

# 철도 차량 화재시 화재강도 예측을 위한 연구

## A Study on the Prediction of Fire Load in case of a Train Fire

양성진\*

장정훈\*\*

강찬용\*\*

Yang, Sung-Jin

Chang Jung-Hoon

Gang Chan-Yong

---

### ABSTRACT

Most of train fires which occur in usual cases do not grow up significantly on a large scale enough to bring about casualties and harmful damages. However, the consequence of some train fire accidents can be devastating disaster so that it would be even recorded in history in unusual cases. Accordingly, such a probability of fire disaster cannot be ignored in aspect of the railway safety assesment. A scale of injury and damage is very difficult to predict and analyze. Because it is depend on various factors, i.e. fire load, burning period, facilities, environment condition, and so on. Thus, a prediction of fire load could be understood as a one methodology to estimate railway safety assesment. The summation method which is one of them is used to evaluate the overall fire load by assuming that sum of heat release rate per unit area or mass of each composite material equals the total. However, since the train fire is classified into a compartment fire in under-ventilation condition. The summation method do not estimate a fire load completely.

In this journal, Various methods to predict fire load are introduced and evaluated. Especially the fire simulation tool FDS(Fire Dynamics Simulator)which is based on the CFD(Computational Fluid Dynamics) is introduced, too. Through the FDS simulation, numerical analyses for the fire load and flame spread are performed. Then, these results of the simulation are validated through the comparison study with the experimental data. Then, limitations and approximations including in simulation process are discussed. The future direction of research is proposed.

---

### 1. 서 론

스위스의 Gotthard-base 터널 화재와 대구지하철 방화사건과 같은 대형 화재가 일어남에 따라 철도차량 화재에 대한 관심이 고조되고 있다. 철도차량에서의 화재를 위험성 평가(risk assesment)의 측면에서 분석한다면 발생빈도도 매우 적을 뿐만 아니라 차량에서 발생하는 대부분의 화재는 강도가 크지 않으며 피해 규모가 미약한 수준에 그치는 경우가 대다수를 차지한다. 하지만 대량의 인명피해로 발전한 몇몇의 사건이 기록되어 있는 만큼 이러한 대형 재난의 가능성을 완전히 무시할 수는 없는 실정이다. 최근 들어 철도차량의 화재 안전에 대한 관심이 높아짐에 따라 화재의 강도를 진단하려는 시도와 연구는 활발하게 일어나고 있다. 철도차량 화재의 피해 규모와 그 심각한 정도는 차량의 화재 강도 및 지속 시간, 기타 제반 시설과 주변 상황, 그리고 환경 조건에 따라서 양상이 달라지기 때문에 분석하기 매우 복잡한 현상이며, 화재 강도를 예측한다고 해서 그 피해규모를 정확히 추정하기는 사실상 어렵다. 따라서 본 논문의 주

---

\* 현대로템, 시스템기술팀, 비회원

E-mail : sjyang@hyundai-rotem.co.kr

TEL : (031)460-1311 FAX : (031)460-1780

\*\* 현대로템, 시스템기술팀, 비회원

관심대상이 되는 철도차량 화재 시 화재 강도를 예측하는 것은 안전성 평가를 위한 하나의 방법론으로서 이해해야 한다.

화재 강도를 예측하기 위한 시도로써 여러 가지 방법론들이 발달하였는데, 1975년 Hettinger, et al.[1]의 Tradition method를 시작으로 Peacock과 Braun[1]의 Summation method가 학계에 소개되었고, 1991년 Hettinger와 Barnett은 발전된 형태인 Post-flashover model method[2]를 발표하는 등 물리적인 모델링에 근거한 방법론이 지속적으로 학계에 소개되고 있는 실정이다. 또한 최근에는 전산유체역학을 토대로 하는 수치해석 기법이 화재강도 예측을 위한 한 가지 방법론으로 주목받고 있는 상황이다. 고전적인 방법에서 최근의 수치해석 기법에 이르기까지 다양한 방식들이 논의 되면서 많은 발달이 있었지만 뚜렷한 성과와 함께 한계와 개선되어야 할 점들도 나타난 것이 사실이다.

본 논문에서는 이러한 철도 차량 화재 시 화재 강도를 예측하는 여러 가지 방식에 대하여 소개하고 각각의 한계와 문제점을 진단했으며, 특히 전산유체역학을 토대로 하는 화재 시뮬레이션 툴 중 하나인 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 통해 내장재 각각의 개별 열적 물성치(thermal property)를 기반으로 전체적인 화재 양상과 특징을 모사하는 방법론을 소개하고, 활용가능성을 모색하였다. 하지만 기존의 예측 방법과 같이 화재시뮬레이션을 통한 차량 화재 강도 예측 또한 한계 및 문제점을 내포하고 있음을 진단하였고, 더불어 향후 진행할 연구방향을 함께 제시하였다.

## 2. 화재강도 예측을 위한 방법론

위에서 언급했던 여러 가지 물리적 모델들 중 1976년 그 이론적 토대가 마련되고 이후 수차례 수정을 통해 발전한 Summation Method는 차량 전체의 화재강도를 예측하기 위해서 각 재질의 열방출율(HRR)을 근거로 해야 한다는 가정에서 출발하여 많은 관심을 불러일으켰다. 이러한 Summation method에 착안하여 현재 철도차량의 화재강도를 진단하는데 큰 칼로리미터에서 얻어진 각 시편의 열 특성 데이터를 이용할 수 있다. 단위면적당 열방출률(Heat release rate per unit area,  $\text{kW/m}^2$ ) 혹은 단위질량당 화재강도(Fire load per unit mass)중 어떠한 값을 이용하는가에 따라서 조금씩 다른 의미를 지니고 있는데, 본 장에서는 이와 같이 일반적으로 쓰이는 철도차량의 화재강도(Fire load)를 예측하는 방법을 소개하고 각각의 의미와 한계점에 대해서 진단해 보고자 한다.

본 연구에서 수행한 큰 칼로리미터의 시험에 다음과 같은 각 재질의 시편이 사용되었다. 내장재(phenol panel), 시트커버(wool fabric), 시트쿠션(neoprene foam), 시트프레임(phenol plate), 천정패널(painted aluminum plate), 바닥재(rubber), 단열재(glass wool)가 사용되었으며, 이는 이후에 소개될 화재강도를 예측하는 각 방법론과 시뮬레이션에 동일하게 적용되었다.

### 2.1 Calorific Value Based - Summation Method

큰 칼로리미터 시험 장비는 관심 대상이 되는 시편( $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ )에 일정한 크기의 열 유속(heat flux)을 가하게 되는데, 시편은 열분해(pyrolysis) 과정을 겪게 되며 연소성 가스(fuel gas)를 생성한다. 이것은 곧 연소반응(combustion)을 일으켜 외부로 연소열(heat of combustion)을 방출하게 되고, 이러한 화재 현상이 적절한 조건에서 반복적으로 일어나게 된다. 이와 같은 큰 칼로리미터 시험장비에 의해 각각의 시편을 대상으로 질량소모량(mass loss)을 구할 수 있으며, 이를 통해 단위질량당 화재강도( $\text{kJ/kg}$ )를 구할 수 있다. 시편들 개개의 단위질량당 화재강도( $\text{kJ/kg}$ )을 이용하여, 철도 차량에 쓰인 각 재질의 개별적 중량을 곱해서, 그 차량의 화재강도를 진단하는 방식이다. 여기서, 단위질량당 화재강도( $\text{kJ/kg}$ )를 구하는 과정을 매우 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. 시편의 초기질량과 시험후의 잔류 질량은 쉽게 측정 가능하다. 이 두 값의 차이는 대상 시편이 열분해를 거쳐서 연소성 가스 물질로 전환될 수 있는 양을 나타낸다. 따라서 이 단위 질량당 연소열은 관심 시편이 열분해 과정을 거쳐 모두 연소하여 잔류물질이 하나도 남지 않는 상황을 가정한다.

본 논문에서는 전동차 차량을 대상으로 각 차량 내의 재질별로 큰 칼로리미터 시험을 수행하였고, 그 결과 데이터[9]를 참고하여 재질별로 개별 화재강도(MJ)를 합한 차량전체의 화재강도(13,753 MJ)를 예측

하였다. 13,753 MJ라는 값은 차량의 재질이 모두 잔류물질을 하나도 남기지 않는 수준의 이상적인 열분해 과정을 거친 후 연소반응을 통해서 방출하게 되는 이론적인 에너지 방출을 뜻한다. 이러한 논리에 따르면, 화재 후 열분해 반응에 참여했던 모든 재질은 형태도 없이 사라져야 하는 상황을 가정해야 한다. 따라서 이러한 방식(Calorific Value Based - Summation Method)을 이용하여 산출한 값이 대상 차량의 화재 강도를 나타낸다는 것은 상당한 오류를 내포한 가정이라는 것을 알 수 있다.

## 2.2 Calorific Content Based - Summation Method

이 방식은 상기 언급한 방식과 거의 모든 과정이 동일하지만, 시편의 초기 질량과 잔류질량 그 차이를 이용하여 단위질량당 화재강도(kJ/kg)를 구하는 부분을 수정하였다. 대신 시편의 초기 질량만을 이용함으로써 인해서, 해당 시편의 질량 중 일부가 잔류물질로 남을 수 있다는 상황을 고려할 수 있다. 따라서 열분해에 과정을 겪는 각 재질의 시편들은 잔류물질 만큼의 비율을 제외한 부분이 열분해에 참여하는 것으로 간주되어, 상기 방식보다 상대적으로 적은 단위질량당 화재강도(kJ/kg)를 나타나게 된다. 때문에 이러한 방식을 이용하여 계산한 전체 차량에 대한 화재강도를 고찰하면, 차량을 구성하고 있는 각 재질은 초기질량에서 잔류물질로 남겨진 질량 비 만큼을 제외하고 나머지가 모두 열분해 과정에 참여하게 되고 화재강도에 기여하게 된다. 이러한 방식으로 차량의 전체 화재강도를 예측하는 방식을 (Calorific Content Based - Summation Method)이라 칭하며, 동일한 시편을 사용한 결과 5,039MJ의 값이 예측되었다. 이 값은 앞서 구한 (Calorific Value Based - Summation Method)에 비해 그 값이 13,753MJ에서 5,039MJ로 대폭 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 재질 중에 열분해에 참여하지 못하고 잔류하는 물질을 고려했기 때문이다. 하지만, 이러한 방식(Calorific Content Based - Summation Method) 또한 차량의 구성 재질 모두가 화원에 상관없이 동일한 이상적인 열분해 과정을 겪는 것으로 가정하여 실제적인 화재강도를 표현했다고 받아들이기에는 상당히 무리가 있다. 다음에 소개될 방식과 더불어 한계점에 대해서 고찰해 보고자 한다.

## 2.3 Averaged HRR Based - Summation Method

큰 칼로리미터 시험을 통해 각 시편의 재질별로 소모하는 산소량을 근거로 단위면적당 열방출율( $\text{kW/m}^2$ )을 계산할 수가 있으며, 이렇게 얻어진 시편들의 열적특성들과 열방출량(HRR)은 차량 전체에 그대로 적용되어 유동장으로 노출된 재료의 모든 면적들을 곱하여 더해 준다면, 그 해당 차량의 화재 시 잠재적인 화재강도를 산출하게 된다는 것이 이론의 핵심이다. 자칫 합리적인 것처럼 보이는 이 이론은 앞서 언급한 두 가지 방식과 마찬가지로 치명적인 한계를 지니고 있다.

첫 째 큰 칼로리미터에서 시편에 가해진 열 유속(heat flux)이 실제 차량 화재 시 발생하게 되는 점화원(ignition source)과는 매우 다를 수 있다는 것을 간과한 것이다. 차량의 내부 재질들은 큰 칼로리미터의 시험에서처럼 정돈된 일정한 열 유속(heat flux)에서 노출될 때와 실제 화재 시에 겪게 되는 급격한 화재발달 상황에서 서로 다른 열반응을 보일 수 있으며, 화재발달 시 가장 핵심이 되는 열분해(pyrolysis)과정의 양상이 다르게 나타날 수 있다는 것이 상기 Summation method을 기본으로 하는 방식에서는 공통적으로 고려되지 않았다.

두 번째로 철도차량의 화재는 기본적으로 닫힌 공간에서의 화재 현상이다. 따라서 환기 조건이 큰 칼로리미터 시험 때의 충분한 환기 조건과는 그 상황이 전혀 다를 수 있으며, 이러한 충분히 못한 환기조건은 화재의 지속적이고 꾸준한 발달을 저해하는 방향으로 작용할 것이지만, Summation method를 기본으로 하는 방식에서는 공통적으로 환기조건이 차량전체의 화재강도를 예측하는데 전혀 고려되지 않았다.

이와 같이 그 한계점이 명백함에도 불구하고 확실한 물리적 모델을 제시 하였다는 점에 대해서 많은 의의를 둘 수 있으며, 본 논문에서는 전동차 모델을 대상으로 얻은 큰 칼로리미터 데이터[9]를 바탕으로 Averaged HRR Based - Summation Method를 이용하여 차량의 화재강도를 계산하였다. 큰 칼로리미터를 통한 각 재질의 단위면적당 열방출량( $\text{kW/m}^2$ )과 철도차량 한량에 들어간 총 재질의 면적을 곱하고 합산하여 1,753kW의 열방출률을 산출했으며, 그것에 총 연소시간을 곱하여 MJ 단위로 환산하였다. 결과적으로 전체 화재강도 예측치는 7,615MJ가 된다. 앞서 설명한 방식(Calorific Content Based -

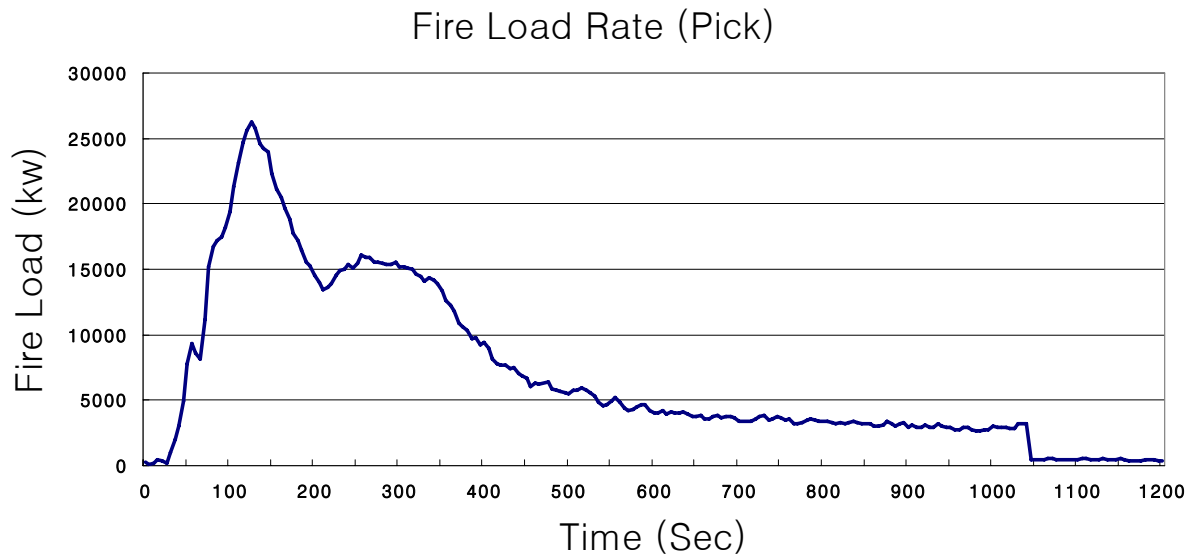


Fig. 1 Fire load curve of entire car in HRR based Method

Summation Method)의 결과치인 5,039MJ 과는 약 33%정도의 오차를 나타내는데, 이 오차에 대한 설명은 차 후 연구에서 다를 예정이다.

각 재질의 시간당 열방출량(HRR) 곡선을 같은 시간대 별로 합산하여 전체 차량의 시간에 따른 열방출량(HRR)을 예측할 수 있으며 Fig. 1에 그 결과를 나타내었다. 그래프를 통해서도 화재발생 후 약 140초 후에 25MW에 육박하는 최대치 열방출량이 예상된다. 하지만, 이 또한 모든 차량의 재질이 동시에 같은 열 유속(Heat flux)하에서 나타나는 이상적인 열분해 반응을 기본 전제로 하고 있기 때문에, 여기서 나타나는 최고 열방출량(HRR) 값도 실제적인 의미는 상당히 적다고 할 수 있다.

### 3. 화재강도 예측을 위한 수치해석적 방법

전산유체역학 (CFD, Computational Fluid Dynamics)의 발전으로 복잡한 유동 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고 설계를 개선하는 사례들이 많이 보고되어 있으며, 최근 화재 문제도 이러한 수치 해석 기법을 이용하여 해석하고 진단하려는 시도가 진행되고 있다. 본 연구에서는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)가 개발한 공개 해석 툴인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 전동차 화재 상황을 재현했으며 그 결과를 진단하여 화재해석에서의 수치해석기법이 갖는 그 한계점과 개선될 사항을 지적하였다. 앞으로의 연구방향에 대해서 간단히 언급하였다.

#### 3.1 해석대상과 격자 생성

자사가 제작한 전동차를 해석 격자에 반영하였으며, 그 모습은 Fig. 2와 같다. 17.2m×2.8m×2.2m의 열차 크기의 해석 도메인을 고려하였는데, 정사각형 모양의 단위격자 하나의 크기는 Chiam[1]의 논문과 해석 시간 등을 고려하여 0.1m×0.1m×0.1m로 정하였으며, 총 259200개의 유동격자를 사용하였다. 격자 생성에 사용된 모든 데이터는 자사의 설계도면을 사용하여 신뢰성을 확보하였으며, 그 전체적인 형상은 Fig. 2에 도시되어 있다. Fig. 2(a)는 해석에 사용된 전동차의 내부 모습을 나타내며, 통로 중간에 노란 구체로 표시되어 있는 것은 해석 후 온도와 열방출량(HRR) 등의 데이터를 얻기 위한 포인트 위치를 표시한다. Fig. 2(b)는 전동차 내부의 좌석 배치를 나타내며, 열차의 승객출입문(side door)와 창문은 Fig. 2(c)와 같이 배치되어 있다.

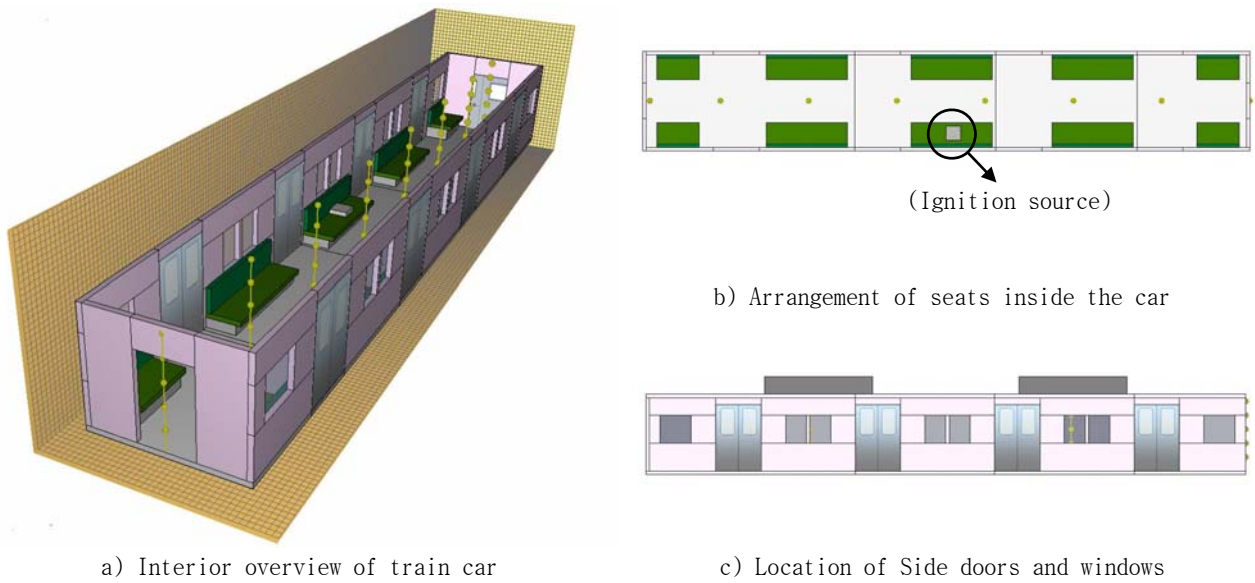


Fig. 2 Computational domain of metro EMU train car

### 3.2 해석 조건 및 화재 시나리오

문헌[1]에 따르면 화재의 발단이 되는 화원(ignition source)이 화재가 충분히 성장하고 전파되도록 하기 위해서 보통 150kW~200kW의 크기를 고려한다. 본 연구에서는 좀 더 현실성 있는 화원 설정을 위해 T. Barden[3]의 문헌자료에 소개된 2kg의 신문지 뭉치가 연소하는 것을 고려하여 Fig. 3과 같이 좌석위에 신문지 2kg이 연소되는 상황을 가정하였으며, 그 열방출량(HRR)은 Fig. 4에 도시된 바와 같다. 전동차에서의 화원의 위치는 Fig. 2(b)에 나타내었다.

전동차의 모든 승객출입문 도어(side door)와 창문은 닫혀 있는 것을 가정하였으며, 열차의 제일 선두부의 화재를 가정하여 단부문(end door) 한쪽만 개방되어 있는 것으로 설정하였다. 전동차의 내장재와 각 재료들의 열적 물성치(thermal property)와 해석에 필요한 각 변수들을 알기 위해서 콘 칼로리미터를 이용하였으며, 각 시편의 시험데이터[9]를 토대로 연소열과 밀도, 열분해 시 시편의 질량감소량 등을 알 수 있었다. 또한 열전도도, 비열, 열분해율과 같은 변수는 참고문헌[4-8]을 통해 가장 근사한 값을 입력하였다. 이와 같은 조건하에서 총 1200초 동안의 화재 상황을 시뮬레이션 하였다.

### 3.3 해석 방법

수치해석을 수행함에 있어서 공개 코드인 FDS(Ver.5)를 사용하였으며, Intel Xeon 3.0 GHz 2CPU 워크

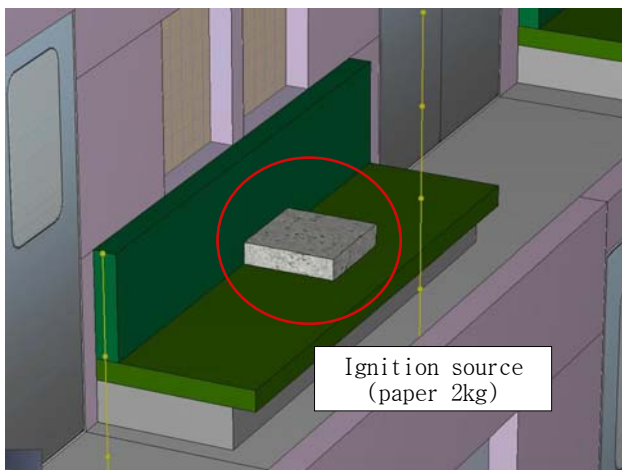


Fig. 3 Location of ignition source

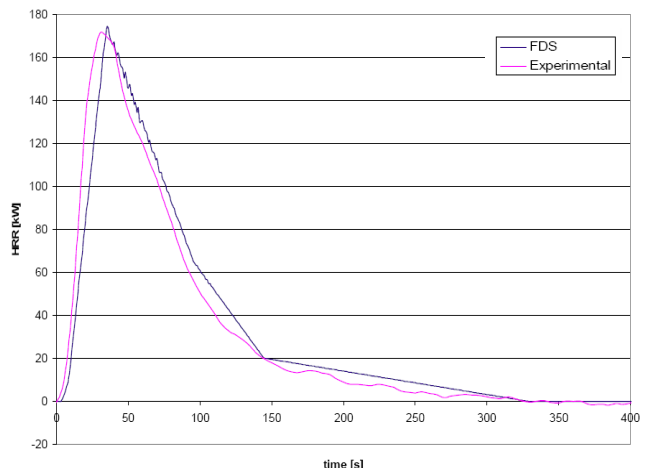


Fig. 4 HRR curve of ignition source

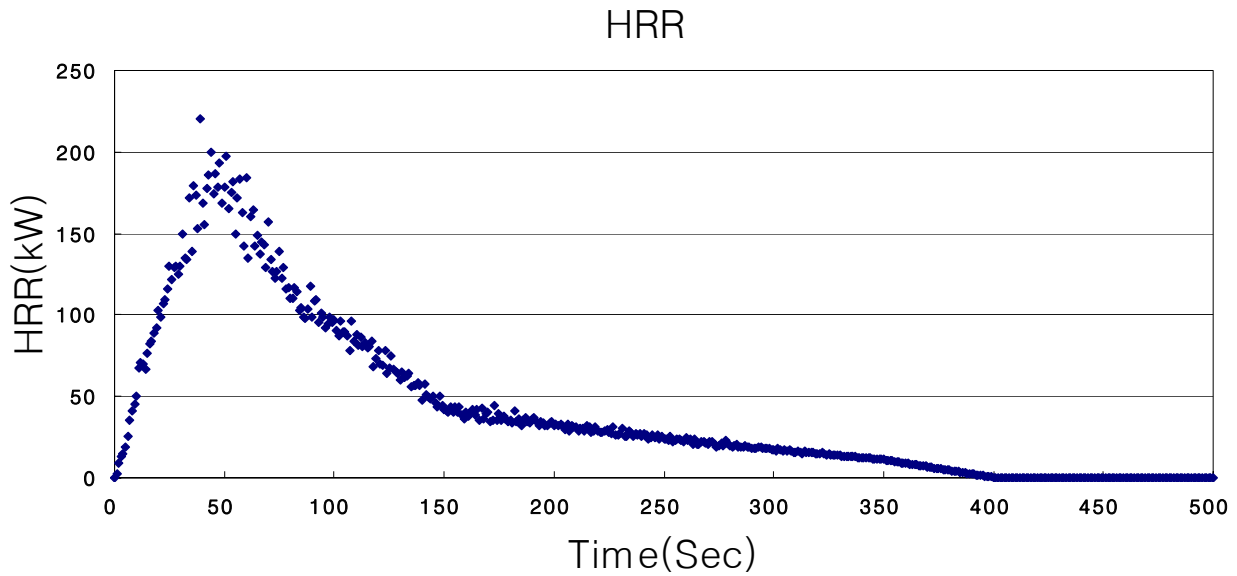


Fig. 5 Heat Release Rate as the result of fire simulation

스테이션을 사용하였다. 유동장을 풀기 위해 사용된 지배 방정식은 기본적으로 Navier-Stoke 방정식이며, LES(Large Eddy Simulation) 난류 모델을 사용하였고, 화재 시 열반응을 표현하기 위해 solid material의 Pyrolysis Model을 사용하였다.

#### 4. 결과 및 토의

해석 결과 화원으로 사용된 2kg의 신문지 뭉치는 좌석을 전부 태울 만큼의 열분해 에너지를 주지 못하는 것으로 나타났다. Fig. 5은 화재 지속 시간 동안의 열방출량(HRR)을 그래프로 표현한 것이다. 곡선의 형태가 화원(ignition source)과 매우 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이는 화원이 나타내는 열방출량(HRR) 곡선이 차량 화재 시 총 열방출량(HRR)에 직접적으로 매우 큰 영향을 미친다는 것을 의미하며, Fig. 4와 Fig. 5의 그래프를 비교해보면, 같은 시간대의 열방출량(HRR) 값이 Fig. 5가 더 큰 것을 알 수 있다. 화원의 열량이 좌석의 재질에 열분해 반응을 일으키지만, 그 정도가 크지 못하기 때문에 좌석 전체로 화염이 옮겨 붙을 만큼 큰 화재로 성장하지 못했다는 것을 나타낸다. Fig. 6에는 각 시간

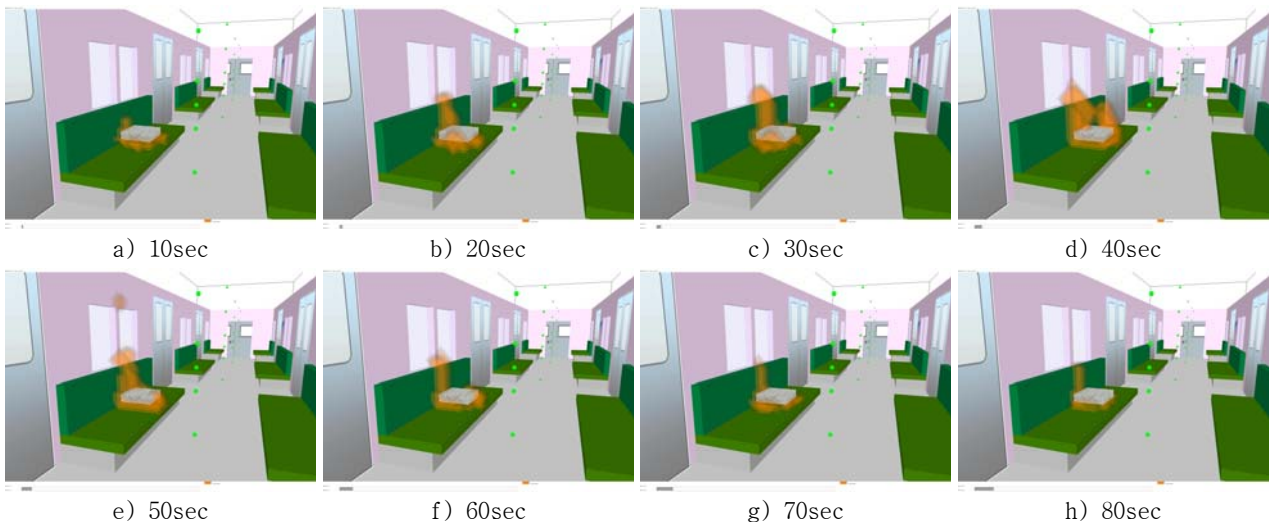


Fig. 6 Fire spreading in fire simulation

## Temp. VS Time

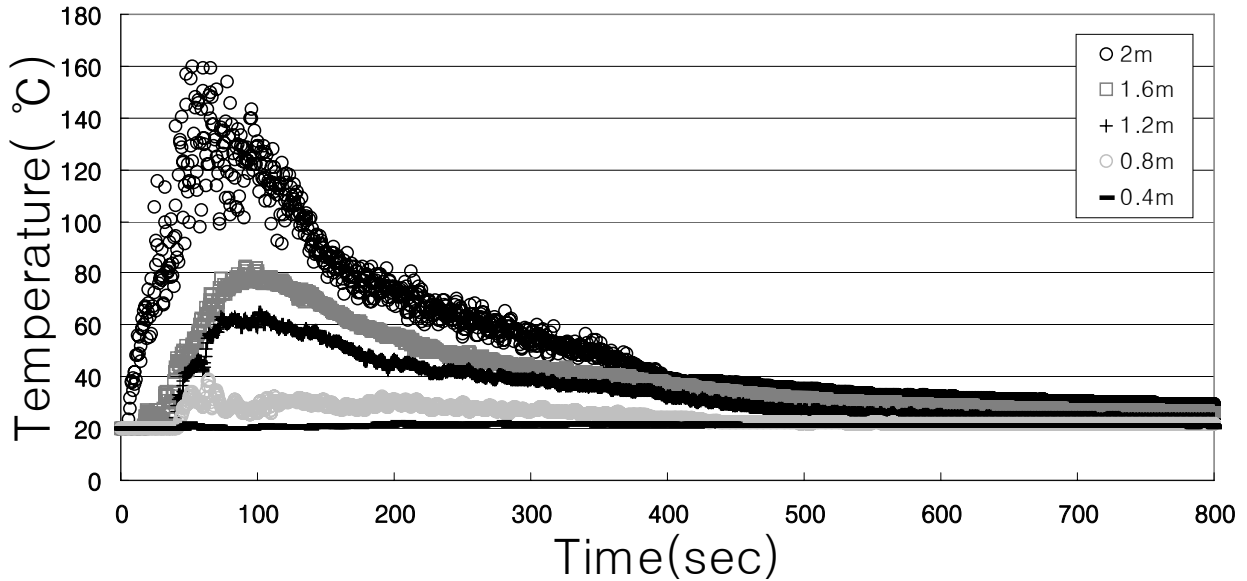


Fig. 7 Temperature distribution in the vicinity of ignition source

대 별로 화원 주위의 좌석에 불이 붙어 화염이 성장하고 차츰 사멸되는 것을 볼 수 있다. 화재 시작 후 30초를 이후로 내장재 까지 화염이 전파되는 것을 볼 수 있으며, 이후 창문의 상단까지 화재 전파가 일어나는 것이 관찰되지만 화원 주변의 좌석과 인근 내장재의 열분해에 필요한 지속적인 열량 공급이 원활하게 진행되지 못함에 따라서 50초 이후로 화재는 성장을 멈추고 소멸해가는 것을 볼 수 있다. 화재 초기에 내장재와 좌석 인근의 화재 규모가 매우 급격히 성장하여, 화원에서 공급되는 열량을 제외하더라도 충분히 인근 재질의 열분해 과정에 필요한 지속적인 열량공급이 가능하다면, 화재는 성장할 수 있지만, 2kg의 신문지로 대표되는 화원의 크기에서는 차량 전체로의 화재 발달은 일어나지 않는 것으로 사료된다. 이는 화원의 크기와 내장재의 열적 특성이 차량의 화재 발달에 큰 영향을 미치는 변수로 작용한다는 것을 나타내는 하나의 예로써 생각할 수 있다. Fig. 7의 그래프는 화원 근처에서의 높이별 온도 값을 나타낸다. 열 부력의 영향으로 인해 높은 곳에서 상대적으로 높은 온도 범위가 나타나는 것을 알 수 있으며, 좌석보다도 낮은 높이에서는 초기온도인 20°C 근처의 범위를 보였다.

### 5. 결 론

본 논문을 통해서 몇 가지의 물리적 방법론과 최근의 수치해석적 기법을 통한 화재 강도 예측에 대해서 고찰하였고 각각의 한계성에 대해서 진단하였다. 특히, Summation method를 기반으로 하는 일반적인 화재강도 예측 방법을 통해 얻은 화재강도는 모든 재료가 충분한 환기조건하에서 이상적인 열분해 반응을 모두 완료 했을 때 방출되는 에너지의 총 합이라는 것을 볼 때, 이를 해당 차량의 화재강도라 여기는 것은 상당히 위험한 접근이라는 것을 알 수 있다. 이 방식에서는 초기 화원의 유무와 성질이 전혀 화재강도 예측에 반영이 되지 않기 때문이다.

이에 반해 수치해석적 기법은 초기 화원의 크기가 해당 내장재의 열분해를 어떠한 정도로 활성화 시키는 가를 결정짓고 이는 화재 성장에 매우 중요한 변수로 자리매김한다. 또한 그렇기 때문에 열분해 반응을 느리게 억제하고 기타 열적 물성치를 조절한 여러 난연제와 불연제를 해석에 이용할 경우 높은 화원이라 하더라도 화재 전파가 원활하지 않게 되어 큰 화재로 성장하는 것을 방지하는 효과를 예측 및 진단할 수 있다. 이런 상황에서 화재 강도는 화원의 열방출량과 크게 다르지 않으며, 따라서 차량



자체의 화재강도만을 고려한다면 매우 적은 값이 나타나게 되고, 이를 차량의 화재강도로 볼 것이냐에 대한 질문은 또 다른 문제를 야기한다. 이밖에도 현재 화재 해석 툴이 갖는 몇 가지 난점은 여전히 화재강도를 예측하는데 있어서 상당한 불확실성을 기본전제로 해야 한다.

첫째 본 연구에 이용한 해석 툴인 FDS는 기본적으로 충분한 환기 조건에서의 화재 성장과 연소반응을 기본 알고리즘으로 다루고 있다. 따라서 에너지 방정식에 기초하여 열분해에 필요한 에너지만 전달 받으면 재료의 열분해 반응은 환기조건에 영향 받지 않고 활성화 될 수 있다는 것이다. 둘째 FDS가 갖는 격자 생성 방식과 그에 의한 난류 표현방식을 문제 삼을 수 있는데, 장방형 격자(rectilinear grid)는 복잡한 형상과 곡면을 갖는 물체를 표현하는데 있어서 상당한 제약으로 작용하고 있으며, 이를 통해 단순화 시킨 유동장을 바탕으로 굉장히 복잡한 유동현상을 보이게 되는 화재를 표현한다는 것은 불확실성을 기본 전제로 하고 있다는 뜻이 된다. 마지막으로 실제적인 자연현상에서는 각 재료의 열분해 과정은 몇 단계를 거치는 매우 복잡한 과정이다. 또한 온도 범위에 따라서 그 열분해 속도와 반응물은 달라 질 수 있으며, 그 외에 각종 열적 물성치(thermal property)들도 수시로 변화하게 된다. 이러한 가변적인 재료의 특성들을 획일화에서 적용할 수 밖에 없으며, 특히 화재 성장에 핵심이 되는 열분해 반응은 알고리즘적인 한계를 내포하고 있으며, 연소반응 또한 하나의 반응식으로 모델 전체의 반응을 대신한다는 점에서 많은 가정을 포함하고 있다.

수치해석적 기법은 최근에 컴퓨터의 고성능화와 알고리즘 발달에 힘입어 빠른 속도로 개선되어 가고 발전하고 있는 분야이다. 본 논문을 통해 물리적 방법론과 비교하여 그 장점 및 한계를 명시하는 계기가 되었으며 앞으로 여러 시험결과들과의 비교를 통해서 알고리즘의 정확성을 검증하고 해석 기법을 다듬는 작업이 필요하리라 사료된다. 또한 재질의 단위질량당 열방출량(kJ/kg)을 근거로 구한 전체 화재강도와 단위면적당 열방출률(kW/m<sup>2</sup>)을 근거로 예측한 전체 화재강도에서 나타난 오차는 차후 연구에서 다뤄보고자 한다.

## 참고문헌

1. B-H. Chiam, et al(2005), "Numerical Simulation of a Metro Train Fire", Thesis for the degree of master course, Univ. of Canterbury.
2. R-D. Peacock and E. Braun(1999), "Fire Safety of Passenger Trains; Phase I: Material Evaluation (Cone Calorimeter)." HISTIR 6132, NIST.
3. T. Barden et al(2005), "Train Fire Modeling in Fire Dynamic Simulator, Report of Worcester Polytechnic Institute.
4. S-H. Lee, et al(2006), "Material Property Estimation Method Using a Thermoplastic Pyrolysis Model", Thesis for the degree of master course, Worcester Polytechnic Institute.
5. K. McGrattan, et al(2006), "Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) User's Guide", NIST.
6. K. McGrattan, et al(2006), "Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) Technical Reference Guide", NIST.
7. J. Philip, et al(2005), "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(3rd edit.)", SFPE.
8. D. Madrzykowski, et al(2003), "Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations", NIST.
9. "전동차 내장재 시편 발열량시험 결과"
10. <http://www.matweb.com/>
11. <http://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser.html>