

# 중저압 물분무를 이용한 객차내 화재진압에 관한 실험 및 수치해석적 연구

## An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression Using a Mid-low Pressure Water Mist in a Carriage Fire

양승신<sup>1</sup>, 노재성<sup>1</sup>, 유홍선<sup>\*2</sup>, 김동현<sup>3</sup>, 정우성<sup>3</sup>, 장용준<sup>3</sup>

Seung-Shin Yang, Hong-Sun Ryou, Dong-Hyun Kim, Woo-Sung Jung, Yong-Jun Jang

**Keywords** : Fire Suppression (화재진압), Water mist (물분무), Carriage fire (객차 화재), Numerical simulation (수치해석)

### Abstract

The present study investigates the effect of fire suppression using a mid-low pressure water mist in a carriage fire. The fire extinguishing time and temperature distributions below ceiling in the enclosed compartment of 2.9 m × 2.8 m × 5.0 m are measured by stopwatch and k-type thermocouples for various fire positions. The numerical simulations are extensively performed using Fire Dynamics Simulator (FDS, Ver. 4.0) code and the predictions are compared with experimental data. The prediction results are good agreement with the measured maximum temperature in the all cases. Whereas the predicted temperature is about 40°C higher than the measured temperature after operating of water mist. The predicted fire extinguishing times are compared with those of measured data. Fires are extinguished within 200 seconds at the experiment in Case 2 and Case 3. But in Case 1 fire is not extinguished in the numerical simulation. The reason of the discrepancy between predicted and measured data is that a simple suppression algorithm has been implemented in FDS. due to the difference of physical phenomenon during the operating of water mist. Also, various databases of fire properties for combustible materials and more elaborate model considering the water mist are required for better predictions of the cooling and suffocation effect.

### 1. 서 론

객차 화재는 많은 인명과 재산피해 뿐만 아니라 물류 수송의 마비로 인하여 경제적 손실을 크게 초래 할 수 있다. 특히 최근에는 불특정 다수에 대한 방화로 인하여 대량의 유독가스 및 열기에 의해 대형인명 사고가 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 대표적인 객차 화재 사례로는 1995년 10월 25일 아제르바이잔의 수도 바쿠시에서 열차의 전기 합선으로 화재가 발생하여 289명이 사망, 270명이 부상하는 대형사고가 발생하였고, 2000년 11월 11일 오스트리아 키트슈타인호른의 산악 케이블 열차에서 화재가 발생하여 150여명이 사망하였다[1].

국내에서는 2003년 2월 18일 대구지하철 1호선 중앙로 역에서 방화로 인한 화재가 발생하여 객차 내부에서 연소된 유독가스에 의해 192명이 사망하였고, 147명이 부상하는 엄청난 인명 피해를 주었다. 이러한 인명 피해를 증가시키는 원인으로 국내 철도시스템은 통합된 화재 감지 및 자동소화장치가 객차내에 설치되어 있지 않기 때문이다. 이로 인하여 객차 화재 발생시 발생 빈도에 비하여 대형 참사를 초래하는 경우가 많다. 따라서 객차 및 지하철에 대하여 안전성을 확보하기 위해서는 화재감지 및 소화 시스템을 통합적으로 구축하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

소화 시스템에서 가장 일반적인 수계 화재 진압장치로는 스프링클러가 널리 사용되고 있으나 객차 및 지하철과 같은 장소에서는 과도한 물소모량으로 인한 수손의 우려가 있어 스프링클러 사용을 제한하여 왔다. 그러나 물분무 시스템은 가압장치를 이용하여 스프링클러에서 사용되는 압력보다 상대적으로 높은 압력으로 물

한국철도학회논문집 / 제 권 / 제 호 / 200 년 /

<sup>1</sup> 비회원, 중앙대학교 대학원, 박사과정

<sup>\*2</sup> 정회원, 중앙대학교 기계공학부, 교수

<sup>3</sup> 정회원, 한국철도기술연구원 공기유동연구그룹

탱크를 가압하여 미세한 물분무를 생성함으로써 물의 사용량을 90%정도 절감할 수 있고 액적 증발을 통한 산소 차단 효과로 질식 효과로 인하여 탁월한 화재 진압을 할 수 있어 객차 및 지하철 등과 같은 공간에 사용하기에 적합하다.

해외 선진국에서는 1990년대 초반부터 본격적으로 이러한 물분무 시스템의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 현재에 들어와서는 기존의 스프링클러 대신 물분무 시스템으로 대체되고 있는 상황이다. 이에 비해 국내의 경우, 물분무 시스템에 대한 연구는 90년대 후반부터 학교 및 연구기관 등을 중심으로 연구를 활발히 진행되어 왔으며 현재는 상용화하기 전 단계에 이르렀다.

최근 물분무를 이용한 화재진압 시스템에 관한 연구로 B. Yao 등은 제한된 공간내에서 에탄올 및 고체 연료를 이용하여 화재 진압 실험을 수행하였다. 그들은 소화가 되기 위해서는 충분한 유량의 물분무가 제공되어야 하고 또한 외부와의 환기량이 적을수록 소화 효과가 증가한다고 하였다[2]. M. Morita 등은 폼화제를 이용한 화재 진압 실험을 통하여 화재 진압요소가 증발잠열, 산소농도 및 연료의 냉각효과 등에 의해 지배되며 연료 냉각효과의 영향이 다른 효과에 비해 상대적으로 작다는 사실을 제시하였다[3]. 또한, L. Yimin 등은 고체연료 PVC 화재와 물분무와의 상호작용을 실험적으로 연구하여 단일 물분무 노즐의 압력에 따른 소화 특성을 파악하였으며 발열량, smoke, 일산화탄소 및 산소농도 변화와 화재 진압 특성에 대하여 연구하였다[4]. S.C. Kim 등은 핵산 및 메탄올 폼화제에 대한 물분무 화재 진압실험을 통하여 연층 냉각과정이 급격냉각(sudden cooling)과 점진냉각(gradual cooling) 두 가지 영역으로 나누어진다는 사실을 제시하였으며 이를 수치해석 결과와 비교 분석하였다[5,6]. 또한 김성찬 등은 메탄올 폼화제 실험을 통하여 화재 강도가 증가할수록 산소차단과 냉각효과의 영향으로 소화시간이 감소한다는 사실을 제시하였다[7,8]. 지금까지 물분무를 이용한 화재진압에 관한 연구로 폼화제 실험을 수행하여 그 결과를 수치해석 결과와 비교하는 방법으로 진행되어 왔다. 하지만 객차화재 발생시 물분무가 화재진압에 미치는 영향을 고려한 연구 결과는 아직도 미흡한 상태이다. 최근에는 김성찬 등이 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 화재성장 모델이 객차내 화재 특성에 미치는 영향에 대하여 수치해석적 방법을 이용하여 연구하였다[9]. 그러나 수치해석을 통하여 화재 진압에 대한 정성적인 결과만을 파악하였고 실험 결과와

정량적으로 비교하지 않았다.

본 연구에서는 중저압 물분무 노즐을 이용하여 모형 객차 화재에 대한 화재 실험을 통하여 화재진압 특성 및 온도분포를 파악하고자 한다. 또한 본 실험 결과를 통하여 화재 전용 수치해석 코드인 FDS를 이용하여 모형객차 내부의 화재 거동을 해석하고 이를 바탕으로 객차내 화재 발생시 화재 진압을 위한 중저압 물분무 시스템을 설계하는데 기본 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험 및 수치해석

### 2.1 실험

#### 2.1.1 실험장치

객차내 화재 진압 실험을 수행하기 위하여 객차 일부분을 실험크기로 모형 제작하였다. 실험 객차의 크기는 폭 2.9 m, 높이 2.8 m, 길이 18 m이지만 모형 객차의 길이는 5 m로 일부분만을 제작하였다. 모형 객차는 강철로 된 밀폐공간으로 상부에는 연소 가스와 물분무 입자를 배기 팬에 의해 외부로 배출할 수 있도록 제작하였다. 실험을 하는 동안 상부 급배기 영향을 방지하기 위하여 모형 객차를 폐쇄하여 기밀을 유지하였다.

화재로 인한 온도상승과 물분무에 의한 냉각효과를 파악하기 위하여 모형 객차 천정부에 그림 1에서 보는 바와 같이 수평 및 길이방향으로 각각 40cm, 50cm 간격으로 k-type 열전대(크로멜 - 알루멜, 측정범위 -200 ~ 1260℃)를 설치하였다. 그림 1은 모형 객차의 형상 및 크기, 객석의 위치 및 크기, 열전대의 위치 등을 나타내고 있다.

#### 2.1.2 화 원

모형 객차 화재 실험에서 사용된 화원은 객차내 좌석에서 초기 화재가 발생하는 것으로 가정하였으며, 그림 1과 같이 실제 객차 좌석과 같은 크기인 폭 0.6 m, 높이 0.8m, 길이 1.1m로 제작하였다. 실제 객석과 가능한 최대한 유사하게 만들기 위해서 나무 및 폴리우레탄을 이용하여 모형 객석을 제작하였다. 본 연구에서는 객석에 대한 적절한 발열량 자료가 거의 없기 때문에 객석 재질과 가장 유사한 폴리우레탄(Polyurethane)의 발열량을 이용하였다. 폴리우레탄(Polyurethane)의 발열량은 다음 식에 의해 계산되었다[10].

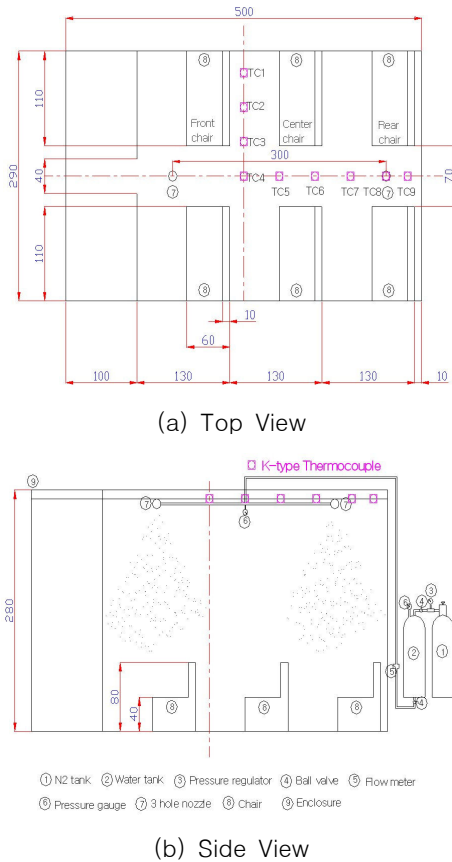


Fig. 1 A Schematic of the experimental setup.

$$\dot{Q} = \chi \cdot \dot{m}_f'' \cdot A_f \cdot \Delta H_C \quad (1)$$

$$\dot{m}_f'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_V} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_F'' = 51.2 \text{ Kw/m}^2, \quad \dot{Q}_L'' = 24.3 \text{ Kw/m}^2$$

$$L_V = 1,220 \text{ kJ/kg}, \quad \Delta H_C = 28,056 \text{ kJ/kg}$$

여기서,  $\dot{Q}$ 은 발열량,  $\chi$ 는 연소효율,  $\dot{m}_f''$ 은 연료의 연소율,  $A_f$ 는 화원의 면적,  $\Delta H_C$ 는 연료의 연소열,  $\dot{Q}_F''$ 는 화염에서 액체 표면으로 전달되는 열,  $\dot{Q}_L''$ 은 연료 표면에서의 손실열,  $L_V$ 는 증발잠열을 나타낸다. 일반적으로 폴리우레탄(Polyurethane)과 같은 고체연료는 열해리(thermal pyrolysis)를 일으킨 다음 증발하여 연소된다. 이때 열해리를 일으키는 과정에서 불완전 연소로 인하여 Soot, 일산화탄소 등 유독성 가스를 생성하므로 발열량을 산정할 때 연소효율을 고려하여야 한다. 따라

서 본 실험에서는 연소효율을 0.7로 고려하여 유효발열량을 산정하였다. 화원의 위치는 앞(case 1), 중간(case 2), 뒤(case 3) 좌석에서 화재가 발생하는 경우를 가정하였고, 이때 물분무 소화시스템을 이용하여 소화시간 및 온도분포를 측정하였다.

### 2.1.3 N<sub>2</sub> 가스 가압장치 물분무 시스템

화재 진압 실험에 이용된 물분무 노즐은 3구경 물분무 노즐로써 스웰방식의 중공형 노즐을 이용하였으며, 그림1과 같이 모형 객차내 두 개의 노즐을 설치하였다. 가압장치로 N<sub>2</sub> 가스 가압 장치를 이용하여 물탱크를 20bar의 압력으로 가압하여 미세 액적을 발생시켰다. 일반적으로 온도감지기의 경우 74℃ 정도의 온도에서 화재를 감지하게 되므로 본 실험에서는 천정부에 설치된 열전대의 최대 온도가 74℃가 된 후 반응시간을 10초로 주어 10초 후에 물분무 시스템을 작동시켰다. 이때 작동압력은 20bar로 유지하였다. 표 1은 점화 후 열전대의 최대 온도가 74℃에 이르는 시간과 반응 시간 10초 후에 물분무 시스템이 작동되는 시간을 나타내고 있다. 또한 물분무 시스템에 공급되는 관내 압력과 유량을 측정하기 위하여 유량계와 압력계를 각각 설치하였다.

Table 1 Detail of chair fires

| Fire Position   | Front | Center | Rear |
|---|-------|--------|------|
| Reaching time for maximum ceiling temperature 74℃ since fire ignition | 12s   | 20s    | 15s  |
| Water mist operation time since fire ignition                         | 22s   | 30s    | 25s  |

### 2.2 수치해석

객차내 화재와 물분무에 의한 화재진압효과를 수치해석적으로 파악하고자 본 연구에서는 수치해석 코드로 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) 4.0을 사용하였다.[11] 난류유동장의 해석은 LES(Large Eddy Simulation) 모델을 적용하였으며 연소모델은 혼합분율모델(mixture fraction combustion model)을 적용하였다. 복사열전달 방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)에 의해 해석하였다. 화재를 억제하기 위해 적용된 물분무 거동은 Eulerian - 한국철도학회논문집 / 제 권 / 제 호 / 200 년 /

Lagrangian 방법에 의해 기상과 분무 액적과의 유동을 해석하였으며 분무액적의 거동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

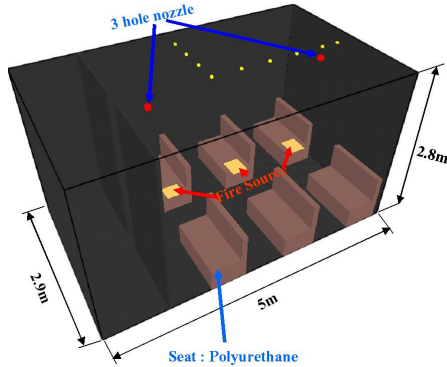


Fig. 2 Schematic of numerical simulations.

$$\frac{d}{dt}(m_d u_d) = m_d g - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (u_d - u) |u_d - u| \quad (3)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 1 \\ \frac{24(1 + 0.15 Re^{0.687})}{Re} & 1 < Re < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re \end{cases} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho |u_d - u| 2r_d}{\mu} \quad (5)$$

여기서,  $m_d$ 는 액적(Droplet)의 질량,  $u_d$ 는 액적의 속도,  $u$ 는 기상(Gas phase)의 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $r_d$ 는 액적의 반경,  $C_D$ 는 항력계수(Drag coefficient),  $Re$ 는 레이놀즈수를 각각 나타낸다. 일반적으로 분무액적의 분포함수에 대한 다양한 관계식이 제시되고 있으나 본 연구에서는 공학적으로 널리 사용되고 있는 Rosin-Rammler 분포함수와 실험에서 측정된 액적크기 분포를 비교하였으며 관계식은 다음과 같다.

$$F(d) = 1 - e^{-0.693(\frac{d}{d_m})^r} \quad (6)$$

여기서  $r$ 은 실험상수로서 2.43을 사용하였다. 수치해석의 대상영역은 실험에서 수행된 동일한 형상

을 가진 크기로 하였으며 객차공간의 개략적인 형상과 크기는 그림 2에 나타내었다. 수치해석은 객차 앞 좌석에서 화재가 발생한 경우(case 1), 중간 좌석에서 화재가 발생한 경우(case 2), 뒷 좌석에서 화재가 발생한 경우(case 3)에 대하여 물분무 시스템이 작동하였을 때 객차내 소화특성을 실험결과와 비교하였다. 좌석에 대한 자료는 화재 물성에 대한 연구가 부족한 실정이고 객차마다 재질이 다르기 때문에 승용차 및 버스좌석에 사용되고 있는 객차 좌석과 유사한 Polyurethane을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 PC는 512MB의 기억용량과 Pentium-IV 2GHz급 PC를 사용하였으며 계산격자는 약 960,000개로 화재발생 이후 360s 까지 계산하는데 걸린 시간은 각 case당 약 22시간 정도 소요되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모형 객차내 천정에서의 평균 온도

객차내 화재 발생시 화재를 감지하는 연기 및 온도 감지기는 대부분 객차 천정에 위치하고 있어 감지기 작동에 있어서 천정 아래 연층의 온도 분포를 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 모형 객차에서 천정 아래 연층의 온도분포에 대한 실험결과 및 수치해석 결과를 비교하였다.

그림 3은 모형 객차내에서의 화재 진압실험을 통하여 천정부에 설치된 열전대의 평균온도를 나타내고 있다. 일반적으로 폴리우레탄(Polyurethane)은 NFPA에서 규정한 바와 같이 화재성장이 ultra-fast 모드를 따르고 있기 때문에 그림 3에서 보는 바와 같이 빠른 시간에 천정부의 온도가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 세 가지 경우 모두 25초 정도가 지나면 평균 온도가 74℃에 이르게 된다. 그러나 중간 좌석에서 화재가 발생할 경우에는 다른 화원 위치에 비해 평균 천정온도가 30℃ 정도 높게 측정된 것을 알 수 있다.

이러한 이유는 천정부에 설치된 열전대 중에서 가장 먼저 74℃에 도달하는 열전대를 기준으로 물분무 시스템을 작동시키기 때문이다. 화원 위치가 가운데 좌석일 경우 74℃에 이르는 시간이 다른 화원 위치의 경우와 거의 같지만, 다른 화원 위치에 비해 물분무 노즐과의 거리가 멀어 물분무 작동 후에도 연층을 냉각시키는데 10초 정도 더 소요된다. 따라서 온도분포는 물분무 작동시간이 짧을수록 낮은 온도에서 소화되기 시작하였기 때문에 천정평균온도가 상대적으로 낮게 나타났다.

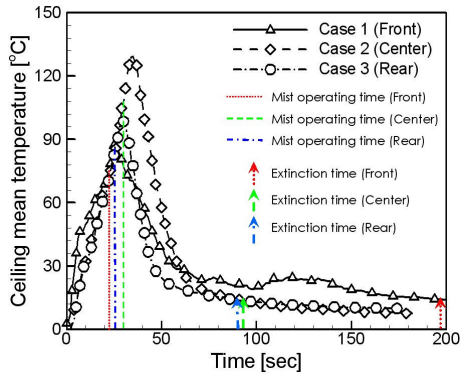


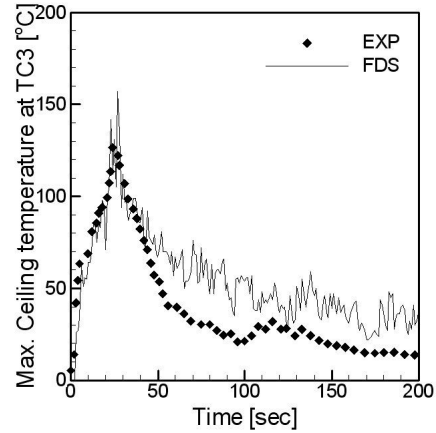
Fig. 3 Comparisons of ceiling mean temperature.

물분무 작동 후 천정의 평균온도는 세 가지 경우 모두 어느 시간 동안 상승한 후에 하강하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로 물분무 시스템이 정상적으로 작동한 후 연층의 냉각이 이루어지기 위해서는 어느 정도의 시간이 필요하다는 것을 알 수 있다.

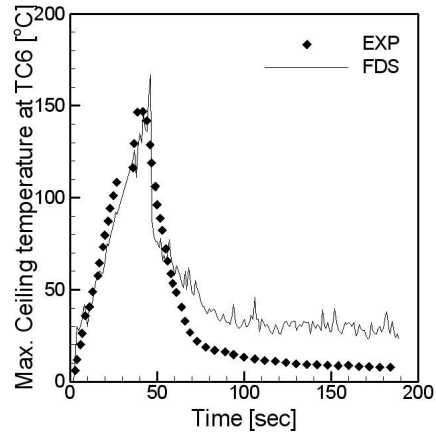
그림4는 세 가지 화원 위치(앞, 중간, 뒤)에 대하여 객차 천정의 열전대가 처음으로 74°C를 감지한 열전대에서의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 및 수치해석 결과 세 가지 화원 위치에 대하여 같은 열전대에서 74°C를 처음으로 감지하였고 물분무 작동 직전 시간까지 비교적 정확한 예측을 하고 있다. 이러한 사실로 보아 수치해석적 방법을 통하여 객차 내 화재로 인한 온도 상승과 물분무 작동으로 인한 연층의 냉각 과정을 잘 파악하다고 사료된다. 최대 온도의 경우, 물분무 작동 직전 시간까지 비교적 정확한 예측을 하고 있지만 물분무 작동 후의 경우 수치해석 결과가 실험결과 보다 약 25°C정도 높게 예측하고 있다. 이는 수치해석의 경우 완전 밀폐공간이며 객차 외부와는 완전히 단절된 것으로 가정하였으나, 실제 화재 실험의 경우 공간내부의 틈새를 통하여 외부 공기 및 내부공기의 외부 유출이 가능하기 때문이다. 또한 수치해석의 경우 벽면 조건을 단열 조건으로 가정하였으나 실제 화재공간에서는 강철 벽면으로 열전달이 발생되어 객차 내의 열이 외부로 방출되기 때문에 실험 결과가 수치해석에 비해 다소 낮게 예측된다.

물분무 작동 이후 천정의 온도변화는 급격한 냉각이 이루어지는 영역과 점진적인 냉각이 이루어지는 영역을 볼 수 있다[5]. 급격한 냉각이 이루어지는 영역을 보면 세가지 case 모두 실험 및 수치해석 결과와 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 점진적인 냉각이 이루어지는

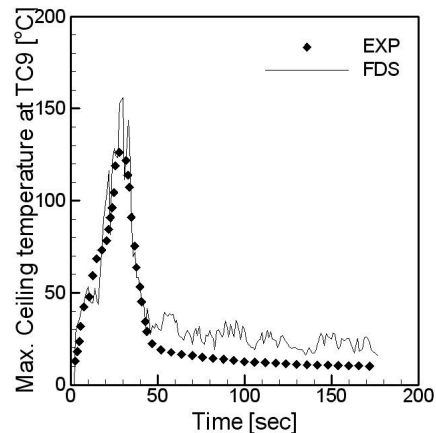
영역은 최대 40°C정도 수치해석 결과가 높게 예측하였다.



(a) Case 1(Front)



(b) Case 2(Center)



(c) Case 3(Rear)

Fig. 4 Comparison between predicted and measured maximum ceiling temperature profile.

**Table 2 Fire extinction time for fire positions**

| Fire Position                        | Front | Center | Rear |
|--------------------------------------|-------|--------|------|
| Fire extinction after mist operation | 176s  | 63s    | 65s  |
| Total time after fire ignition       | 198s  | 93s    | 90s  |

**Table 3 Comparisons of fire extinction time for fire positions**

| Fire Position | Front         | Center | Rear |
|---------------|---------------|--------|------|
| Experiments   | 176s          | 63s    | 65s  |
| Numerical     | No extinction | 180s   | 178s |

표 3은 화원 위치에 따른 소화시간을 실험과 수치해석을 통해 예측한 결과를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 case 2, 3은 수치해석을 통해서 소화가 이루어지지만 실험에서 측정된 소화시간과는 다소 100초 이상의 다소 많은 차이를 보이고 있다. 그러나 case 1의 경우 실험에서 약 3분 전에 소화가 이루어지는 반면 수치해석에서는 소화가 되지 않았다. 이러한 이유는 실제 물분무에 의한 화재 진압은 직접 냉각효과, 산소차단 효과, 질식효과 및 복사열차단 효과 등 복합적인 요인으로 인하여 화재 소화가 이루어지지만, 수치해석의 경우 이러한 물리적 현상을 모두 고려하지 못하고 공간내부의 가연산소량에 의해 화재소화가 결정되기 때문에 실제 현상에 비해 상대적으로 소화시간이 길게 나타나거나 소화되지 않는 것으로 판단된다.

**3.2 객차 내 산소농도 및 수증기 질량분율**

그림 5는 각 화원 위치에 대하여 시간에 따른 객차 내부의 산소 농도 변화를 수치해석을 통하여 나타낸 그림이다. 세 가지 case 모두 물분무 작동 이후 산소감소율이 증가하는 것으로 나타났으며 화원의 위치에 따라서 차이를 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 case 2(center)의 경우 산소 감소율이 가장 크게 나타나는데, 이는 그림 3에서 나타낸 바와 같이 case 2(center) 경우 물분무 작동시간이 다른 case보다 상대적으로 늦게 작

동되어 화재 성장이 어느 정도 성장한 상태가 되고, 이로 인하여 화원에서 발생한 열에 의해 더 많은 분무액적이 증발하여 수증기의 질량분율이 증가하기 때문에 상대적으로 산소 농도는 감소하게 된다. 그러나 case 1(front)의 경우는 다른 case에 비해 산소 감소율이 작게 나타나고 있다. 이러한 이유는 많은 열이 발생하기 전에 물분무가 작동되어 상대적으로 적은 분무액적이 증발하게 되고 이로 인하여 산소농도 또한 늦게 감소하게 된다.

그림 6은 시간에 따른 객차 내부의 수증기 변화를 나타내고 있다. 세 가지 경우 모두 물분무 작동 후 공간 내부의 수증기의 질량 분율이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 앞에서 언급하였던 바와 같이 화재가 다른 경우보다 성장된 case 2의 경우 더 많은 분무액적이 증발하여 수증기의 질량분율이 증가하게 된다. 따라서 객차 내부의 상대적인 수증기 질량분율의 증가로 인하여 산소농도는 지속적으로 감소하게 되고 산소농도 감소에 의한 화재 소화가 촉진될 것으로 판단된다.

실험 및 수치해석 비교에서 볼 수 있듯이 정확하고 타당성 있는 수치해석 결과를 얻기 위해서는 각각의 화재가 정상상태에 도달하는 시간과 정상상태에 도달하기 까지 발열량의 시간변화율에 대한 보다 명확한 정보가 요구된다. 이러한 정보를 충분히 얻기 위해서는 가연물의 시간에 따른 발열량 및 물성에 대하여 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 수치해석 계산시 물리적 현상을 보다 잘 적용하는 화재 모델이 필요하고, 현재 사용되고 있는 산소농도에 의해 소화되는 모델 뿐만 아니라 냉각효과, 복사열차단 및 질식효과 등이 고려된 모델이 필요하다고 하겠다.

**4. 결 론**

본 연구에서는 객차내 증저압 물분무를 이용하여 화재진압을 실험적으로 파악하였으며 이를 수치해석으로 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 물분무 시스템 작동 이후 천정부의 온도분포는 Case 2, 3의 경우 시간에 따른 천정평균온도 감소폭이 유사한 경향을 보이고 있지만, case 1의 경우 화원의 직접 냉각보다는 분무액적의 증발에 의한 화원 주위의 산소농도 감소에 의해 화재가 진압되기 때문에 천정부 온도 감소율이 느리게 나타났다.

2. 실험 및 수치해석 최대온도변화 결과에서 최대온도는 수치해석 결과가 실험결과 보다 약 25℃정도 높게 예측하였고, 점진적으로 냉각되는 영역에서 수치해석 결과가 실험결과 보다 최대 40℃정도 높게 예측하였다.
3. 실험과 수치해석에서의 화재 소화시간을 비교한 결과 case 2, 3일 경우 실험 및 수치해석 둘다 소화되었으며, case 1일 경우 실험에서는 소화 되었으나 수치해석에서는 소화되지 않았다.
4. 산소농도 변화는 화원 위치에 따라서 다르게 감소하였으며 물분무 작동 시간이 가장 늦은 case 2일 경우 산소농도 감소율이 다른 case에 비해 빨리 감소하였으며, 수증기 질량분율은 다른 case에 비해 빨리 증가하였다.
5. 객차내 화재발생시 가연물의 시간에 따른 발열량 및 물성치에 대하여 연구가 많이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 수치해석 계산시 현재 사용되고 있는 산소농도에 의해 소화되는 모델 뿐만 아니라 냉각효과, 복사열차단 및 질식효과 등이 고려된 모델이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 건설교통부 국가 교통 핵심 기술 개발 사업 (03 - 안전 - 22 )지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 장용준, 김동현, “철도화재 조기탐지/자동소화장치”, 한국철도기술웹진, 제 51호, 2005.
2. Yao, B., Fan, W. and Liao, G., "Interaction of Water Mists with a Diffusion Flame in a Confined Space“, Fire Safety Journal, Vol. 33, pp. 129-139, 1999.
3. Morita, M., Minami, T. and Kikkawa, M., "Suppression Mechanism of Water Mist for Pool Fire", 15th Meeting of the UJNR Pannel on Fire Research and Safety, Vol. 1, pp.273-279, 2000.
4. Yimin, L., Yao, B. and Qin, J., "Preliminary Burning Tests on PVC Fires with Water Mist", Polymer Testing, Vol. 24, pp.583-587, 2005.
5. Kim, S, C. and Ryou, H, S., "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression Using a Water Mist in an Enclosure", Building and Environment, Vol. 38, pp1309-1316, 2003
6. Kim, S, C. and Ryou, H, S., "The Effect of Water Mist on Burning Rates of Pool Fire", Journal of Fire Sciences, Vol. 22, pp. 305-323, 2004.
7. 김성찬, 박현대, 유홍선, “물분무를 이용한 화재제어에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회논문집, 제 27권, 제 3호, pp. 367-373, 2003.
8. 김성찬, 유홍선, “물분무에 의한 화재제어 특성에 관한 연구”, 설비공학회논문집, 제 15권, 제 4호, pp. 261-267, 2003.
9. 김성찬, 유홍선, 최영기, 김동현, “화재 성장 모델이 객차내 화재 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구”, 한국철도학회논문집, 제 7권, 제 3호, pp. 180-185, 2005.
10. Dougal, D., "An Introduction to Fire Dynamics", ACADEMIC PRESS, pp. 152-185, 1985.
11. "Fire Dynamics Simulator (Version 4.0) - Technical Reference Guide, Fire Research Division, Building Fire Research Laboratory, NIST, 2004.