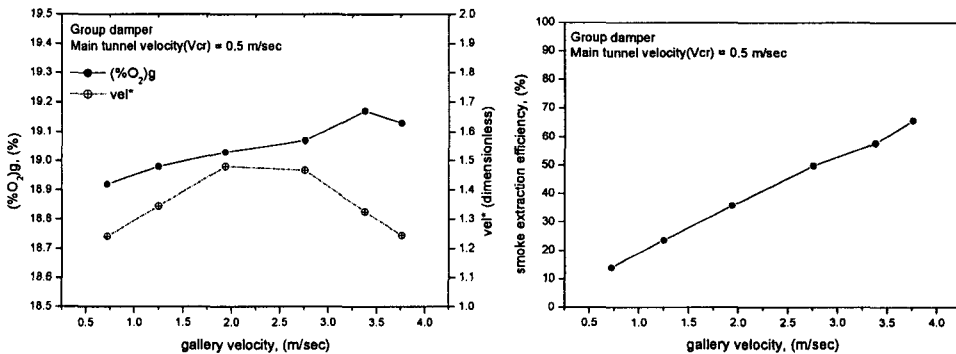
### 4. 실험결과

그룹댐퍼가 적용된 경우 주터널의 유속을 0.5 m/sec로 유지하고 갤러리의 유량 및 산소분율의 측정 결과는 그림 2에 도시하였다. 그림에서 vel<sup>\*</sup>는 화원에서 배출되는 혼합가스에 의한 갤러리의 유량 증가치를 나타내는 것으로 “vel<sup>\*</sup> >1”은 화재시 부력으로 인하여 상승한 연기가 갤러리를 통하여 배연되고 있음을 의미한다.

$$vel^* = \frac{\text{측정된 갤러리의 유속, (m/sec)}}{\text{화원에서 혼합가스 배출이 없을 경우 갤러리의 유속, (m/sec)}} \quad (\text{식 3})$$

갤러리의 팬 인버터를 증가(1.5~4 volt)시킴에 따라 갤러리의 유속은 0.72~3.76 m/sec로 증가 하였으며, 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 통하여 원활히 배연될 수 있음을 나타내주고 있으며, 배연 효율은 13.98 ~ 67.39% 정도이다.

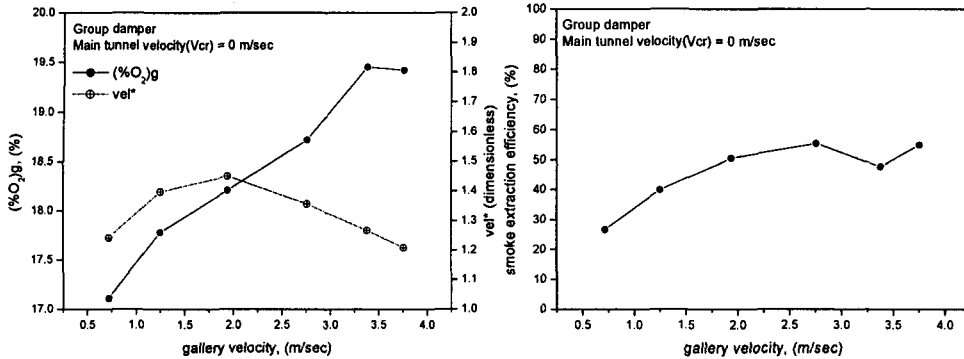
그림 3은 화재시 주터널의 제연설비를 가동하지 않고, 그룹댐퍼를 적용한 갤러리의 배연 설비만을 가동할 경우의 실험 결과를 나타내었다. 갤러리의 유속은 0.72~3.65 m/sec로 전자의 경우와 유사하나, 산소 분율은 17.11~19.42 %로 전자와는 차이를 보인다. 또한, 배연효율도 26.7~55.42% 범위로 나타내었으며, 작은 유속 범위에서는 전자 보다 좋은 배연효율을 나타내었다. 이는 갤러리의 팬 가동 조건은 이전의 실험과 동일하였기 때문에 유량은 유사한 결과를 보이나 주터널 팬이 가동되지 않아 화원에서 배출된 혼합가스가 완전히 혼합되지 않고 성층을 이루고 있음을 의미한다.



a. 산소 분율 및 유속비

b. 배연효율

Fig. 2. 그룹댐퍼 실험 결과(주터널 유속=0.5 m/sec).

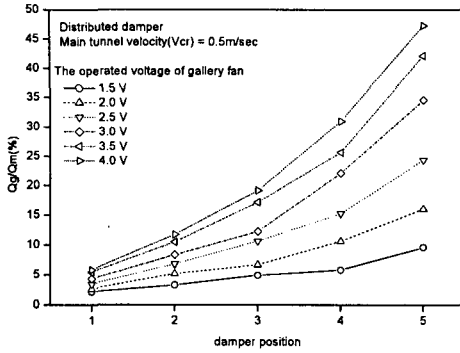


a. 산소 분율 및 유속비 b. 배연효율

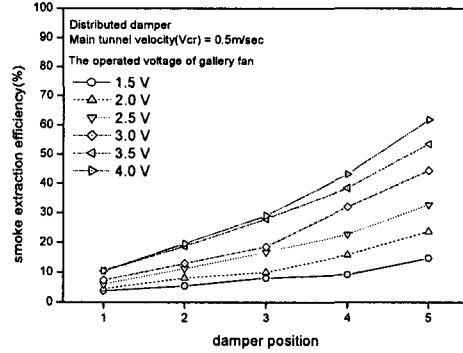
Fig. 3. 그룹댐퍼 실험 결과(주터널 유속=0 m/sec).

그림 4는 균일댐퍼가 적용된 모델 터널에 주터널 유속을 0.5m/sec로 유지하고, 갤러리 팬의 가동 조건을 변화시키면서 각 댐퍼에서의 유량변화 및 배연 효율을 측정된 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 0.76~3.75 m/sec, 배연효율 14.76~47.3%를 나타내어, 그룹댐퍼가 적용된 경우와 유사함을 보였다. 특히, 화원에 가장 근접하여 위치한 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 5에 나타내었다. 주터널에 임계유속을 유지할 경우와 유사한 결과로, 각 댐퍼에서의 유량은 갤러리 팬의 가동 전압에 비례적으로 증가하며, 배연 효율도 증가한다. 그러나, 댐퍼 5를 지난 지점에서의 측정 결과는 유속 0.9~3.8 m/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.

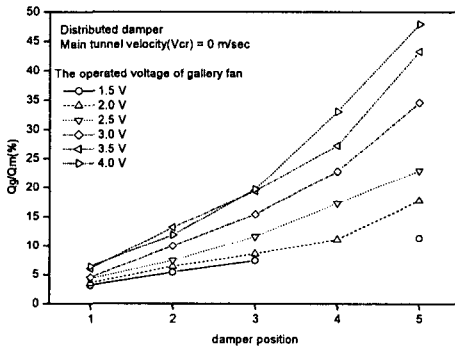


a. 댐퍼 위치별 갤러리 유량비

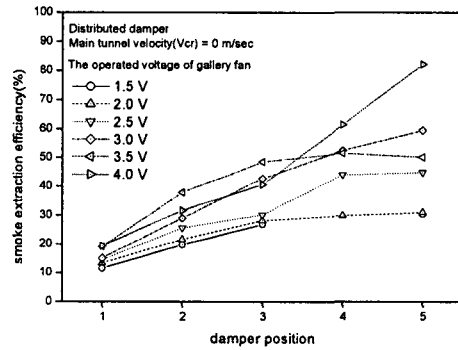


b. 댐퍼 위치별 배연효율

Fig. 4. 균일댐퍼 실험 결과(주터널 유속=0.5 m/sec).



a. 댐퍼 위치별 갤러리 유량비



b. 댐퍼 위치별 배연효율

Fig. 5. 균일댐퍼 실험 결과(주터널 유속=0 m/sec).

## 5. 결론 및 논의

본 연구에서는 부분배연설비의 화재시 연기배출특성 및 운영방안을 고찰하였으며, 다음과 같은 결론으로 요약할 수 있다.

- ① 터널 화재시 임계유속 이상의 제연 풍량이 유지 될 경우, 부분 배연 갤러리의 배연 효율은 그룹댐퍼와 균일댐퍼 모두 유사하다. 이는 충분한 제연풍량에 의한 연기의 완전혼합에 따른 것이다.
- ② 부분 배연 갤러리의 배연설비만을 가동할 경우, 터널의 성층화가 유지되어 터널 전체에 연기가 혼합되는 것을 막을 수 있으며 상부에 존재하는 많은 연층의 배연에도 도움이 된다.
- ③ 차량의 정체시 화재가 발생하면, 화원으로부터 상류와 하류 방향의 운전자 모두가 심각한 위협에 노출되므로, 화재초기에는 화원 앞·뒤에 위치해있는 부분 배연 갤러리만을 열어 연기의 성층화를 유지하면서 연층을 배연시키고 제트팬은 가동시키

지 않는다. 이후, 사람이 모두 대피할 수 있는 충분한 시간이 지난 후 제트팬을 함께 가동시켜 터널 내의 연기를 배출하도록 한다. 그러나, 교통의 소통이 원활한 경우에는 터널의 제연설비를 가동하여 연기의 후방전파를 차단하고 동시에 부분배연 설비를 가동하여 배연 시킨다.

## 감사의글

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

## 참고문헌

1. N.H. Danziger and W.D. Kennedy, "Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels.", 4th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.169-pp.181, BHRGroup 2000 Vehicle tunnel.(1982)
2. D. Tetzner, R. Pollak and M. sippel, "Critical Velocity - Comparative assesment of test results and CFD simulation", International Conference on tunnel fire and Escape from Tunnels, pp.181-190, Lyon, France(1999)
3. Y. Wu and M.Z.A. Baker, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation System - A Study of the Critical Velocity," Fire safety Journal, Vol. 35, pp.363-390.(2000)
4. O. Megret and O. Vauquelin, "A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics", Fire safety Journal, Vol. 34, pp.393-401.(2000)
5. D. Lacroix, "The New PIARC report on fire and smoke control in road tunnels." 3rd International conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France, pp 185-197.(1988)
6. O. Vauquelin and O. Megret, "Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel", Fire safety Journal, Vol. 37, pp.525-533.(2002)
7. Oka Y. and Atkinson G.T., "Control of smoke flow in tunnel fires", Fire Safety Journal, 25, pp.305-322.(1995)