

# 저심도 도로터널에서 터널과 수직환기구의 단면적 비와 열방출률이 Plug-holing 현상에 미치는 영향에 관한 실험연구

홍기배<sup>1</sup>, 나준영<sup>2</sup>, 유홍선<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국교통대학교 기계자동차항공공학부 자동차공학전공, <sup>2</sup>중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과

## Experimental Study on the Effect of the Area Ratio between Shaft and Tunnel and Heat Release Rate on the Plug-holing Phenomena in Shallow Underground Tunnels

Kibea Hong<sup>1</sup>, Junyoung Na<sup>2</sup>, Hong Sun Ryou<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Engineering, Korea National University of Transportation

<sup>2</sup>Department of Mechanical System Engineering, Chung-Ang University

**요약** 저심도 터널에서는 온도차에 의한 부력을 이용한 자연배기시스템이 많이 사용되고 있지만 이는 연기배출을 인위적으로 조절할 수 없다. 그러므로 자연배기시스템에서는 수직환기구에서 연기 배출량이 설계된 연기 배출량보다 적어지는 Plug-holing 현상을 고려한 설계가 필수적이다. Plug-holing 현상은 터널과 수직환기구의 형상 위치, 화원의 위치와 발열량 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 터널과 자연 환기구의 단면적 비와 화원의 열방출률이 자연배기시스템에서 발생하는 Plug-holing 현상에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 분석하였다. 1/20 크기로 축소시킨 실험모델에서 터널과 수직환기구의 종횡비는 고정시키고 터널과 수직환기구의 단면적 비를 달리하여 Plug-holing 현상에 미치는 영향을 확인하였다. 화원의 열방출율은 0.55 kW, 0.98 kW, 1.67 kW로 고정시켰다. 실험결과, 연기 경계층온도와 수직환기구 내의 온도와의 비교를 통한 Plug-holing 발생을 판단하였고, 터널과 수직환기구의 단면적 비가 증가함에 따라서 수직환기구 하부의 유동과 온도분포 특성이 변함을 확인하였다. 터널 화재 시 Plug-holing 현상은 터널과 수직환기구의 단면적 비에 영향을 받으며 단면적 비가 클수록 Plug-holing 발생 가능성이 증가하였다.

**Abstract** It is difficult to design because of the plug-holing phenomenon in which the amount of smoke discharged from the vertical vent is smaller than the designed amount of smoke. In this study, the effect of cross-sectional area ratio of tunnel and natural ventilation and heat release rate of fire source on plug-holing phenomenon occurring in natural ventilation system was experimentally analyzed. In the experiment model reduced to 1/20 size, the aspect ratio of the tunnel and the vertical vent was fixed, and the influence on the plug-holing phenomenon was confirmed by varying the sectional area ratio of the tunnel and the vertical vent. Experimental results show that the plug-holing phenomenon is caused by the comparison of the smoke boundary layer temperature with the temperature in the vertical vents, and the flow and temperature distribution characteristics under the vertical vents are changed as the cross-sectional area ratio of the tunnel and vertical vents increases. The plug-holing phenomenon is affected by the cross-sectional area ratio between the tunnel and the vertical ventilation. The greater the cross-sectional area ratio, the greater the probability of plug-holing.

**Keywords** : Area Ratio, Ceiling Jet Flow, Natural Ventilation System, Shallow Underground Tunnel, Plug-Holing Phenomena

본 연구는 2018년 한국교통대학교의 지원 및 소방청 소방대응력 향상을 위한 연구개발사업("2018-NFA002-007-01010002-2018")의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Hong Sun Ryou(Chung-Ang Univ.)

Tel: +82-2-820-5280 email: cfdmec@cau.ac.kr

Received February 14, 2019

Revised April 4, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

## 1. 서론

도시 밀집화와 국토 이용 효율성 제고를 위하여 저심도터널의 건축이 증가되고 있으며 자연배기 시스템이 많이 사용되고 있다. Plug-holing 현상은 터널에서 자연 배기구로 연기가 배출될 때, 연기층 하단의 신선한 공기가 부력 등에 의해 연기와 함께 배출되어 연기의 배출 유량이 설계 유량보다 감소하게 되는 현상으로써 터널 설계 시에 이를 필수적으로 고려하여야 한다. 이 현상을 억제하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. Hinkley는 터널 내 자연 환기 시스템에서의 Plug-holing 현상을 처음으로 정의하고 판단의 기준으로 Modified Froude number를 제시하였다. 하지만 연돌효과를 일으키는 굴뚝 없이 환기구(Vent)만 있으며, 터널의 형상에 대한 영향력을 고려하지 않은 한계가 있었다[1]. 이후 Spratt은 실험을 통하여 수직환기구의 크기, 모양, 위치가 Plug-holing현상에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구하였지만 Spratt의 실험의 경우 축류 팬을 사용하여 자연환기 시스템에 적용하기에는 맞지 않다[2]. 이후 Ji등은 실제 축소 모형을 통하여 화원의 열방출률, 자연 배기구의 높이와 Plug-holing 간의 관계를 연구하고 새로운 기준으로 Modified Richardson number를 제시하였다[3]. 터널과 수직환기구의 형상적 특성은 터널 내 제연 시스템에 있어 중요한 요인이며 선행 연구를 통해 확인할 수 있듯이 자연 환기 시스템의 Plug-holing 현상은 열방출률의 크기와 터널과 수직환기구의 형상적 특성에 영향을 받는다. 이에 Plug-holing현상의 발생을 억제하기 위하여 터널과 자연 환기구의 형상적 특성이 함께 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 터널과 수직환기구의 단면적 비와 열방출률이 Plug-holing 현상에 미치는 영향의 분석을 목적으로 한다.

## 2. Plug-holing 현상

### 2.1 Plug-holing 현상의 정의

저심도 터널에서 화재가 발생하면 화원에서 연기와 열기류가 발생하여 상승한 후, 천장에 이르면 더 이상 상승할 수 없어 천장을 따라 퍼져나가는데, 이 현상을 천장 제트 유동(Ceiling jet flow)이라한다[4-5]. 천장을 따라 움직이는 연기는 수직환기구를 만나고, 굴뚝효과에 의해

서 연기가 수직환기구를 통해 배출된다. 천장 제트 유동의 유동 방향이 수평 방향에서 수직 방향으로 바뀌기 때문에, 수직환기구 아래에서 운동량 변화가 발생한다. 운동량 변화로 인하여 수직환기구 아래에서는 신선한 공기가 연기층 영역을 침투하고 뒤섞이는데, 이를 "Sunken Area"이라고 한다[6-7]. 이 Sunken Area가 수직환기구 내부까지 상승하면, 수직환기구에서 신선한 공기가 배출되며 이 신선한 공기 때문에 연기의 배출량은 감소한다. 이러한 Plug-holing 현상으로 연기 배출량은 설계된 연기 배출량을 만족시키지 못한다. 실제 터널에서 수직환기구 아래의 연기 움직임은 관찰 및 측정하기 어려워 Plug-holing 현상의 기준과 발생판별이 명확하지 않다.

### 2.2 Plug-holing 판별

본 연구에서 Plug-holing은 신선한공기와 연기가 뒤섞인 Sunken Area가 수직환기구 안으로 들어감을 의미한다. 하지만 이 Sunken Area는 신선한공기와 연기가 뒤섞여있어 특정한 높이를 정의하기 어렵다[6-7]. 이러한 경우에 연기 경계층 온도를 사용하여 결정할 수 있다. Plug-holing 연구 초기에 사용된 Cooper의 N-percentage rule은 선택한 임의의 값 N에 의하여 바뀌기 때문에 연기 경계층 온도의 신뢰성은 낮다[8]. 신뢰성을 향상시키기 위해서는 정확한 정의가 필요한데, Jannsens이 터널 내 수직 온도분포를 이용하여 경계층의 높이를 계산하는 방법을 제안하였고 본 연구에서는 연기 경계층 온도를 계산하는데 Jannsens의 연기 경계층 계산식을 사용하였다. 계산된 연기 경계층 높이는 다시 계산에 사용했던 터널 내 수직 온도분포에 대입하여 연기 경계층 온도를 계산한다[9].

## 3. 실험 방법

### 3.1 실험 모델

실제 터널화재를 이용하여 실험을 수행하기에는 많은 제약이 있으므로 대부분의 연구에서 수치해석이나 축소 모델을 이용한 실험을 수행한다. 터널 화재 현상 연구의 효과와 유효성이 확인된 Froude 상사법칙 Eq. (1)을 적용하여 축소 모델을 구축하였다[10-14].

$$Q_M = Q_F \left( \frac{l_M}{l_F} \right)^{5/2} \quad (1)$$

실험에 사용된 터널은 실제 터널(길이 140 m, 높이 6 m, 폭 8.4 m)을 1:20의 비율로 축소 제작한 것이다. 축소 모델 터널의 개략도는 Fig. 1에 나와 있다. 축소 모델 터널은 길이가 7 m이고 높이가 0.3 m, 폭이 0.42 m이다. 터널과 수직환기구의 면적비(Area ratio, AR)를 변경하기 위해 터널의 형상은 고정하고 수직환기구의 단면적을 변경했다. 터널과 수직환기구의 단면적 비는 0.054, 0.071, 0.09, 0.11이며 Fig. 2에 나타내었다. 수직환기구는 화재 발생원으로부터 2.3 m 떨어진 곳에 설치하였고, 수직환기구의 높이 또한 연기유동과 Plug-holing 현상에 영향을 주는 요소이므로 이를 고정할 필요가 있다. 이전 연구에서 연구된 임계 수직환기구 높이와 저심도 터널의 깊이 기준인 10m이내를 적용하여 축소모델에서의 수직환기구의 높이를 0.15m로 고정하였다[10]. 터널과 수직환기구의 외벽은 0.08 m 두께의 아크릴로 제작하였으며, 풀(Pool)과 가까운 공간은 열로 인한 변형을 막기 위해 철판과 내화보드로 구성된다. 터널에서 차량 한 대가 연소하는 화재를 모사하기 위해 한 번의 길이가 0.025, 0.035, 0.045 m의 정사각형 풀을 사용하였다[14]. 화재의 연료는 N-Heptane(순도: 99 %)을 사용하였다. 풀 화재의 준정상상태 구간의 평균값을 실험의 대표 값으로 사용하였다. 또한 준 정상상태 영역이 풀 화재의 크기보다 상이하므로 각각의 화원에 따라 다른 준정상상태 영역을 선택하여 온도를 평균하였다. Table 1.에 준정상상태 선택시간과 풀 면적에 따른 연소율, 열방출률, Eq. (1)을 적용하여 실제 화재를 계산한 열방출률을 나타내었다. 본 실험에서 가장 큰 풀 면적 20.25 cm<sup>2</sup>의 실제화재시의 열 방출률 2.99 MW는 연료가 없는 2000 cc 승용차가 연소될 때의 최대 열방출률 3MW과 거의 유사하다. 이보다 작은 풀 면적은 승용차 화재 성장기를 모사한 것이다.

### 3.2 실험 장치 구성

연기경계층 온도의 계산과 수직 환기구에서의 Plug-holing 발생 여부를 판단하기 위해서 2개의 열전대 트리로부터 온도 분포를 측정하였다. 터널 횡방향 열전대 트리는 수직환기구 아래에서 발생하는 Plug-holing의 영향이 미치지 않으면서 화원에서 가깝지 않은 곳에서 설치해야 하므로, 화원으로부터 2 m 떨어진 지점에 설치하였다. 이 열전대 트리는 연기 경계층의 온도를 측정하는 데 사용한다. 횡방향 열전대 트리는 수직 온도 분포

측정을 위해 15개의 열전대를 0.02 m간격으로 구성된다. 또한 수직 환기구로 신선한 공기의 유입 유무를 판단하기 위하여 수직환기구의 입구에 터널 길이방향으로 열전대 트리를 단면적 비에 따라 0.01 m 간격으로 설치하였다. 실험에 사용된 열전대는 K-type(Chromel-alumel, 온도 범위: -200 ~ 1250 °C, 오차율: 1.1 °C or 0.4 %)이다. 또한 연기의 유동을 가시화하기 위하여 레이저 시트 생성기(LW-9117)를 터널 외부에서 수직환기구 방향으로 설치했다.

Table 1. Calculated heat release rate(HRR).

Pool area [cm <sup>2</sup> ]	Quasi steady state time [sec]	Mass burning rate [g/s]	Calculated HRR [kW]	Real scale HRR [MW]
6.25	300 to 400	0.0124	0.55	0.98
12.25	450 to 550	0.0220	0.98	1.75
20.25	650 to 750	0.0375	1.67	2.99

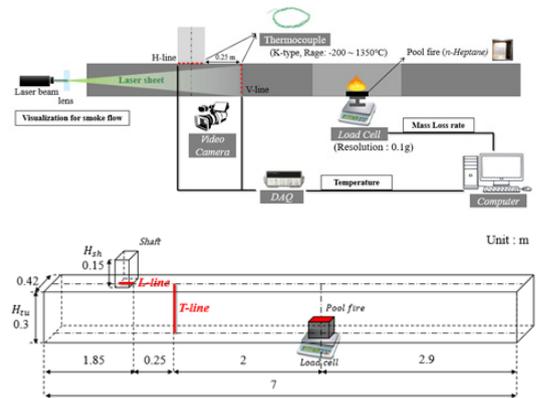


Fig. 1. The schematic of the reduced tunnel.

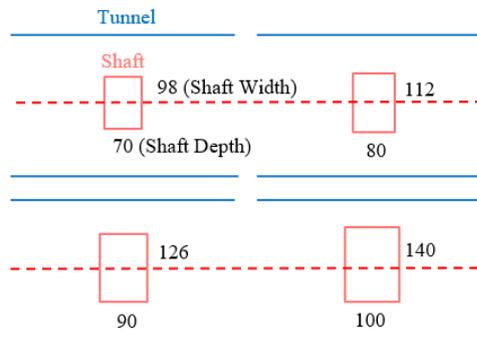


Fig. 2. Top view of tunnel and shafts in all cases [Unit : mm].

## 4. 결과 및 토의

터널과 샤프트의 단면적 비와 열방출률이 Plug-holing 현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 본 실험을 진행하였다. Plug-holing 현상을 분석하기 위하여, 연기 경계층 온도를 계산하기 위한 터널 내부의 횡방향 열전대 트리와 수직환기구 내부에 터널길이 방향 열전대 트리를 설치하였고 이로부터 온도분포를 얻었다. 수직환기구 단면적의 변화는 수직환기구 아래 연기의 부력 및 관성력의 변화를 초래하고, 이는 Plug-holing 현상 발생에 영향을 미친다. 수직환기구에 설치된 열전대 트리에서 얻은 온도를 이용하여 Plug-holing 현상 발생여부를 확인했다.

### 4.1 터널 내 횡방향 온도분포

터널 안 수직환기구로부터 0.25 m 떨어진 곳에 설치된 횡방향 열전대 트리로부터 얻은 온도 분포 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 단면적 비에 따른 횡방향 온도분포 그래프로 0.2 m 부근에서 가파른 온도상승을 보이며 0.28 m에서 가장 높은 연기온도가 측정되었다. 이는 폴 면적 6.25, 12.25, 20.25 cm<sup>2</sup> 화원 모두에서 동일하게 나타났다. 또한 폴 면적 20.25 cm<sup>2</sup> 화원에서 횡방향 온도의 평균 보면 AR 0.054는 34.78 °C, AR 0.071은 33.45 °C, AR 0.09는 32.89 °C, AR 0.11은 32.15 °C로 단면적 비가 감소할수록 전체적으로 온도가 상승함을 보인다. 이는 모든 화원에서 동일한 경향을 나타냈다. 이는 수직환기구의 단면적이 작아지면서 수직환기구로부터 토출되는 공기가 상대적으로 적어지기 때문이다.

### 4.2 수직환기구 내 터널길이 방향 온도분포

터널과 수직환기구가 바로 맞닿는 곳에 0.01 m 간격으로 설치한 열전대로부터 얻은 터널 길이방향 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 폴 면적 20.25 cm<sup>2</sup> 화원에서 수직환기구 내의 온도평균을 보면 AR 0.054는 41.43 °C, AR 0.071은 38.33 °C, AR 0.09는 35.91 °C, AR 0.11은 34.20 °C로 단면적 비가 감소함에 따라 온도가 상승함을 보인다. 이는 4.1의 터널 내 횡방향 온도분포 분석과 마찬가지로 수직환기구의 단면적이 작아지면서 수직환기구로부터 토출되는 공기가 상대적으로 적어지기 때문이다. 수직환기구에서 터널의 길이방향 온도분포는 단면적 비마다 그 수직환기구의 깊이가 다르기 때문에 정규화하여 나타내었다. 정규화된 수직환기구 깊이를 기준으

로 0.25 부근에서 가장 높은 온도가 측정되었다. 이는 수직환기구 입구로부터 0.02 m 떨어진 곳으로 천장제트유동의 연기가 바로 수직환기구로 부터 밖으로 토출되는 부분이다. 각각의 폴 화재에서 같은 경향을 보인다. 또한 터널과 수직환기구의 단면적 비가 증가할수록 수직환기구 내 최고온도와 최저온도의 차이 또한 증가하는데, 이는 단면적 비가 커질수록 수직환기구에 공기의 유입이 증가하여 수직환기구 내의 온도를 감소시키는 것으로 판단된다.

### 4.3 Plug-holing의 발생 여부 판단

연기 경계층 온도와 수직환기구 내부 터널길이 방향 열전대 트리에서 얻은 최소온도와의 비교를 통하여 연기 경계층 온도보다 수직환기구 내부 온도가 낮게 나오면 수직환기구 하부 신선한 공기층이 수직환기구로 연기와 함께 토출되는 Plug-holing이 발생했다고 판단한다. 연기 경계층 온도는 Janssens의 연기 경계층 높이 식을 사용하여, 터널 내 횡방향 온도분포로부터 구한다[9]. Fig. 5은 폴 면적 20.25 cm<sup>2</sup> 화원에서 레이저 시트를 이용하여 유동가시화를 통해 터널과 수직환기구의 단면적 비에 따른 Plug-holing 발생여부를 판단하는 사진으로 준정상상태 시간대에서 선택하였다. 분석결과 단면적 비 0.054, 0.071에서는 Plug-holing이 발생하지 않았고, 0.09, 0.11에서 Plug-holing이 발생하였다. 모든 단면적 비에서 연기와 공기가 섞인 Sunken area가 수직환기구의 후류 쪽에 위치함을 보인다. 이는 수직환기구 내의 온도분포에서도 후류 쪽에 온도가 낮아지는 것로부터 동일한 현상을 나타냄을 알 수 있다. Plug-holing 판단결과 유동가시화를 통한 Plug-holing 현상은 단면적 비 0.054, 0.071에서는 발생하지 않았고, 단면적 비 0.09, 0.11에서 발생하였다. Table 2에 열방출률, 단면적 비 별 Plug-holing 발생 여부와 연기 경계층 온도, 수직환기구 내 최소온도를 정리하여 나타내었다. 연기 경계층 온도와 수직환기구 내 최소온도와의 차를 ΔT라 하면 이 ΔT가 음의 값이면 수직환기구 내의 신선한 공기유입이 없다고 할 수 있고 이는 Plug-holing이 발생하지 않았다고 판단할 수 있다. 반대로 양의 값이면 수직환기구에서 연기 경계층 온도보다 낮은 온도의 신선한 공기유입이 이루어 졌다고 볼 수 있고, 이 경우 Plug-holing이 발생했다고 판단한다. 고정된 열방출률에서 터널과 수직환기구의 단면적 비가 커질수록 값이 커지며 이는 연기경계층 온도보다

수직환기구 내의 최소온도가 더 낮아짐을 의미하고 Plug-holing 발생 가능성이 더 증가한다는 것으로 판단 된다.

Table 2. The judgment of plug-holing in all case.

HRR [kW]	Area ratio [-]	Occur-re nce of Plug-holing	Temperature of smoke layer interface, $T_{Int}$ [°C]	Minimum temperature in shaft, $T_{Shaft}$ [°C]	$\Delta T = T_{Int} - T_{Shaft}$ , [°C]
0.55	0.056	X	27.06	29.60	-2.54
	0.071	X	26.80	27.68	-0.88
	0.090	O	26.76	26.53	0.23
	0.110	O	26.71	26.15	0.56
0.98	0.056	X	29.05	30.10	-1.05
	0.071	X	28.67	28.82	-0.15
	0.090	O	28.63	27.58	0.67
1.67	0.110	O	28.27	27.30	0.96
	0.056	X	31.70	33.08	-1.38
	0.071	X	30.50	30.92	-0.42
	0.090	O	30.49	28.65	1.84
0.110	O	29.45	26.22	3.23	

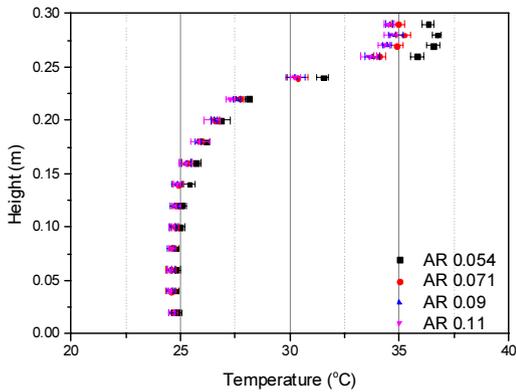


Fig. 3. Transverse temperature distribution in tunnel. (Pool area 20.25 cm<sup>2</sup>)

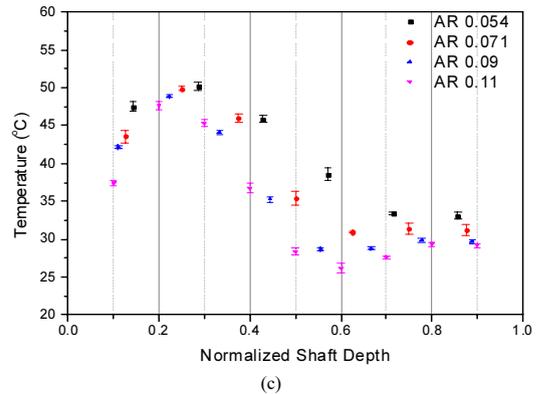
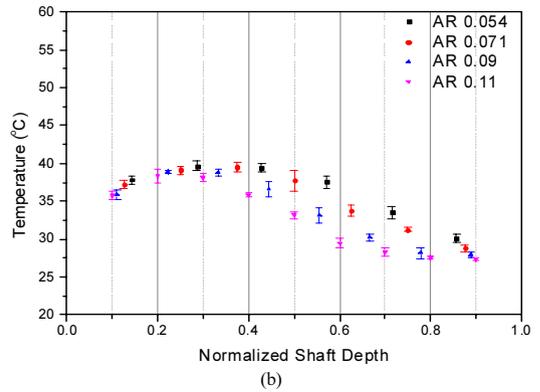
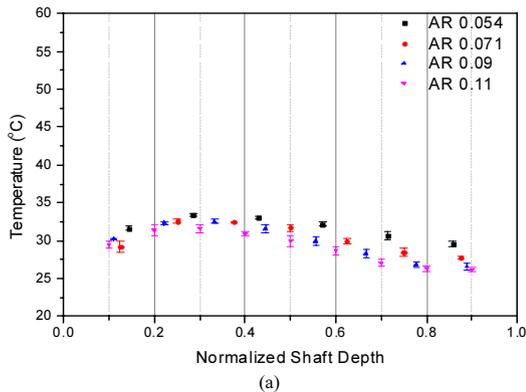
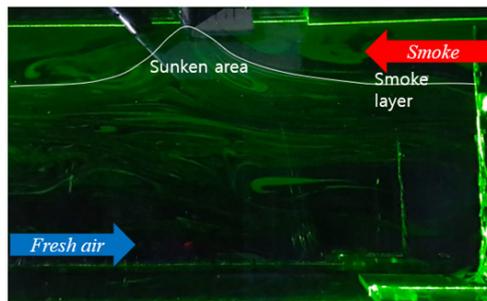
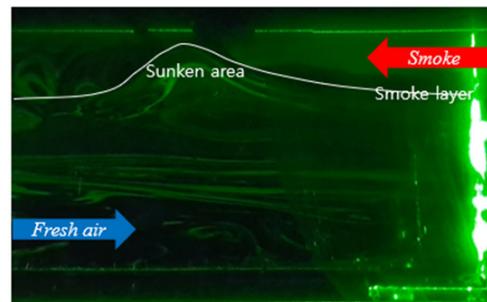


Fig. 4. Longitudinal temperature distribution in shaft (a) Pool area 6.25 cm<sup>2</sup> (b) Pool area 12.25 cm<sup>2</sup> (c) Pool area 20.25 cm<sup>2</sup>



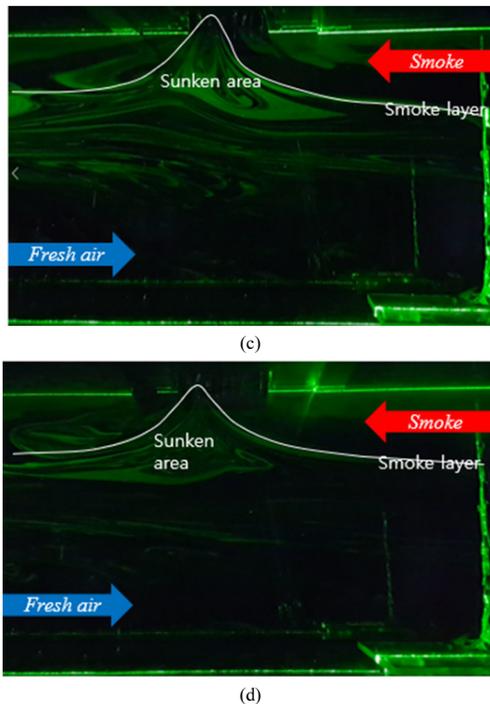


Fig. 5. The visualization under the shaft in small scale tunnel fire in Pool area : 20.25 cm<sup>2</sup>  
 (a) Area ratio 0.054, (b) Area ratio 0.054  
 (c) Area ratio 0.090, (d) Area ratio 0.110

### 5. 결론

본 연구에서는 터널화재에서 터널과 수직환기구의 단면적 비와 열방출률이 Plug-holing 현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 연기의 유동 및 Plug-holing 현상 발생 유무는 온도 분포를 기반으로 차량 한 대가 연소되는 3MW이하에 해당하는 열방출률과 터널과 수직환기구의 중횡비는 고정시키고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널과 수직환기구의 단면적 비가 증가함에 따라 수직환기구 하부의 유동과 온도분포 특성이 변함을 확인하였고, Plug-holing은 터널과 수직환기구의 단면적 비에 영향을 받으며 단면적 비가 클수록 Plug-holing 발생 가능성이 증가한다.
2. 열방출률의 변화는 연기 경계층온도와 수직환기구 내의 온도분포와 연기유동에 영향을 주지만 Plug-holing 발생 여부에 까지 영향을 주지는 않는다.

3. 터널과 수직환기구의 단면적 비는 Plug-holing 현상 발생여부에 직접적인 영향을 미치지 때문에 터널 설계 시 단면적 비를 고려하는 것은 중요한 요소이다.

### References

- [1] P. L. Hinkley, "The flow of hot gases along an enclosed shopping mall a tentative theory", Fire Safety Science 807, FIRE research station, UK, pp.5-15.
- [2] D. Spratt, A. Heselden, "Efficient extraction of smoke from a thin layer under a ceiling", Fire Safety Science 1001, Fire Safety Science, FIRE research station, UK, pp.5-11.
- [3] J. Ji, Z.H. Gao, C.G. Fan, W. Zhong, J.H. Sun, "A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road Tunnel fires" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 21-22, pp.6032 - 6041, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.014>
- [4] Morgan J. Hurlley, SFPE handbook of fire protection engineering, 3493, Springer, pp429-454, 2015.
- [5] Quintiere, J.G., Principles of Fire Behavior, 437, Delmar, 437, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315369655>
- [6] J. Ji, Z.H. Gao, J.H. Sun, "Large Eddy Simulation of stack effect on natural smoke exhausting effect in urban road Tunnel fires", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, pp531-542, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.057>
- [7] National Fire Protection Association, "NFPA 92: standard for smoke control systems", USA, 2011.
- [8] Cooper, L.Y., Harkleroad, M., Quintiere, J., Rinkinen, W. "An Experimental Study of Upper Hot layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios", *J. Heat Transfer*, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3245194>
- [9] Janssens, M., Tran, H.C., "Data Reduction of Room Tests for Zone Model Validation", *J. Fire Sci.*, 10, 528 - 555, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490419201000604>
- [10] S. Zhang, K. He, Y. Yao, M. Peng, H. Yang, J. Wang, X. Cheng, "Investigation on the critical shaft height of plug-holing in the natural ventilated tunnel fire", *International Journal of Thermal Sciences*, 132, pp517-533, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.018>
- [11] J.G. Quintiere, "Scaling applications in fire research." *Fire Safety Journal*, 15.1, pp3-29, 1989 DOI: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(89\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0379-7112(89)90045-3)
- [12] F. Mei, F. Tang, X. Ling, J. Yu, "Evolution characteristics of fire smoke layer thickness in a mechanical ventilation tunnel with multiple point extraction" *Applied Thermal Engineering*, 111, pp248-256, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.064>

- [13] C. G. Fan, J. Ji, Z. H. Gao, J. Y. Han, J. H. Sun, "Experimental study of air entrainment mode with natural ventilation using shafts in road tunnel fires", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56.1-2, pp750-757, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.019>
- [14] A. Hamins, T. Kashiwagi, R.R. Buch, "Characteristics of Pool Fire Burning" Fire Resistance of Industrial Fluids, American Resistance of Industrial Fluids, IN, pp.19-24.  
DOI: <https://doi.org/10.1520/STP16278S>

유 흥 선(Hong Sun Ryou)

[정회원]



- 1977년 3월 ~ 1979년 2월 : 서울대학교 (기계항공공학부 석사)
- 1983년 10월 ~ 1988년 7월 : 임페리얼 컬리지 (기계항공공학과 박사)
- 1993년 9월 ~ 1994년 8월: 스탠포드 대학교 방문교수
- 1996년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학부 교수

홍 기 배(Kibea Hong)

[정회원]



- 1984년 2월 : 홍익대학교 대학원 기계공학과 (기계공학 석사)
- 1997년 8월 : 아주대학교 대학원 기계공학과 (기계공학 박사)
- 2008년 3월 ~ 2019년 2월 : 충주 파스너RIS사업단 단장
- 1984년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계자동차항공공학부 (자동차공학 전공) 교수

<관심분야>

열, 유체, 화재, 에너지

<관심분야>

열, 유체, 에너지, 화재, CFD

나 준 영(Junyoung Na)

[준회원]



- 2017년 2월 : 공주대학교 (기계시스템공학과 학사)
- 2019년 2월 : 중앙대학교 (기계시스템엔지니어링 학과 석사)

<관심분야>

CFD, 화재, 유체, 열전달