

## 화재 성장 모델이 객차내 화재 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

### A Numerical Study of the Effect of Fire Growth Model on Fire Characteristics in a Carriage

김성찬<sup>1</sup> · 유홍선<sup>2</sup> · 최영기<sup>2</sup> · 김동현<sup>3</sup>

Sung-Chan Kim · Hong-Sun Ryou · Young-Ki Choi · Dong-Hyun Kim

#### Abstract

The present study investigates the effect of fire growth model on fire development characteristics in a carriage. The parallel processing version of FDS code is used to simulate the fire driven flow in a carriage and two types of fire growth model which are flame spread model and  $t^2$  model are examined for the same geometrical condition. The heat release rates(HRR) of both model are similar each other until 30 s after ignition, but the flame spread model predicts 5 times higher than those of the  $t^2$  fire model during the quasi-steady fire period. Maximum heat release rate in the case of flame spread model reaches about to 12 MW at 100 s after fire ignition. Also, various database of fire properties for combustible materials and more elaborate combustion model considering the flame spreading phenomena are required for better predictions of fire development characteristics using numerical simulation.

**Keywords :** Fire growth(화재 성장), LES(Large Eddy Simulation), Fire Spreading(화재전파), Numerical Simulation(수치해석), Fire Safety(화재안전)

#### 1. 서론

최근 들어 교통 및 산업사회의 발달과 함께 대중이 밀집되는 공간이 증가하고 있으며 이러한 공간의 활용성과 편의성을 높이는 동시에 안전성의 확보에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 교통시설과 같이 대중이 밀집되는 공간에서의 화재발생은 많은 인명 피해 뿐만 아니라 국가 기간시설의 마비라는 점에서 큰 사회적 문제가 될 수 있다. 대표적인 예로 2003년 2월 18일에 발생한 대구지하철 중앙로역 화재 사고는 불특정 다수에 대한방화로 인하여 객차내부 연소 및 발생된 유독가스에 의해 많은 인명과 재산 피해뿐만 아니라 엄청난 사회적 혼란을 가져왔다.

이러한 객차나 지하철, 역사 등에 대한 안전을 확보하기 위해서는 화재안전에 관한 규정요소를 종합하고 화재 제어 모델 및 설계에 관한 기법 등을 종합적으로 고려하여 화재 안전 시스템을 구축하여야 한다. 이러한 통합 화재

안전 시스템을 구축하기 위해서는 화재 현상에 관한 기본적인 이해를 바탕으로 화재 전파 및 연기거동을 해석하고 이러한 화재 특성을 바탕으로 화재 제어 모델 및 시스템의 설계 및 운용이 이루어져야 한다. 그러나 국내의 경우 이러한 기본적인 화재 현상에 대한 연구가 선진국에 비해 상대적으로 부족하기 때문에 이러한 통합 시스템을 구축하거나 기준을 마련하는데 어려움이 있다. 따라서 적절한 화재 안전 시스템을 구축하기 위해서는 화재 거동에 관한 이해가 필수적으로 선행되어야 한다.

화재 발생으로 인한 공간 내부의 열 및 물질전달 특성을 파악하기 위해서는 실규모의 화재 실험(real scale fire test)을 하는 것이 가장 좋은 방법이지만 경제적 비용과 공간상의 제약, 화재발생의 위험성 등으로 인하여 화재 거동 해석에 수치 해석적 방법이 널리 이용되고 있다. 대표적인 수치 해석 방법에는 Zone 모델과 Field 모델이 있는데 Zone 모델은 화재부를 상부 뜨거운 연층부와 하부 차가운 공기층으로 나누어 각 층 내의 온도나 농도 등의 기계적 성질이 균일하다고 가정하여 해석함으로써 각층에 대한 평균적인 자료를 제공한다[1-3]. 한편 Field 모델은 화재 공간을 미소

1 중앙대학교 미래신기술연구소 박사후연구원

2 정회원, 중앙대학교 기계공학부, 교수

3 정회원, 한국철도기술연구원 공기유동연구그룹, 책임연구원

격자들로 형성하여 유동장을 지배하고 있는 보존방정식들을 경계조건을 통하여 직접 해석함으로써 화재공간에 대한 보다 상세한 자료를 제공한다[4,5]. 최근에는 컴퓨터의 계산 성능 발달과 함께 화재 공간내부의 가연물의 물성에 대한 연구가 진행됨에 따라 국부적으로 상세한 계산 결과를 제공하는 Field 모델에 의해 화재를 해석하고자 하는 노력이 증대되고 있다.

공간 내부의 화재에 대하여 타당한 수치해석 결과를 얻기 위해서는 객차 내부의 가연물에 대한 적절한 화재 시나리오를 선정하는 것이 매우 중요한 문제이다. 일반적으로 Field 모델에서 적용되는 화재 시나리오는 고정된 화원에 대하여 시간에 따라 발열량 변화를 고려하는 경우와 공간내부의 가연물에 대한 화염 전파를 직접 해석하는 경우 등 대표적으로 두 가지 경우가 널리 적용되고 있다. 전자의 경우 사전에 시간에 따른 발열량을 알고 있는 상태에서 공간 내부의 열 및 연기거동을 해석하게 되고 후자의 경우 공간내부의 열 유동장 및 가연물의 물성에 의해 화재 거동이 변화하기 때문에 보다 실제적인 화재 현상을 모사할 수 있다. 그러나 화염전파를 직접 해석하기 위해서는 공간내부의 가연물에 대한 상세한 물성을 필요로 할뿐만 아니라 타당한 연소 모델을 요구한다. 또한 기존의 연소 및 열유동장이외에 고체 물질과 주위공기와의 복합열전달과 고체물질의 열해리 등을 직접 해석해야 하기 때문에 많은 계산 격자를 요구할 뿐만 아니라 부가적인 방정식을 해석해야 하므로 많은 계산 시간을 소모하게 된다.

따라서 본 연구에서는 두 가지 형태의 화재 시나리오에 대하여 화재 전용 수치해석 코드인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 화재 시나리오에 따른 객차 내부의 화재 거동을 해석하고 공간 내부의 화재 거동 특성을 바탕으로 화재 안전 시스템 구축을 위한 기본 자료를 제공하고자 한다. 이러한 화재 시나리오는 많은 계산 격자를 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 병렬처리(Parallel processing)기법을 통해 다수의 계산 노드에 대하여 계산 영역으로 분리한 후 해석함으로써 계산시간을 단축하고 계산격자수에 대한 한계를 극복한다. 이러한 화재 성장 모델에 대한 정량적인 연구는 화재 거동 특성을 이해하는 선행적 과제으로써 화재 현상의 해석 및 화재 안전 설비 구축시 수치해석의 적용성을 넓히는데 기여할 수 있다.

## 2. 화재 시나리오 및 해석방법

### 2.1 $t^2$ 화재 성장

시간에 따른 화원의 발열량 변화를 고려하는 몇몇 식들이

제시되고 있으나 가장 널리 이용되는 식은 NFPA에서 규정하고 있는 화원의 발열량이 시간의 제곱에 비례하는  $t^2$  관계식이다.

$$\dot{Q} = at^2 \quad (1)$$

여기서  $\dot{Q}$ 는 발열량 [W],  $t$ 는 시간 [s],  $a$ 는 비례상수를 나타낸다. 비례상수  $a$ 는 화원의 발열량이 1 MW에 도달하는 특성시간에 따라 결정된다. NFPA 기준에서는 화재 성장에 관한 특성시간에 따라 4가지 형태의 화재 성장을 제시하고 있다[6].

적절한 화재 시나리오를 설정하기 위해서는 화재 성장에 관한 정보 이외에 공간내에서 발생할 수 있는 화재 강도를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 객차내 좌석에서 초기 화재가 발생하는 것으로 가정하였으며 객차내 좌석에 대한 적절한 발열량 자료가 거의 없기 때문에 스웨덴의 SP연구소에서 측정된 가구재의 소파 실험결과를 이용하였다[7]. Fig. 1은 시간에 따른 발열량 변화와 4가지 화재 성장모드의 비교를 나타내고 있다. 실험에서 측정된 발열량 변화는 초기 화재 잠복기(fire incubation period)를 거쳐 약 180 s 이후 급격한 발열량을 증가를 나타내고 있으며 약 270 s 이후 지속적인 연소로 인한 가연물의 질량 감소에 의해 발열량이 감

Table 1. characteristic time of  $t^2$  fires

Categories	Characteristic time
slow	600 s
medium	300 s
fast	150 s
ultra-fast	75 s

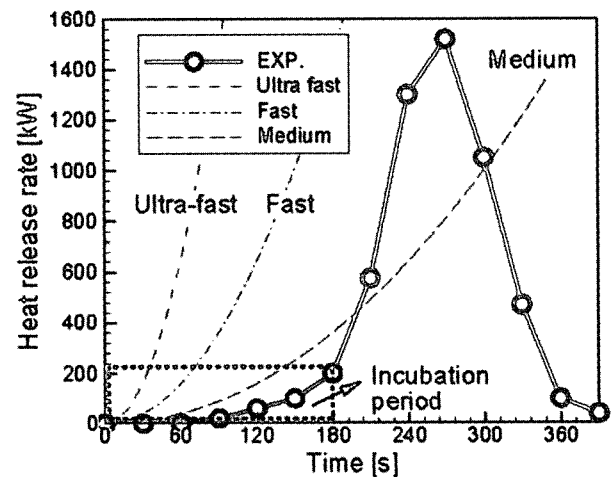


Fig. 1. Time history of heat release rate for upholstered sofa

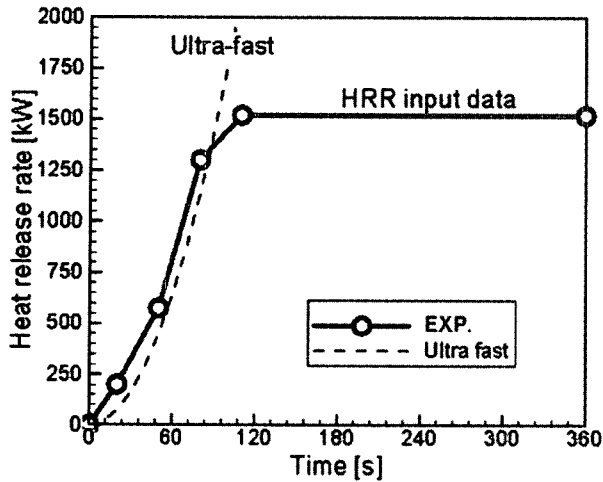


Fig. 2. Comparison of heat release rate between  $t^2$  fire growth mode and measured data

소하는 추세를 보이고 있다. 최대 발열량은 초기 발화 이후 270 s 정도에서 1520 kW를 나타내고 있다. 그러나 NFPA의 화재 성장 모드는 이러한 화재 잠복기를 고려하지 않기 때문에 실제 화재 성장 모드는 초기 화재 잠복기를 제외하여야 하며 Fig. 2에서 보는 바와 같이 ultra-fast 모드를 잘 따르고 있다. 수치해석에 적용된 화재 성장은 초기 화재 발생 후 120 s까지는 ultra-fast 모드를 적용하였으며 이후 최대발열량이 지속되는 것으로 가정하여 공간내부의 화재특성을 파악하였다.

### 2.2 화재 전파 모델

화재 발생으로 인한 발열량의 정보를 사전에 설정된 조건으로 가정하여 화재를 해석하는  $t^2$  화재 모드와 달리 화염전파 모델은 인접 가연물로의 화재 전파를 고려하여 보다 실제적인 화재 현상을 모사할 수 있다. 이러한 화염 전파 모델은 초기에 발생한 화재가 열전달에 의해 주위 가연물의 표면 온도를 증가시키게 되고 이러한 열전달 메커니즘이 지속될 경우 가연물의 표면에서는 열해리(thermal pyrolysis)가 발생하고 표면에서 연소가 발생하게 된다. 이러한 화염의 전파는 초기에 주어진 화재 강도 이외에 각각의 가연물에서 연료의 증발이 발생하기 때문에 추가적인 발열량의 증가를 가져오게 된다. FDS 코드에서는 화염전파에 대한 인접가연물의 증발량은 다음과 같은 고체표면에서의 에너지 균형에 의해 계산된다[8].

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial n^2} \quad (2)$$

여기서  $\rho_s$ 는 고체의 밀도,  $c_s$ 는 비열,  $k_s$ 는 열전도계수,  $T_s$

는 고체 표면의 온도를 나타낸다. 고체 표면 내에서는 표면에 수직방향으로의 열전도를 고려하고 공기와 고체표면의 경계에서의 에너지 균형을 고려하면

$$-k_s \frac{\partial T_s(0, t)}{\partial n} = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3)$$

여기서  $\dot{q}_c''$ 과  $\dot{q}_r''$ 은 표면에서의 대류 및 복사열유속(convective and radiative heat flux)을 각각 나타낸다.

이때 만일 표면의 온도가 발화온도(ignition temperature)에 도달하게 되면, 즉,  $T_s(0, t) = T_p$  이면

$$\dot{q}_p'' = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' + k_s \frac{\partial T_s(0, t)}{\partial n} \quad (4)$$

여기서  $\dot{q}_p''$ 은 열해리 에너지를 나타낸다.

따라서 증발되는 연료의 양은 연료를 열해리(pyrolysis)시키는 데 필요한 에너지에 의해 계산된다.

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_p''}{\Delta H_v} \quad (5)$$

여기서  $\dot{m}''$ 과  $\Delta H_v$ 는 연료의 증발률(mass loss rate)과 증발잠열(heat of vaporization)을 각각 나타낸다.

### 2.3 해석 방법

화재 발생으로 인한 열 및 연기거동을 해석하기 위하여 이용된 수치해석 프로그램은 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발 중인 화재해석 코드인 FDS(Fire Dynamics Simulator) 4.0을 이용하였다[9]. 기본으로 FDS 코드는 LES(Large Eddy Simulation) / DNS(Direct Numerical Simulation)에 의해 난류유동의 해석이 가능하지만 DNS의 경우 지나치게 많은 격자수를 요구하고 연소모델이 제한적이기 때문에 본 연구에서는 실제 공학적인 문제에 적용 범위가 상대적으로 폭 넓은 LES난류 모델을 적용하였다. 연소모델은 혼합분율모델(mixture fraction combustion model)을 적용하였으며 복사열전달 방정식은 FVM법(Finite Volume Method)에 의해 해석하였다. 특히 FDS 4.0은 병렬처리알고리즘(Parallel processing algorithm)을 이용하여 해석하고자 하는 화재공간을 임의 개수의 영역으로 분할한 다음 각각의 영역을 개별 계산 노드에서 해석하게 되므로 계산시간을 단축시키고 많은 수의 계산격자를 처리할 수 있다. 본 연구에서 사용된 병렬시스템은 4대의 PC cluster로써 각각의 PC가 512 MB의 기억용량과 Pentium-IV 2GHz급 PC를 네트워크상에서 연결하였으며 사용된 API(Appli-

cation Programmable Interface)는MPICH(Message Passing Interface Chameleon) version 1.2.5를 이용하였다[10].

Fig. 3은 길이 19m, 폭 2.8m, 높이 2.8m 화재 발생 공간을 간략화 하여 구성한 60석 규모의 객차공간을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 객차의 전후방 출입구 및 천정부의 배기구는 개방된 상태로 가정하였으며 화원은 전체 열차공간의 가운데 좌석에서 초기 발화가 시작되는 것으로 가정하였다. 수치해석 Case는  $t^2$  화재 모드를 적용하고 화염전파를 고려하지 않은 조건에 대하여 좌석 및 벽면을 단일벽면으로 가정한 경우와 초기화원의 발열량은  $t^2$  화재 모드로 시작되고 화염전파를 고려하여 벽면은 steel, 좌석은 upholstery로 가정한 경우로 각각 나누어 수행되었다. 특히 화염전파를 고려하는 경우 좌석의 재질은 화재 거동 특성을 해석하는데 매우 중요한 변수이지만 현재 객차내 좌석에 대한 화재 물성에 대한 연구가 부족하고 객차마다 좌석의 재질이 다르기 때문에 일반적으로 잘 알려진 가구용 외장재인 upholstery로 가정하여 화염의 전파특성을 파악하였다. 사용된 upholstery 재질의 물성은 발화온도, 밀도, 최대 연소율, 증발열, 연소열등은 Table 2와 같다.

화염전파를 직접 해석하기 위해 인접 가연물과 좌우공기와의 복합열전달과 고체물질의 열해리 등을 직접 해석해야 하기 때문에 많은 계산 격자를 요구한다. 본 연구에 이용된 계산 격자는 약 1,200,000개로써 하나의 계산노드당 약 300,000개

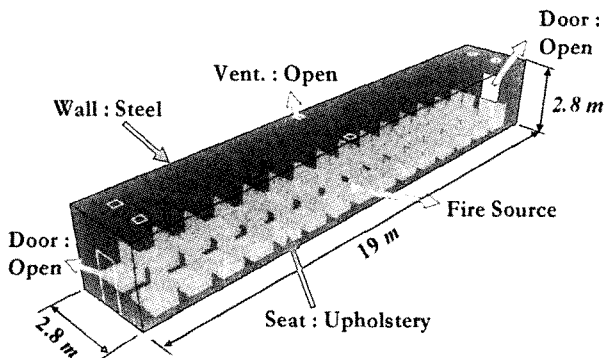


Fig. 3. Schematic of numerical simulations

Table 2. Details of numerical simulation.

	Case 1	Case 2
Fire growth model	$t^2$	$t^2$ + fire spread
Wall	adiabatic	Steel
Seat	adiabatic	Upholstery · Tig = 280°C · $\rho = 40 \text{ g/m}^3$ · $\dot{m}_{f, \max} = 0.03 \text{ kg/ms}^2$ · $\Delta H_{ev} = 1,500 \text{ kJ/kg}$ · $\Delta H_c = 30,000 \text{ kJ/kg}$

의 격자를 부여하여 4개의 영역으로 분리하여 계산을 수행하였다. 화재발생 이후 360 s까지 계산하는데 걸린 시간은 병렬 계산을 한 경우 약 32시간이 소요되었으며 단일 CPU를 이용한 경우에 비해 약 3정도 빠른 계산 속도를 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 시간에 따른 발열량 변화를 나타내고 있으며 화염전파로 인한 두 화재 시나리오에 대한 발열량 차이를 파악할 수 있다. 그림과 같이 화염전파를 고려한 경우 고정된 화원에서 화재 성장만을 제공한 case 1에 비해 5배 이상의 발열량 차이를 보여주고 있다. 초기 약 30 s 정도까지의 발열량은 서로 유사한 형태로 나타나고 있으나 이후 case 2의 경우 인접한 좌석으로 화염이 전파되고 급격한 발열량의 증가를 보이게 된다. 그러나 활발한 연소는 많은 양의 산소를 소모하게 되고 이로 인해 생성되는 연소가스의 증가율이 출입구를 통해 외부로 빠져나가는 배출율과 외부 공기의 유입률에 비해 상대적으로 크기 때문에 공간 내부의 산소 농도는 감소하게 되고 이러한 산소 결핍으로 인하여 발열량은 감소하게 된다. 이후 둔화된 연소는 연소가스의 생성을 감소시키고 출입구 및 배기구를 통하여 유입되는 산소의 공급률이 연소가스의 생성률보다 크게 될 경우 공간내부의 산소 농도는 다시 증가하여 발열량이 증가하게 된다. 이러한 화원에서 발생하는 연기의 생성율과 화재공간으로 유입되는 외부공기의 유입율에 의해 화재 공간의 발열량은 주기적인 형태를 띠게 되고 시간이 지남에 따라 준 정상상태에 도달하게 된다.  $t^2$  화재 모드와 화염전파 모드를 비교해 볼 때 화재 발생이후 30 s 이후부터 발열량 변화의 차이를 나타내게

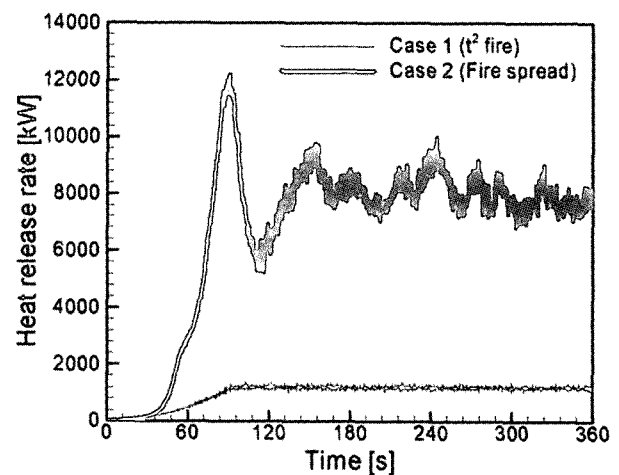


Fig. 4. Comparison of heat release rate for  $t^2$  fire model and fire spread mode

되고 시간에 따른 발열량 변화로부터 화재 발생후 약 100 s정도가 지나면 전실화재(flash over)로 전파되고 이때의 최대 발열량은 약 12 MW정도를 나타내고 있다. 이러한 수치 해석에서 예측된 최대 발열량은 일반적으로 지하철 차량에서 통상적으로 알려진 최대발열량인 10~15 MW 수준과 유사한 수준임을 보여준다.

Fig. 5는 화재 발생 초기 객차 길이방향으로 천정하 10cm 위치에서의 온도분포의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 화재발생 이후 30 s까지는 화염의 전파가 이루어지지 않고 초기에 설정된 화원에서 발생하는 발열량에 의해 공간내부의 온도장이 결정되기 때문에  $t^2$  화재 모드와 화염전파 모드가 유사한 값을 나타내고 있다. 그러나 화염이 전파된 후인 60 s의 온도분포는 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 화염 전파모델의 경우 인접 가연물로 화재가 전이된 부

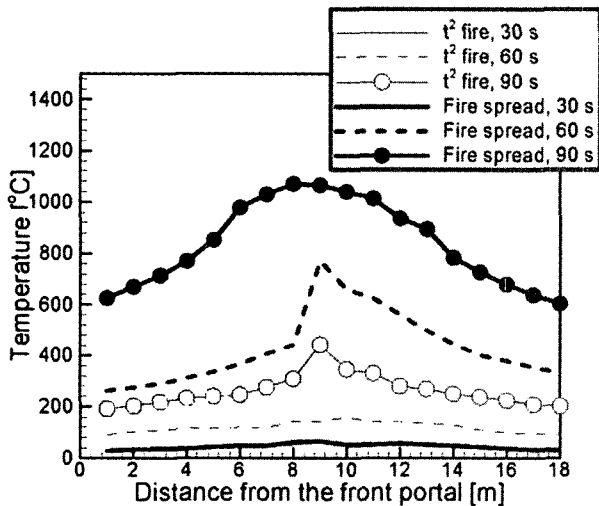


Fig. 5. Temperature distributions along the center of the ceiling

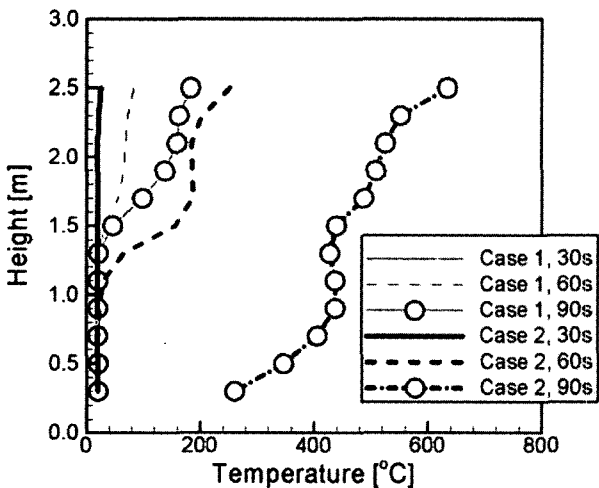


Fig. 6. Vertical temperature distribution at the front portal

분에서의 온도차가 화재가 전파되지 않은 곳에 비해 매우 크게 나타난다. 화재발생 90 s의 온도분포는  $t^2$  화재 모드인 경우 화원부에 국한되어 고온의 영역이 나타나지만 화염 전파 모델의 경우 전체 영역에 대하여 500°C 이상으로써 전실화재로의 전파가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 객차 전방 출입구에서 1m 떨어진 중앙 단면에서의 높이에 따른 온도 분포를 나타내고 있다.  $t^2$  화재 모드인 경우 화재 발생 90초 후의 최대 온도는 200°C를 넘지 않고 있다. 이러한 경우 연층의 온도가 상대적으로 낮기 때문에 전실화재로의 전파나 인접객차로의 화재 전파는 일어나지 않을 것으로 사료된다. 그러나 화염전파 모델이 고려된 경우 화재 발생 90 s 후의 수직 온도분포에서 보는바와 같이 높이 1.5m 이상에서는 화재실의 온도가 500°C를 초과하고 있으며 이러한 고온부에 의해 인접 객차로 화염의 전이가 이루어질 것으로 생각된다.

Fig. 7은 화재공간 내의 온도가 30°C와 227°C인 등온면을 화재 발생이후 60 s와 90 s에 대하여 나타내고 있다.  $t^2$  화재 성장 모델의 경우 화재 발생 60 s 이후에는 고온의 플럼이 화원의 부근에만 존재하지만 90 s 이후에는 천정의 대부분의 영역이 고온 가스층을 형성하게 된다. 연층의 높이는 화재 발생 90 s 이후에서부터 계산 종료시간인 360 s까지 거의 일정한 수준을 유지하였으며 특히 외부공기의 유입과 연기의 유출이 균형을 이루고 있는 중성높이(neutral height)는 1.5m 정도로 나타났다. 한편 화재 전파 모델이 고려된 경

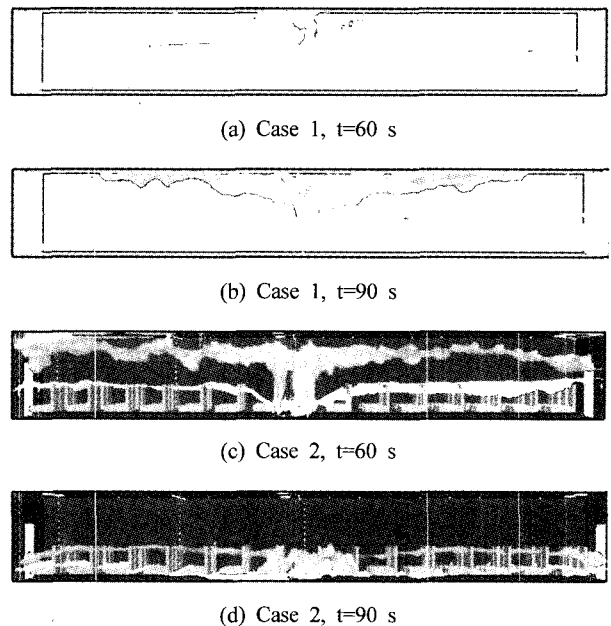


Fig. 7. Iso-temperature surface for  $t^2$  fire and fire spread model (red: 30°C, white : 227°C)

우 화재 발생 60 s 이후에 천정의 대부분의 영역이 고온 가스층으로 이루어지게 되며 화재 발생 후 약 90 s가 경과하면 고온의 가스층이 좌석높이 이하로 하강하고 연층은 바닥에 도달하게 된다. 이후 고온 가스층은 바닥에 도달하여 공간 내부의 잔존 산소 농도에 의해 화재 유동장과 연소가 지배된다. 따라서 객차 내부의 화재 전파는 매우 빠른 시간동안에 이루어지며 적절한 방화 대책을 마련하기 위해서는 조기 감지를 통한 승객의 대피와 함께 조기 화재 진압 시스템을 통하여 화재 발생 초기에 화재 억제가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

수치해석 결과에서 보는 바와 같이  $t^2$  화재 모델은 발열량 산정이 간단하며 계산용량이 적기 때문에 제공된 발열조건에 대하여 배연량을 산정하거나 연기거동을 해석하는데 있어서 적용이 용이한 장점이 있다. 그러나 실제 화재 발생으로 인한 화염 전파를 고려하지 못하기 때문에 화재실 내부의 공간적 특성 및 내부가연물의 영향을 파악할 수 없으므로 인하여 화재 발생으로 인한 피해를 과소 예측할 우려가 있다. 즉 화재 거동의 특성을 연기의 관점이 아니라 화염의 관점에서 볼때 다소 실제 화재 특성을 모사하는데 어려움이 있다. 한편 화염 전파 모델은 가연물에 대한 물성값을 파악해야 하며 모델 자체의 불확실성과 많은 계산 용량을 필요로 하기 때문에 적용에 어려움이 있으나 가연물이나 화재 공간의 특성을 모두 고려할 수 있기 때문에 실제 화재 거동을 보다 현실적으로 모사할 수 있다. 그러나 아직도 가연물의 물성, 연소 모델 및 화염 전파 모델의 정확도가 만족할 만한 수준에 이르지 못하고 있으며 향후 이러한 부분에 대하여 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 객차 내에서의 화재 특성을 수치해석을 통하여 파악하였으며 화재 성장 모델에 따른 영향을 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1)  $t^2$  화재 모델과 화염전파 모델 모두 화재 발생이후 30 s 이전에는 발열량의 차이가 거의 없지만 이후 주위 가연물로의 화염 전파가 이루어지면서 발열량은 큰 차이를 보이고 있다.
- (2) 화염전파 모델에 의해 계산된 객차내 최대 발열량은 약 12 MW정도이며 화원에서 발생하는 연기의 생성율과 화재공간으로 유입되는 외부공기의 유입율에 의해 화재공간의 발열량은 주기적인 형태를 띠게 되고 시간이 지남에 따라 준 정상상태에 도달하는 경향을 보인다.

- (3)  $t^2$  화재 모델은 주어진 발열조건에 대하여 연기거동이나 배연량을 산정하는데 있어서 유용하지만 실제 공간내부의 화재 성장 특성을 고려하지는 못하였다. 한편 화염 전파 모델에 가연물의 화염전파를 직접 계산할 수 있기 때문에 공간내 화재 성장을 보다 현실적으로 모사할 수 있다.
- (4) 화염 전파 모델이 보편적으로 적용되기 위해서는 보다 정확한 연소 모델 및 화염 전파 모델에 대한 지속적인 연구가 필요하며 가연물에 대한 화재 물성을 측정하여 DB화합으로써 현실적으로 타당한 화재 위험 예측이 가능할 것으로 생각된다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. Peacock, R.D., Jones, W.W. and Bukowski, R.D., "Verification of a Model of Fire and Smoke Transport", *Fire Safety Journal*, Vol.21, No.2, pp.89-129, 1993.
2. Reneke, P.A., Peatross, M.J., Jones, W.W., Beyler, C.L. and Richards, R., "Comparison of CFAST Predictions to USCG Real-Scale Fire Tests", *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.11, No.1, pp.43-689, 2001.
3. Cooper, L.Y., "Interaction of an Isolated Sprinkler Spray and a Two-Layer Compartment Fire Environment", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.38, No.4, pp.679-690, 1995.
4. McGrattan, K.B., Baum, H.R. and Rehm, R.G., "Large Eddy Simulation of Smoke Movement", *Fire Safety Journal*, Vol.30, No.2, pp.161-178, 1998.
5. Wang, Z., Jia, F., Galea, E.R., Patel, M.K. and Ewer, J., 2001, "Simulating one of the CIB W14 round robin rest rases Using the SMARTFIRE fire field model", *Fire Safety Journal*, Vol.36, No.7, pp.661-677, 2001.
6. "Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Area", *National Fire Codes*, Vol.10, NFPA 92B, 1991.
7. Sundstrom, B & Kaiser, I., "Full Scale Fire Testing of Upholstered Furniture", *Technical Report SP RAPP 1986:01*, ISSN 0280-2503, 1986.
8. "Fire Dynamics Simulator (Version 4.0) - Technical Reference Guide", *Fire Research Division, Building Fire Research Laboratory, NIST*, 2004.
9. "Fire Dynamics Simulator (Version 4.0) - User's Guide", *Fire Research Division, Building Fire Research Laboratory, NIST*, 2004.
10. David, A., William G. and Ewing, L., "Installation and User's Guide to MPICH, A Portable Implementation of MPI version 1.2.5", *Technical Report ANL / MCS - TM - ANL - 01*, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 2003.