

# 환기량 조건이 열차 화재 성장에 미치는 영향성에 대한 FDS 화재 시뮬레이션

## Numerical study of the Effect of Ventilation Condition on Rolling Stock Fire Growth through the FDS Simulation

양성진†  
Sung-Jin Yang

이창덕\*  
Chang-Deok Lee

오지은\*\*  
Ji-Eun Oh

강찬용\*\*\*  
Chan-Yong Kang

### ABSTRACT

To predict and analyze the rolling stock's fire growth is considered not only important factor in estimating hazard analysis of rolling stock, but also a primary factor in aspect of a rail load facility. Because it's could be regarded as a ignition source in risk assesment for the facility i.e. tunnel and station. However, currently, standardized method to predict and analyze the fire growth has not been completed yet. it is due to the fact that fire growth is not only depended on thermal property of interior materials, but also is affected dominantly by various factors such as ignition source (characterized by location, duration, and intensity), train running condition and in/exterior ventilation condition. Especially, ventilation condition is one of the most effective factor to affect fire growth in compartment space as noticed by under-ventilation fire condition. In this study, the effect of each ventilation condition on fire growth and load were examined through the numerical method through FDS (Fire Dynamics Simulator).

### 1. 서 론

철도차량의 화재규모를 예측 및 분석하는 것은 규격(Standard)이나, 절차서(Test procedure)상 명시된 화재 시나리오에 따라 해당 화원(Ignition source)을 철도차량의 내장재에 가해 주었을 때, 화재 성장 패턴 및 플래시오버 등의 발생 유무를 진단하고, 산출된 열방출량(Heat Release Rate)을 토대로 철도차량의 화재강도를 평가하는 총 열에너지량(Total heat release) 혹은 열 방출량 곡선(Heat release rate curve)을 산출하는 작업이라고 볼 수 있다. 이러한 작업은 철도 차량 자체의 위험도 평가(Risk assesment) 측면에서도 빈번히 요구되지만, 터널과 역사 등 철도차량을 직접 운행하는 시설을 대상으로 하는 위험도 평가(Risk assesment)의 절차상 화재 시나리오 중 화원을 결정하는 작업과 직접적으로 연관되기 때문에 그 중요성이 증대된다.

이러한 중요도 관점에서 화재규모를 예측하기 위한 시도로써 여러 가지 방법론들이 도출되었다. 1975년 Hettinger, et al.[1]의 Tradition method를 출발 배경으로 Peacock과 Braun[1]의 Summation method, 그리고 1991년 Hettinger와 Barnett의 보다 발전된 형태인 Post-플래시오버(Flashover) model[2]등 다양한 수계산 모델링을 실례로 들 수 있으며, 전산유체역학(Computational analysis dynamics)으로 분류되는 수치해석 기법이 화재규모 예측을 위한 한 가지 방법론으로 주목받고 있는 상황이다. 고전적인 방법에서 최근의 수치해석 기법에 이르기까지 다양한 방식들이 논의 되면서 많은 성

† 책임저자 : 비회원, 현대로템 기술연구소, 시스템기술팀, 연구원  
E-mail : sjyang@hyudnai-rotem.co.kr  
TEL : (031)596-9328 FAX : (031)596-9759  
\* 비회원, 현대로템 기술연구소, 시스템기술팀, 주임연구원  
\*\* 비회원, 현대로템 기술연구소, 시스템기술팀, 선임연구원  
\*\*\* 비회원, 현대로템 기술연구소, 시스템기술팀, 수석연구원

과가 있었지만 뚜렷한 성과와 함께 한계와 개선되어야 할 점들도 나타난 것이 사실이다[3]. 이렇듯, 화재규모를 정량적으로 예측할 수 있는 정형화된 방법론은 현재 발달 단계에 있다고 볼 수 있다.

철도차량의 화재규모를 예측하는 정형화된 방법론을 도출하는 것이 난제인 이유는 철도차량의 화재 규모가 해당 차량 내장재를 구성하는 각 재질들의 화재안전 성능에만 의존하는 것이 아니라, 화재를 일으키는 발화원의 강도와 위치, 지속시간 그리고 열차의 운행조건과 열차 내외의 화기 조건 등 고려 가능한 수많은 경계조건과 환경 변수에 따라서 그 양상이 달라지는 복잡한 현상이기 때문이다[1,4]. 화재 규모에 영향을 미치는 여러 인자들 중 특히 ‘환기량(Ventilation condition)’은 화재의 성장에 가장 지배적으로 영향을 미치는 인자 중 하나이다[4]. 대부분의 객차 화재에서의 화재 양상은 폐구간에서의 환기 지배형 화재(Under ventilated fire condition) 특성을 보이기 때문에 환기 조건에 따른 환기량이 철도차량 화재 성장에 미치는 영향을 규명하는 것은 매우 중요한 문제이다.

본 논문에서는 국내의 일반적인 철도차량을 대상으로, 화재상황에서 고려할 수 있는 열차 내 각기 다른 환기량 조건이 열차의 화재 성장과 규모에 어떠한 영향을 미치는지 조명하고자 하였고 이를 FDS(Fire Dynamics Simulator) 화재시뮬레이션 툴을 이용한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 기법을 통해 분석하였다. 선행 연구[5,6]에서 ISO 5660규격[5]에 의거한 콘칼로리미터 시험을 통해 열방출량 곡선을 산출하는 과정을 FDS(Fire Dynamics Simulator) 열분해 모델(Pyrolysis model)을 통해 모사했으며, 이를 통해 단품 단위의 물질에 대해서 화재 시뮬레이션 기법을 적용한 바 있다. 또한, 열중량분석(Thermal Gravimetric Analysis) 시험을 통해 해당 내장재의 중합체 열분해 양상을 분석하였으며, 그 추이를 선형화(Linear interpolation)과정을 통해 아레니우스 1차 열분해 방정식으로 근사화 시켜, 연소 과정과 화재 성장에 미치는 영향성을 수치해석적 방법을 통해 규명하였다[6]. 본 논문에서는 선행연구에서 얻어진 방법론을 통하여 FDS(Fire Dynamics Simulator) 입력값으로 요구되는 내장재 각 재질의 물성치를 산출하였고 이를 해석에 반영하였다.

## 2. 철도차량 내장재 구성

본 연구에서는 국내의 일반적인 철도차량을 해석 대상으로 하며, 주 관심 대상이 되는 내장재는 철도차량 안전기준에 관한 규칙[7]의 화재성능 시험대상 품목에 의거 내장판(Interior panel), 의자(Seat assembly), 바닥재(Floor construction), 단열재(Insulation) 등으로 한정하였다. 차체 구조와 차체 외장은 불연재이기 때문에 해석에서 제외하였고, 전선(Electric cable)은 해석 툴인 FDS(Fire Dynamics Simulator)의 특징 상 적용 방안이 모호하기 때문에 해석에서 제외하였다. 또한 통로연결막(Gangway bellows)은 본 논문의 해석 대상 철도차량의 구조적 특수성으로 인해 해석 대상에서 고려되지 않았다. 내장판(Interior panel)은 측부 내장판(Side panel), 천정 내장판(Ceiling panel)로 구분하여 해석에 적용하였으며, 의자(Seat assembly)는 의자커버(Seat cover)와 쿠션(Seat cushion) 프레임(Seat frame)으로 구성하였다. 또한 바닥재(Floor construction)는 합판(Floor board)과 커버(Floor covering)로 구분하여 적층형태로 해석에 반영하였다.

## 3. 열특성 물성치

대다수의 철도차량 내장재들의 재질인 Polymer 라고 명명되는 고체 중합체는 열에너지를 받게 되면, 물리적 및 화학적 변화가 일어나게 되고 이는 해당 물질에 바람직하지 않는 결과를 가져오는 것이 보통이다. 미국 재료 시험 협회(American Society of Testing Materials, ASTM)에 따르면 열분해는 '열로 인해 발생하는 광범위한 화학종의 변화'를 의미한다[4]. 열분해가 발생할 경우, 고체 중합체의 화학적인 분해를 통해 가연성 증기가 발생하게 되고 이 증기는 고체 물질 위에서 공기와 적절하게 혼합되어 일정 온도조건이 충족되면 연소할 수 있다[4]. 연소반응을 통해 화염이 발생하게 되고 해당 물질에 충분한 열을 재공급하는 과정을 통해 가연성 증기의 발생을 촉진하게 된다. 따라서 연소반응이 계속된다면, 이 과정은 연속적인 무한루프 구조로 볼 수 있다. 이러한 연소의 일반적인 과정에서, 각 고체 중합

체들의 열분해 특성에 따라서 화재의 성장이 영향을 받게 된다. 주어진 온도상황에서 어떠한 속도로 열분해가 일어나는가 하는 것은 연소성 증기의 방출 속도를 결정짓게 되고, 이는 고체 중합체의 화재 성장을 결정하는 하나의 변수로 작용하게 된다. 선행연구[6]를 통해 열중량분석(Thermal Gravimetric Analysis) 시험을 수행하여 해당 고체 중합체의 열분해 양상을 산출 및 분석하였으며, 그 추이를 선형화(Linear interpolation)과정을 통해 아레니우스 1차 열분해 방정식으로 근사화시켰고, 화재 해석상 열분해 양상을 조율하는 FDS(Fire Dynamics Simulator)입력 변수 A(Pre exponential factor)값과 E(Activation energy)값을 산출하여 해석이 이용하였다.

위에서 언급한 연소반응의 반복과 화재성장으로 인해 주위로 방출하게 되는 열에너지 추이를 정량적으로 측정하기 위하여 단품 콘칼로리미터(ISO 5660) 시험을 이용할 수 있다[5,8]. 이는 단품단위 재질의 열방출량 값을 측정하기 위한 시험 장비이다. 크기 100mm× 100mm 의 시편을 홀더위에 고정하여 시험 설비상 설정된 열복사 환경에 노출시키고 시편의 열분해와 연소성가스 방출을 촉진시킨다. 전기 스파크를 이용한 점화(ignition)를 통해 연소반응을 일으키게 하여 산소소모법(Oxygen consumption method)[4,8]에 근거한 열방출량을 산출할 수 있다. 해당 물질 표면에서 발생한 가연성 가스의 연소현상이 시험 장비 내 콘 히터에 설정된 열복사 상황에서 시간에 따른 단위 면적당 방출하는 열로써 정량적 측정이 되는 것이다. 이러한 시험과 분석과정을 거쳐, 해당물질에서 발생하는 연소성 가스의 단위 질량당 방출 에너지를 뜻하는 FDS(Fire Dynamics Simulator)입력 변수인 연소열(Heat of combustion)값을 산출하였고, 이를 해석이 적용하였다.

이 외에 해당 재질의 밀도(Density), 비열(Specific heat), 열전도도(Thermal conductivity) 등이 해석에 고려되었으며, 관련 재질에 대한 물성치 값은 시험 데이터에 의존하였다[9,10].

#### 4. 해석대상과 격자생성

Fig. 1은 본 연구의 해석대상인 철도차량과 내외부 유동영역이 도시되어있다. 격자 생성에 사용된 모든 형상 정보는 자사의 설계도면을 사용하여 신뢰성을 확보하였으며, 그 전체적인 형상은 Fig. 1에서 확인 할 수 있다. (a)는 정면도, (b)는 등측면도, (c)는 내부 인테리어를 나타내며, (d,e)는 각각 상면도와 측면도를 나타낸다. 18.7m× 3m× 3.4m의 실제 열차 크기를 해석 도메인에 반영하였으며 mesh stretching 기법을 사용하여 X축 Y축 Z축에 따라서 적절한 중형비의 격자를 고려하였다. 열차의 길이 방향으로 0.1m의 격자 크기를 설정하였고, 폭 방향과 높이 방향은 차량 구성품의 크기와 형상에 따라서 일부 구간에 상대적으로 조밀한 격자 구성을 갖도록 조정하였다. 그 격자의 형태는 Fig. 1 (a), (d-e)에서 확인 가능하다. 격자 크기를 선정하는데 있어, FDS User-guide[12~14]에 소개된 (NUREG 1824)의 격자민감도 테스트를 이용하였고, 산출된 적당한  $D^*/\Delta x$  (4~16)범위의 격자 크기를 만족하며, 총 518,400개의 유동격자를 해석에 반영하였다. 일반적인 철도차량의 경우 좌석 위의 공간, 특히 Ceiling과 좌우측 벽이 만나는 coving 부분에서 곡면의 형태가 많기 때문에 이러한 형상을 해석격자에 반영해 주기 위해서 sawtooth를 off 시켰고, Fig. 1 (b) 등측면도를 통해 천정의 좌우측 coving의

Table 1. Thermal properties

Item	Heat of Combustion (kJ/kg)	Pre exponential factor (1/s)	Activation Energy (kJ/kmol)
Side panel	15540~21100	1.2	52380
Ceiling panel	15540~21100	1.2	52380
Seat cover	19380	898	70670
Seat cushion	13500	1.203E06	99770
Seat frame	No pyrolysis	No pyrolysis	No pyrolysis
Insulation	No pyrolysis	No pyrolysis	No pyrolysis
Floor board	18620	1340	68170
Floor covering	27010	2.0	49800

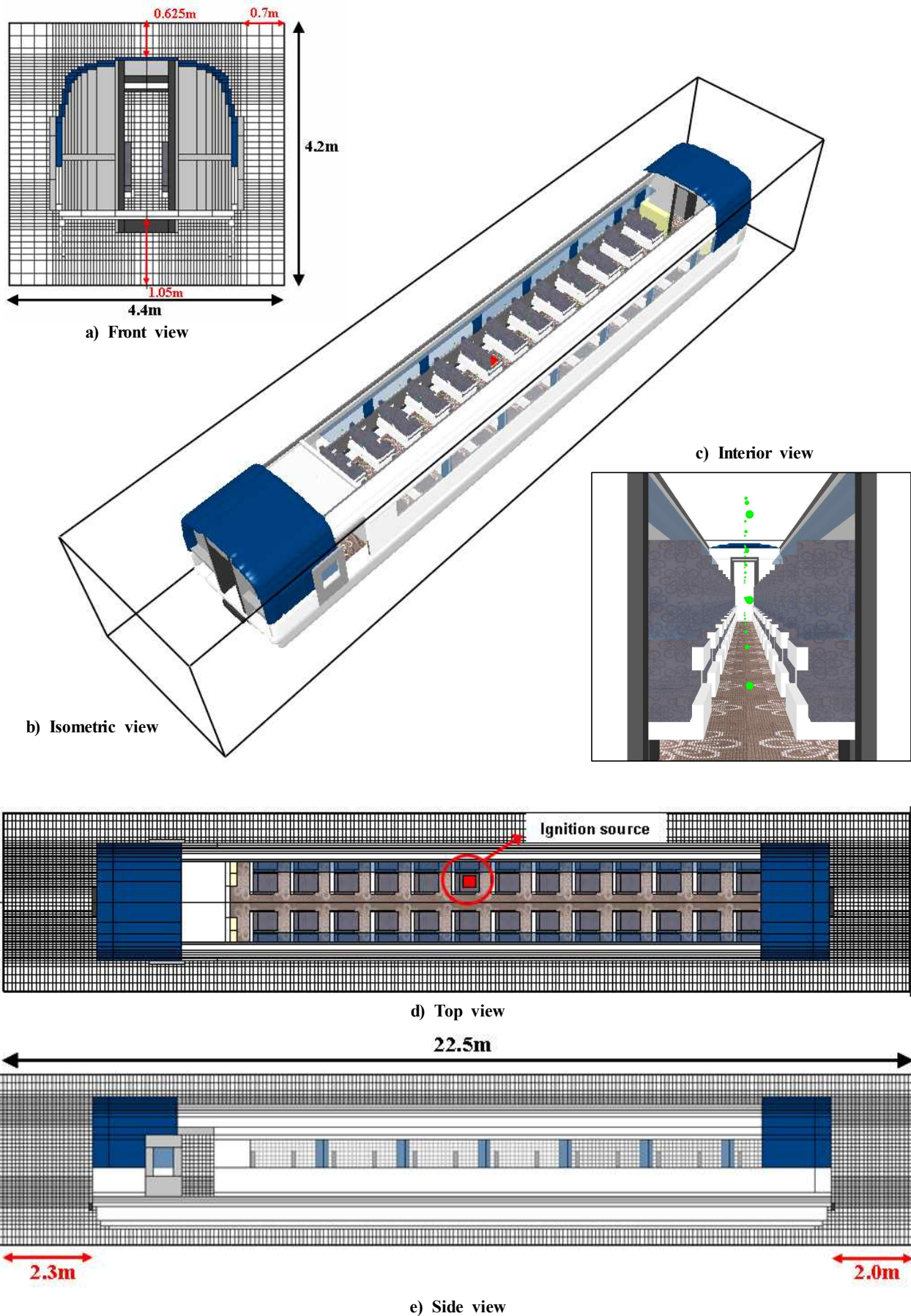


Fig. 1. Computational domain

곡면 형태가 격자에 반영되어 있는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 1 (b,d) 천정부위가 개방되어 있는 것처럼 보이는 것은 내부의 화염(Plume)과 유동현상을 쉽게 보기 위해 해당 격자를 시각적으로 투명처리한 것으로 실제적으로는 천정 내장판(Ceiling panel)과 지붕구조(Roof structure)로 막혀있다.

### 5. 해석조건 및 화재시나리오

화원(ignition source)은 화재의 발단과 성장에 지배적으로 영향을 미치는 인자이다. 본 해석에서는 EN45545[11] 규격에 명시된 화원조건인 초기 2분 동안 75kw 열방출과 그 후 8분 동안 150kw의 열방출을 가하는 조건에 더하여 EN45545 화원 10분 이후 2분당 100kw의 열량을 증가하도록 설정하여 플래시오버(Flashover)를 유도하였다. Fig. 2에 도시된 화원 곡선을 0.3m × 0.3m의 면적의 버너(Burner)에 링크시켜 Fig. 1 (d)에 나타난 바와 같이 열차의 중간위치 통로 쪽 좌석위에 설치하여 천정 내장판(Ceiling panel)과 좌석 상부에 화염이 가해지도록 코드 설정을 하였고 모든 해석 케이스에 공통적으로 적용되었다.

상기 언급한 공통 화원에 대하여 서로 다른 환기량 조건에 따른 화재 성장, 플래시오버(Flashover)의 진행 양상 및 열방출량 차이 등을 진단하기 위해 총 3가지 해석 케이스를 분류하였다. 첫 번째 케이스(CASE 1)는 철도차량의 모든 창문 및 승객 출입문 도어가 닫힌 것으로 가정하였다. 화재가 지속적으로 성장하기 위해 필요한 산소는 철도차량 전면과 후면부위 단부문을 통해서만 가능하다. 화재성장에 가장 열악한 환기조건(under-ventilated condition)이라 할 수 있다. 두 번째로 고려한 해석 케이스(CASE 2)는 단부문, 승객 출입문 도어의 개방과 함께 고온 고압의 내부 환경에서 열복사에 따른 창문 파괴 조건을 해석 코드에 반영한 것이다. Fig. 1 (d)에 도시되어 있듯이 철도차량의 각 측면에는 7개의 창문이 있다. 각각의 창문에 열전대(Thermocouple)를 설치하여 600℃의 온도에 이르면 창문이 해석 도메인에서 사라지도록 해석 코드에 반영하였으며, 파괴된 창문을 통해 외부의 산소가 화재지역으로 유입이 원활하도록 하여 CASE 1보다 상대적으로 화재성장에 유리한 환기 조건(window-brake condition)이 조성되도록 설정하였다. 세 번째로는 해석 초기 단계부터 모든 승객 유출입 문과 단부문 창문까지 모두 개방되어 있는 조건을 설정한 것이다. 이는 앞선 두 가지 케이스와 비교하여 상대적으로 가장 화재성장에 유리한 환기조건을 조성해준 것으로 충분한 산소 공급(well-ventilated condition) 하에서 화재의 성장을 진단해 보고자 하였다. 해석 케이스에 대한 분류는 Table 2에 간단히 도시되어 있다.

모든 해석 케이스에 대하여 외각 경계조건은 모두 대기(Atmosphere)조건으로 FDS(Fire Dynamic Simulator)상 OPEN boundary 설정을 해주었으며, 각 내장재 재질들의 표면 후면으로의 열전달 조건(SURF backing condition)은 단열조건(insulation)으로 설정하였다.

### 5. 결과 분석

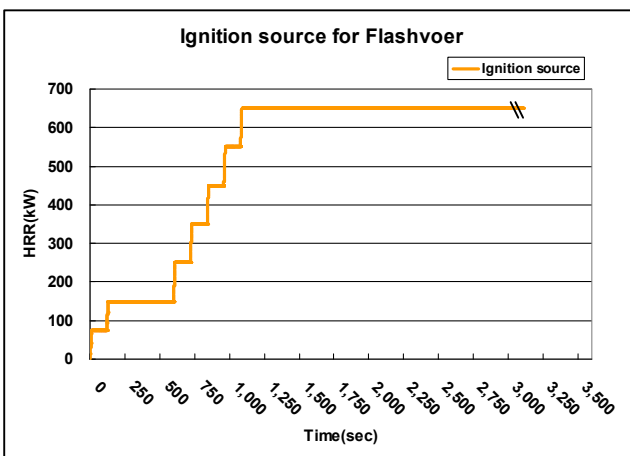
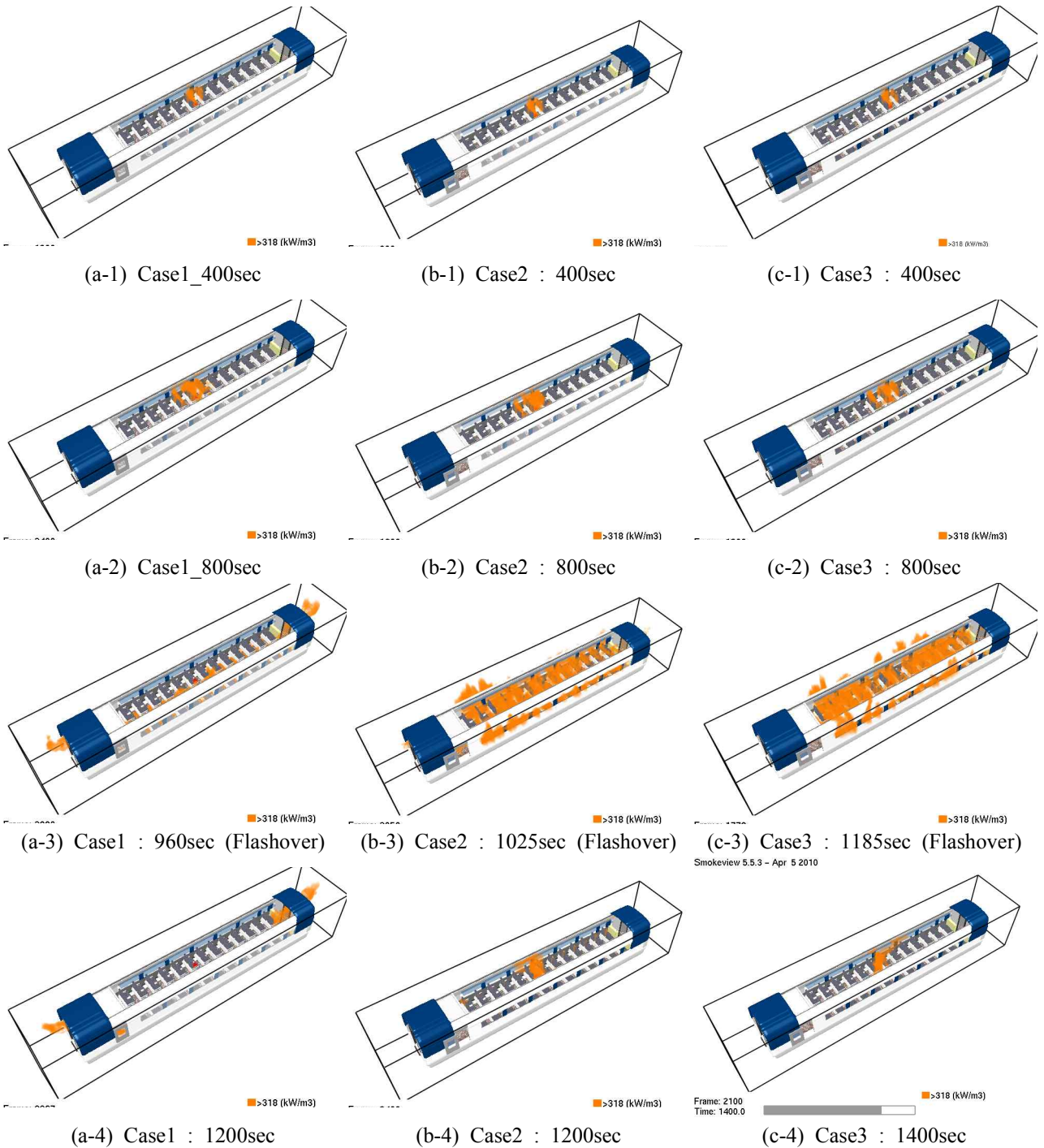


Fig. 2. Ignition source HRR curve

No.	Gangway	Side door	Window
CASE1	open	closed	closed
CASE2	open	open	braked at 600℃
CASE3	open	open	open

Table 2. Case classification



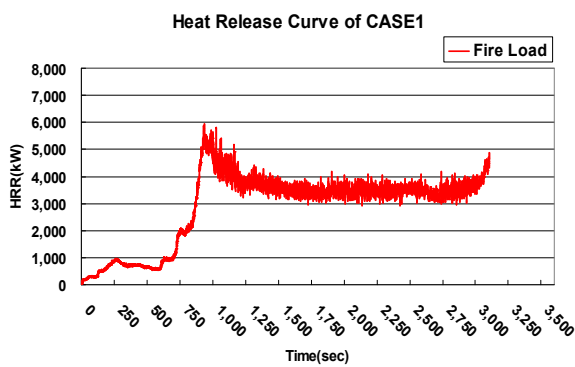
**Fig. 3. Simulation result**

상기 Fig. 3은 앞서 설명한 세 가지 해석 케이스에 대한 FDS(Fire Dynamics Simulation) 화재해석 결과 화염방출(Plume)을 시각화하여 도시한 것이며, Fig. 4에는 각 케이스별 열방출 곡선과 최대열방출율, 총열량 등의 화재규모를 도시하였다. Fig. 3 (a~c - 1~2)의 결과를 보면 세 가지 케이스에 대하여 해석 시작 후 800초 까지는 서로 다른 환기량 조건일지라도 모두 비슷한 양상의 화재 성장을 발견할 수 있다. 이 단계는 화원 350KW 열방출 상황으로 차량 내 화재 성장이 차량 전체로 전이될 만큼 발달하지 않았고, 환기량이 화재성장에 지배적 영향을 미치지 않는 연료지배형(Well-ventilated fire condition) 화재 특징을 보인다. 하지만 Fig. (a-3 ~ c-3)에 나타난 바와 화재 발생 800초 이후, 각 환기량 조건에 따른 플래시오버(Flashover) 양상은 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다. 환기량을 가장 많이 제한받는

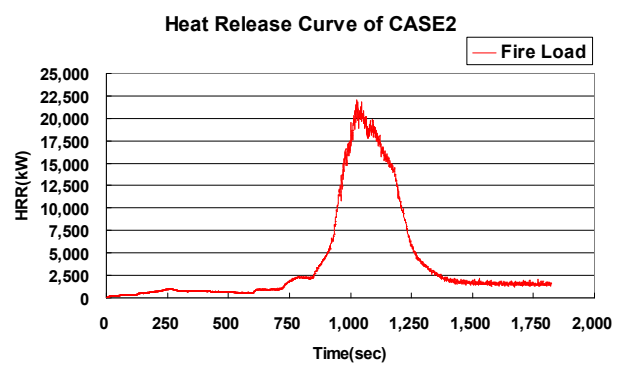
조건인 CASE 1의 경우에 가장 빠른 시간(938초)에 플래시오버(Flashover)를 보였지만 최대 열방출 크기는 5.95 MW로 가장 미약했고, 산소공급이 가장 풍부했던 CASE 3의 경우 플래시오버(Flashover)에 도달하는 시간은 1185초로 가장 늦었지만, 최대 열방출량 31.2 MW를 나타냈다. 600°C 창문과괴 조건을 설정한 CASE 2의 경우에는 1025초에 플래시오버(Flashover)를 보였고 최대 열방출량 22.1MW를 기록했다. 환기량 조건이 열악할수록 즉 폐쇄 공간일수록 플래시오버(Flashover)는 빠르게 일어나는 경향을 볼 수 있으며, 최대 열방출율은 감소하는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 개방된 공간에서는 연소가 지속적으로 일어나기 위한 산소 공급은 원활하지만, 플래시오버(Flashover) 단계로 진입하기 전 화재 성장기 때 대류열전달 등을 통해 화재로 발생한 열이 외부로 소산되는 현상이 나타나기 때문에 플래시오버(Flashover)가 지연되는 것이다.

플래시오버(Flashover)는 화재의 성장단계에서 구획내부의 모든 가연물이 일시에 발화하게 되는 상황으로의 전환이라 할 수 있는데[4], 이를 위해서는 상부 고온의 가스가 발산하는 복사에 의하여 연소가 가능한 모든 물질이 착화되어야 한다. Fig 3 (a-3, b-3, c-3) 각 케이스 플래시오버(Flashover) 상황을 보면 공통적으로 철도차량 내부 내장재들이 일시에 착화되는 것이 관찰된다. 하지만 Fig. 3 (a-3)에서는 차량 내부 제한된 환기조건으로 인하여 플래시오버(Flashover)가 발생했을지라도 상당량의 내장재가 발화하지 못했으며 따라서 가장 낮은 수준의 최대 열방출율(5.95MW)을 보이며, 플래시오버(Flashover) 이후에 단부 쪽에서 지속적인 발화 현상이 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 초기부터 모든 개구부가 개방된 CASE 3의 경우 화재가 성장함에 따라서 방출하게 되는 열량이 대류열전달의 형태로 외부로 소산되어 플래시오버(Flashover) 자체는 가장 지연되었지만, 충분한 환기조건으로 인하여 모든 가연물이 일시에 연소하는 형태의 플래시오버(Flashover)를 나타내었으며, 그 결과 역시 Fig. 3 c)에 잘 나타나 있다. CASE 2는 화재가 성장함에 따라 개구부가 순차적으로 확장되어 지속적 산소 공급로를 확보하는 화재 현상을 나타내며 그로 인한 열방출율 추이는 Fig. 4 b)에 도시되어 있다.

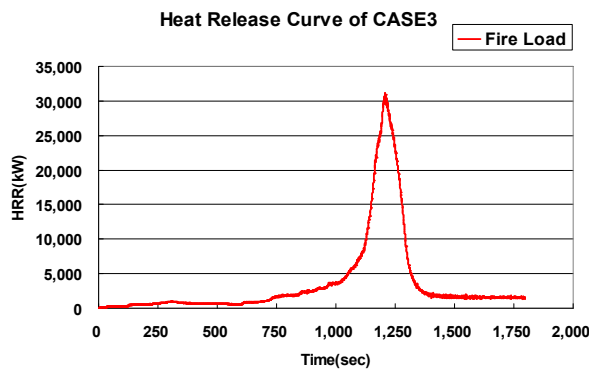
## 6. 결 론



a) CASE 1



b) CASE 2



c) CASE 3

CASE No.	Peak HRR	Total Heat
CASE1	5.95MW at 938sec	N/A
CASE2	22.1MW at 1025sec	6,858 MJ
CASE3	31.2MW at 1185sec	6,415 MJ

d) Peak HRR and Total Heat

Fig. 4. Heat release rate of each CASE and Result summary

본 논문에서는 국내의 일반적인 철도차량을 대상으로 단부문, 승객출입문, 창문 등의 개방조건에 따라 열차 내 각기 다른 환기량 조건이 열차의 화재 성장과 규모에 어떠한 영향을 미치는지 세 가지 해석 케이스로 나누어 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)기법인 FDS(Fire Dynamics Simulator) 화재시뮬레이션 툴을 이용하여 수치해석을 하였다. 이를 위해 선행 연구[5,6]에서 기 수행한 기법에 따라 ISO 5660 규격 콘칼로리미터[9]시험과 열중량분석(Thermal Gravimetric Analysis)시험[6]을 수행하여 해당 내장재 단품의 발열량 데이터와 중합체 열분해 양상을 분석하여 본 FDS(Fire Dynamics Simulator) 화재시뮬레이션에 적용하였다.

해석 결과 환기량 조건이 열악할수록 즉 폐쇄 공간일수록 플래시오버(Flashover)는 빠르게 일어나며 최대 열방출율은 상대적으로 감소하는 경향이 나타나는 것이 관찰되었고, 개방된 공간에서는 연소가 지속적으로 일어나기 위한 산소 공급은 원활하지만, 플래시오버(Flashover) 단계로 진입하는데 까지 시간지연이 나타나는 것을 알 수 있었다.

플래시오버(Flashover)단계 이후인 최성기(Post-Flashover/Fully developed Fire) 화재로의 진입시간을 예측하는 것과 최성기 화재 시 최대 열방출량을 산출하는 것은 화재규모를 예측 진단하는데 있어서 가장 중요한 두 가지 요소이다. 본 연구를 통해서 폐쇄 공간에서의 화재 인 철도차량 화재를 진단함에 있어서 환기량이 화재의 성장 패턴과 최대 열방출율에 미치는 영향성이 어떠한지 정성적으로 조명하였다. 해석에 사용된 창문파괴 조건이 실제차량에서의 창문 파괴 현상과는 다소 차이가 있을 수 있지만, 철도차량 화재를 진단하는데 있어 쉽게 간과할 수 있는 창문파괴라는 현상이 폐쇄구조 화재 인 철도차량 화재에서 환기량이라는 중요한 변수를 조절하는 역할을 할 수 있다는 것을 규명한데에 의의를 두고자 한다.

## 7. 후기

본 연구는 건설교통부 과제 “미래철도기술개발사업”의 일환으로 추진 중인 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 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. 양성진, 장정훈, 강찬용(2008), “철도 차량 화재시 화재강도 예측을 위한 연구”, 철도학회춘계학술대회논문집, 6, pp.2082 - 2089
4. J. Philip, et al(2005), "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(3rd edit.)", SFPE.
5. 양성진, 장정훈, 강찬용(2009), “FDS 열분해 모델을 이용한 콘칼로리미터(ISO 5660) 화재 시뮬레이션”, 2009 철도학회춘계학술대회논문집, pp.77
6. 양성진, 이창덕, 강찬용(2009), “TGA 분석을 통한 중합체 열분해율이 화재 성장에 미치는 영향성에 대한 수치해석연구”, 2009 철도학회추계학술대회논문집.
7. “철도차량 안전기준에 관한 규칙”, 2008. 7.10, 일부개정, 국토해양부령 제35호.
8. (2003), "KS F ISO 5660-1 연소 성능 시험-열 방출 연기발생, 질량감소율-제1부 열 방출률(콘 칼로리미터법)", 한국산업표준심의회
9. “전동차 내장재 시편 발열량(ISO5660)시험 결과”, 2008, 한국철도기술연구원
10. “전동차 내장재 시편 비열 및 열전도도 시험 결과”, 2009, 한국생활환경시험연구원, 한국고분자시험



연구소.

11.DD CEN/TS 45545:2009 Railway applications-Fire protection on railway vehicles, BSI

12.K. McGrattan, et al(2006), "Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) User's Guide", NIST.

13.McGrattan, et al(2006), "Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) Technical Reference Guide", NIST.

14.D. Madrzykowski, et al(2003), "Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations", NIST.