

# 지하철 화재발생시 역사내 화재연기 거동 가시화 연구

최창진\* · 정해권\* · 김상문\* · 김경천†

## Visualization of Smoke Flow in the Subway Fire

Kyung Chun Kim, Sang Moon Kim, Chang Jin Choi and Hae Gon Jung

### Abstract

In this study, the smoke flows of the inner subway station were visualized through a numerical analysis and visualization experiment in the subway fire. A transparent acrylic model was designed and installed as 1:25th scale-down as the actual subway station by using geometrical similarity. The properties of subway fire were reconstructed according to Densimetric Froude Similarity. The 47 to 53 ratio of the mixed air and Helium was inputted in the inner acrylic model to describe 1MW fire intensity with reference to the experiment paper. For the same time, the fire smoke from a smoke generator was inputted in the inner acrylic model with the mixture. At this time, the buoyancy effect of Helium gas went up the smoke to the acrylic model. When the sheet beam of Ar-Ion laser was given out to the top and stair of subway model, the digital camcorder took the images of the scattered cluster of smoke particles when applying the smoke management system and PSD.

**Key Words :** Buoyancy Effect(부력효과), Densimetric Froude Similarity(프라우드 상사)  
PSD(Platform Screen Door, 승강장 스크린 도어)

### 1. 서론

지하철은 반 밀폐적 터널공간과 차량의 운행 등의 의한 열차 풍과 분진, 고온의 기류 등으로 이용환경의 악화가 초래되고, 2003년 있었던 대구 지하철 참사에서 보듯 지하철 화재 발생에 의한 인명과 재산 피해를 경험한 바 있다. 그리고 지하철 내 빈번하게 일어나는 자살 및 안전사고 등에 대한 우려가 아직도 산재해 있다. 선진국의 경우 현재 온열 환경 개선과 열차 화재 시 승객의 안전을 확보하기 위해 능동적인 개념의 환기·방재설비로 PSD(Platform Screen Door) 시스템을 설치, 운영 중에 있으며 이의 효과적인 도입을 위하여 방안을 도출하고 있다. 그래서 본 실험은 지하철 화재 시 상황을 시뮬레이션하기 위해 실제 역사를 1/25 Scale로 축소된 모델을 설치하여 지하철 본선 및 승강장에서의 화재 발생시 연기거동을 확인하고, PSD(Platform Screen Door)와 제연송풍이 연기 거동

에 어떠한 영향이 있는지를 확인하고자 한다.

### 2.2 실험에 적용된 이론적 방법

본 가시화 실험을 위해 실제 역사에서 실험하기에는 공간, 시간, 자원, 인명 위험성을 가지고 있기 때문에 결과가 원형에서 대조되기 위해서 원형에서 실험모형을 서로 기하학적인 상사로 제작하였다.

$$\frac{L_M}{L_p} = \frac{W_M}{W_p} = \frac{H_M}{H_p} = \frac{1}{25} = \text{CONST} \quad \text{---(1)}$$

기학적 상사에 의해 제작된 실험 모델에 화재강도의 결정은 실험논문을 참조하였고, 이에 따른 연기 재현을 위한 물성치는 Densimetric Froude 상사로 결정하였다.

$$\text{Fr} = \left( \frac{V^2}{g \cdot D} \right) \quad \text{---(2)}$$

† 부산대학교 기계공학부  
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 기계공학과

$$\frac{V_M}{V_P} = \left(\frac{L_M}{L_P}\right)^2 \quad \frac{t_M}{t_P} = \left(\frac{L_M}{L_P}\right)^1 \quad \text{---(3)}$$

지하철 화재에서 본선 내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 프라우드 상사가 중요한 상사 관계식이 된다. 이에 따라 본 축소실험에서는 더불어서 기하학적인 상사를 이용하여 실제와 모형의 길이 비에서 속도와 시간이 결정되었다. 실제 총 제연운전 시나리오가 10 분을 기준으로 한다면 기하학적 상사에서 실험과 모형의 길이비가 1/25 scale 이므로 모형실험에서 실제의 1/5 인 2 분을 기준으로 했으며 실제 제연운전 시스템에서 화재 발생후 1 분뒤 시스템이 작동하므로 모형실험에서는 약 10 초후 제연운전이 시작되게 했다. 이와같은 시간에 대한 제연운전 시나리오와 더불어 실제 동역학적인 이론을 바탕으로 화재에 대한 운동학적인 제연 운전 시나리오는 2002 년도에 프랑스 Valenciennes 대학의 O. Vauquelin 의 실험 논문을 참조하였다. 아래의 Table I, II는 실험 논문에 발췌한 것으로 본 축소모형 실험에 적당한 화재강도인 1MW 를 채택하였다. 1MW 이상의 화재강도를 채택하였을 경우 실험에서 물성치값을 맞추기가 어려움이 있으므로 본 실험에서의 적용이 가능한 화재강도인 1MW 를 선택했다. 화재강도 1MW 에 해당하는 연기 유량과 원형관 직경에서 실제 모델에서 화재연기의 상승속도가 4.38 m/s 가 나오고, 프라우드 스케일에 의해 축소모형의 연기의 상승속도가 0.875 m/s 가 된다. 이에 따른 모형에서 실제 화재의 강도를 맞추기 위해서는 267℃의 온도에서 공기와 헬륨과 혼합유량인 116 lpm 이 나와야 한다. 이 혼합유량은 공기와 헬륨 47:53 의 밀도비율로 각각의 연결 튜브에 유량계를 사용하여 정량화하여 모형 혼합실(Mixing Chamber)내로 투입하였다. 그래서 스모크 발생기(Smoke Generator)에서 연기입자가 함께 투입하여 실질적으로 강도 1MW 에 해당하는 화재연기가 연출되게 했다.

Table I. 실제 화재강도에 따른 화재물성치

Full Scale Values			
HRR (MW)	Diameter (m)	Smoke Flow rate(m <sup>3</sup> /s)	Temp of Smoke(℃)
1	0.98	5.8	267
4	1.65	19.4	369
10	2.46	45.4	446
20	3.33	84.3	515

Table II. 축소모형에 따른 화재물성치

Reduced Scale Values				Mixture Ratio	
HRR (MW)	Diameter (cm)	Smoke Flow rate(m <sup>3</sup> /s)	Temp of Smoke(℃)	Air	He
1	4	116	267	47	53
4	6.6	372.48	369	40	63
10	9.84	871.68	446	31	68
20	13.32	1618.56	515	26	73

### 3. 실험 방법 및 장치

제연운전 시나리오의 시뮬레이션을 위해 가변 유량형 팬을 축소모형에 설치하여 실제 제연 운전속도를 상사하여 모델에 작동시키고, 본선 및 승강장, 대피 계단등을 PSD(Platform Screen Door) 유무에 따라서 측정하고자 하는 지점에 아르곤 이온 레이저를 투과시킨다. 이 때 실제 화재를 시뮬레이션하기 위한 유동가시화에 사용되는 연기는 Smoke Generator 를 사용하여 생성된 후, 가열과정을 거쳐서 축소모델로 공급된다. 투과된 면에서 레이저시트빔이 스모크 발생기(Smoke Generator)에서 투입된 연기입자에 의해 산란되며 그 면을 Digital Camcorder 를 이용하여 연기유동을 촬영한다. 아래의 지하철 실험 FIG.1 개략도에서 아르곤-이온 레이저에서 나오는 광선으로는 넓은 면을 가시화할 수 없으므로 특수 원통렌즈(Cylindrical lens)를 투과 시킨 면폭이 넓어지므로 촬영하고자 하는 지점을 넓게 볼 수 있게 된다. 화재연기는 지하철 모델의 하부에서 투입되어 헬륨의 부력효과에 의해 실제 지하철 화재가 발생했을 때 1MW 같은 연기량을 분출하게 되고, 이 지점으로 투사된 레이저 빔이 연기 입자에 산란되어 연기의 거동을 가시화 할 수 있게 된다. 그래서 이면을 캠코더를 이용하여 동영상 데이터를 얻게 된다. 화재 발생위치는 열차가 역에 정차시 3번 열차위치를 기준으로 했으며, 열차가 없을 때 선로에서 1MW 화재가 발생시 제연 송풍이 있다고 가정하고, PSD 유무에 따라 이미지를 획득했다.

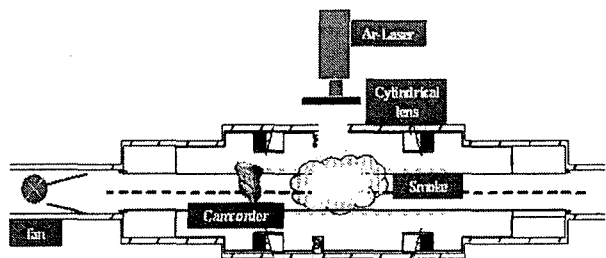


FIG. 1 Experimental Set-Up

## 4. 수치해석과 실험결과

### 4.1 예비실험

본 실험에 들어가기 앞서 제연송풍을 묘사하기 위해 팬에서 불어오는 바람의 속도가 실제 제연운전 속도 2.5 m/s를 상사한 0.5 m/s로 풍동장치와 아크릴 모델 입구에서 전 수직단면에서 공기가 일정한 유동속도로 제연되는지 입자 영상 유속계(PIV : Particle Image Velocimetry)를 통한 실험으로 확인했다. 유속 측정에 앞서서 팬을 가동시켜 입구에서 마이크로 마노미터(Micro Manometer)를 통해 0.5 m/s의 공기 유속을 맞추었다. 그 다음 Nd-Yag Laser 측정부위에 레이저를 투과시키고, 동시에 팬 장치 입구측에 스모크 발생기(Smoke Generator)로 연기를 흘려 보냈다. 이때 레이저 시트빔이 입자에 의해 산란되는 영상을 하이 스피드 카메라를 통해 유속 일정한 간격을 두고 자동적으로 받는다. 이 유속 측정은 영상과 다음 영상의 초단위의 시간간격을 두고 입자가 움직인 변위를 측정하여 입자의 속도를 측정할 수 있다. 이 측정 나온 유속과 처음 마이크로 마노미터에서 의도한 속도가 일치해야 지하철 화재발생시 연기거동에 대한 가시화 결과를 보증할 수 있다.

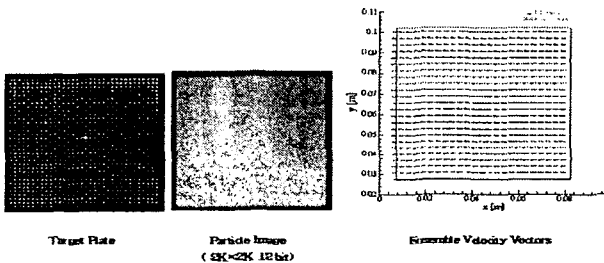


FIG.2 모델입구 팬 입구 유속벡터

FIG.2 유속 측정결과에서 보듯이 마노미터에서 측정된 속도와 풍동 입구 단면부에서 일정하게 균일유동(Uniform Flow)이 형성되고 있음을 확인할 수 있었다.

### 4.2 실험결과

FIG.7 을 통해 1MW 의 화재가 PSD 가 없고 제연 운전이 있는 경우 지하철에서 발생되었을 때의 초기 화재발생시 상황과 제연 송풍이 시작되는 10 초경 부터 급격히 연기가 확산되어 승강장은 물론 계단을 통해 1 층 매표소도 완전히 연기 매워진 것을 확인할 수 있다. 화재가 발생되자마자 30 초 정도면 승강장 쪽으로 많은 연기가 확산이 된 것을 볼 수 있는데 연기가 선로와 승강장쪽으로 퍼져나간 후, 10 초에 제연운전이 진행되면서

선로쪽의 연기가 급격히 제연운전 방향으로 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 하지만 승강장쪽은 선로의 제연에 거의 영향을 받지 않고 오히려 선로 쪽에서의 제연은 승강장쪽으로의 연기 확산을 더 가중 시키는 결과를 낳게 된다. 승강장 쪽의 연기는 1 층, 2 층 모든 장소로 퍼져 나가서 정체되어있다 그리고 화재가 발생한 선로에서도 제연 효과를 거의 볼 수 없는 것을 확인할 수 있다. FIG.8 은 PSD 가 설치되었고 완전 닫힌 상태에서 화재 발생후 제연이 있는 경우로써 화염의 수평면을 찍은 동영상이다. 화재가 발생되자마자 연기가 옆 선로에 급격히 확산 되지만 PSD 가 닫힌 상태이기 때문에 양 승강장 쪽으로 연기의 확산이 전혀 없음을 볼 수 있다. 더욱이 10 초후 제연운전이 시작되면서 연기는 제연운전 방향으로 급속히 빠져나가며, PSD 의 영향이 더욱 뚜렷해짐을 볼 수 있다 사진에서 화염의 중앙부가 하얗게 보이는 것은 이 부위가 화염원이며, 레이저 시트빔에 의해 연기 산란 되면서 이 부위에서 연기의 농도가 가장 높다는 것을 알 수 있다. 사진에서의 상황에서 승객들의 대피는 승강장에서는 4 군데 계단으로 나누어 신속히 빠져나가면 되지만 열차내 갇힌 승객들의 대피문제가 대두된다. 그러므로 승강장 반대쪽 열차 문이 열리면서 열차내 갇힌 승객들이 제연 송풍 방향으로 재 빨리 대피토록 해야겠다. 결과적으로 FIG. 7/8 에서 PSD 의 설치 유무에 따라 연기 확산에서 승강장에서 연기 확산 정도를 가시화 할 수 있었다. 여기서 PSD 가 화재 발생시 인명 피해를 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) t = 0s (a) t = 30s

FIG. 7 PSD 가 설치되어 않는 경우



(a) t = 0s (a) t = 30s

FIG. 8 PSD 가 설치되어 있는 경우

FIG.9 열차에서 화재 발생시 제연운전이 없고, PSD 가 설치되어 있으나 열린 상태를 유지하는 경우이다. 처음 4 초가 지난 후 부터 적은 양이지만 조금씩 확산이 조금씩 일어나고 시간이 지난

후 부터는 지하 1 층(매표소)으로의 확산되어지는 연기의 양이 많아 지면서 계단뿐만 아니라 매표소까지 전 범위에 연기가 짙게 차는 것을 볼 수 있다. 연기의 온도에 의한 성층화는 거의 볼 수 없고, 아주 불규칙적으로 2 층으로 확산이 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 시간이 지날수록 농도도 계속 짙어지는 것을 볼 수 있다. 위의 그림과 제연운전이 있는 경우와 비교했을 때 제연이 없으면 연기의 지하 1 층으로의 진행속도가 느리지만 연기의 거동은 거의 비슷하며 실제 이런 상황에서의 화재 발생시 지하 1 층으로의 연기진행을 막을 수 있어야만 인명피해를 줄일 수 있을 것이다. 제연 운전이 있는 경우에도 비슷한 이미지를 얻었지만, 유량이 제연 운전이 없는 경우와 비교했을 때 많은 연기가 계단을 타고 1 층 매표소로 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있었다. 계단이 일종의 화재 시 굴뚝 역할을 하므로 연기확산의 통로 역할을 하게 된다.



(a) t = 0s (a) t = 30s  
**FIG. 9 제연 운전이 없을 때 계단수직**

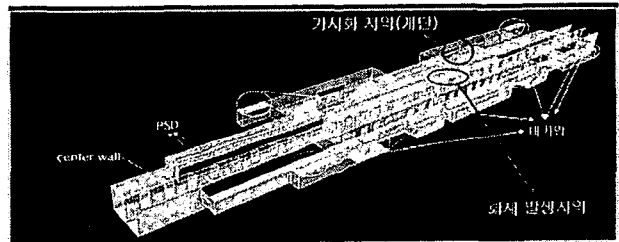


(a) t = 0s (a) t = 30s  
**FIG. 10 제연 운전이 있을 때 계단수직**

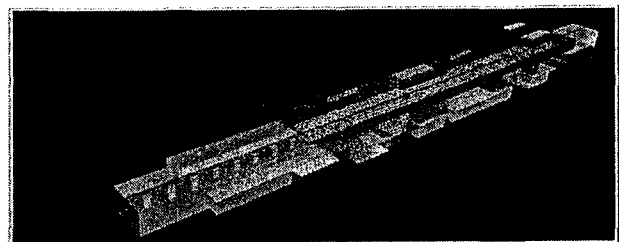
### 4.3 전산해석결과

수치 시뮬레이션에서는 헬륨:공기 비를 실험조건으로 설정하게 된 원리를 이용하여 문헌을 조사한 결과, 헬륨의 부력을 맞추기 위하여 화재가 난 열차에서 헬륨이 아닌 공기가 나온다고 가정하고, 공기의 온도를 540K(약 267°C = 1MW의 화재)로 설정한 후 시뮬레이션을 실시하였다. 화재가 발생한 후 기류의 변화가 어느정도 정상상태에 도달했을 시 Path Line을 계산하여, 열차로부터 발생하는 연기의 유동을 가시화하는데 그 목적을 두었다. 화재가 발생한 후 기류의 변화가 어느 정도 정상상태에 도달했을 시 Path Line을 계산하여, 열차로부터 발생하는 연기의 유동을 가시화하는데 그 목적을 두었다. 실험에서 가시화 지역으로 설정된

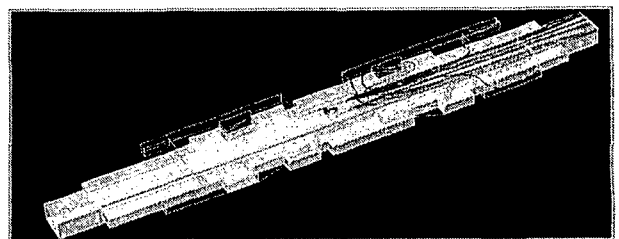
2 층 대합실로 이르는 계단을 통해 열차에서 발생된 연기의 궤적이 실험과 같은 경향을 띠는 것을 확인할 수 있었다. FIG.3은 수치 시뮬레이션에 사용된 실제 승강장을 1:25 비율로 축소된 스케일을 가지는 모델링 결과 및 각 경계조건을 나타내고 있다. FIG.4는 모델링에 사용된 격자의 구성을 나타내고 있다. 계산에는 60 만개의 격자를 사용하였으며, 난류모델은 2 장의 주행 시뮬레이션과 동일한 k-e 난류모델을 사용하였다. FIG.5는 PSD의 통로가 열린 상태에서 열차로부터 발생된 연기의 궤적을 Path Line으로 도시한 것이다. 좌측으로부터 0.5m/s의 속도를 가지는 제연 기류가 승강장내에 유입되면서 화재시 발생한 연기를 유도하고 있는 모습이다. 대부분의 연기는 제연 기류에 의해 승강장 밖으로 빠져나가지만 화재 발생지역 인근 계단을 통하여 2 층 대합실로 연기가 이동하는 것을 볼 수 있다. FIG.6는 승객 대기 지역으로부터 7cm 지점, 즉 실제 승강장 크기에서 175cm의 높이에서 관찰되는 기류의 속도 벡터를 나타내고 있다.



**FIG. 3 모델링 경계조건**



**FIG. 4 격자 생성 및 구성**



**FIG. 5 제연시 발생된 연기의 거동 - Path Line**

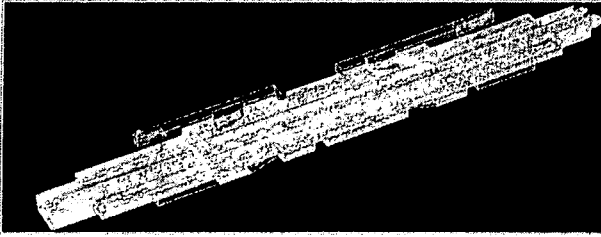


FIG. 6 제연 운전에 의한 기류 및 열차로부터 발생된 연기의 거동 - Vector

#### 4. 결 론

본 실험을 통해서 지하철 화재 시 역사 연기유동을 실제 역사의 축소 모형을 제작하여 가시화하여 분석하였다. 공기와 헬륨의 정량화된 비율로 1MW 화재 강도를 각각의 시나리오를 가지고 모형내 연기의 거동을 가시화함으로써 실제 지하철 화재 시 승객 안전대책 및 계획된 방재 대책을 검증할 수 있을 것이다. 특히 제연 송풍이 기본으로 역사에 운영되고 있을 때 PSD의 설치가 중요성을 각 시나리오에서 확인할 수 있었다. PSD가 설치되어 있지 않을 경우 제연 송풍이 오히려 역사내 연기를 확산시키는 역효과를 불러 올 수 있음을 실험을 통해 알 수 있었다. 지하철 화재 시 PSD가 달려 있을 경우 연기의 확산을 지연시켜 승객이 안전하게 대피할 수 있는 시간을 줄 수 있지만, 화재 시 PSD가 자동개폐가 되지 않으면 제 역할을 하지 못할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 ㈜대림산업과 산업협동과제의 일환으로 진행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) O. Vauquelin, O. M'egret\*. 2002. "Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel." Fire Safety Journal 37 (2002). pp. 525-533
- 2) J.H. Lee, M.D. Oh, 1983, Train Wind in the Subway Tunnel, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, Vol. 10, pp109-114
- 3) O. M'egret\*, O. Vauquelin. 2000. "A model to evaluate tunnel fire characteristics" Fire Safety Journal 34 (2000). pp. 393-401
- 4) Myung Bae Kim, Yong Shik Han, Myoung O. Yoon. "Laser-assisted visualization and measurement of corridor smoke spread" Fire safety Journal 31 1998. pp,239-251