

C-11

지하철 차량의 화재 수치해석을 위한 민감도 분석

김우석, 노삼규*

현대하이카자동차손해사정(주) 위험관리연구소, 광운대학교 건축학과*

Sensitivity Analysis for Fire Numerical Solution of Subway Car Fire

Kim Woo-Seok, Roh Sam-kew*

Hyundai Hicar Claims Service Co., Ltd., Kwangwoon Univ. *

1. 서론

지하철을 포함한 궤도 차량의 화재 위험성은 이미 발생한 몇 건의 화재사고에서 직·간접적으로 알려졌다. 특히 최근에 발생한 대구(2003년)와 서울지하철 7호선(2005년) 및 홍콩 지하철(2004년) 등의 화재사고는 위험성뿐만 아니라 방화(Arson)화재 시의 대처에 따른 피해 크기 차이를 보여주는 예이다. 이러한 실제 사례를 바탕으로 발생 가능한 화재를 예측하여 위험의 크기와 종류를 예측할 수 있다면 그에 대한 적절한 대처 방법을 제시할 수 있게 될 것이다.

현재의 화재 예측방법 중 흔히 사용되는 화재시뮬레이션에서 주요 입력 변수(화재의 크기, 격자 및 그 외의 물리적 변수 등)에 따라 변화되는 결과 값에 따라 해당 화재모델의 주요 민감도 인자를 결정하게 된다. 또한 이 결과는 출력 값의 V&V(Verification & Validation)를 검토하는 기초자료로서 제공된다.

본 분석에서는 지하철 차량 내부에서의 FDS(Fire Dynamics Simulator) Ver. 4.07에 적용되는 주요 입력데이터 중 Numerical Parameter인 Grid Size와 Physical Parameter인 HRR(Heat Release Rate)의 변화 및 열전달의 주요변수인 Radiation Parameter 중 Solid Angle Number (이하 S.A.)의 변화에 따른 민감도를 분석한다.

2. 선행연구 조사

EPRI(2006)의 연구에서는 NPP(Nuclear Power Plant)에 FDS를 적용하기 위하여 모델 민감도의 문제점과 모델의 결과에 영향을 주는 주요 입력 변수들에 따른 결과 값 변화에 대하여 분석하였다. 입력 변수는 크게 수치적(Numerical) 부분과 물리적(Physical)인 부분으로 나누며, 중요 수치 변수(Numerical Parameter)는 기본적인 격자의 크기이고 물리적 변수(Physical Parameter)는 화재의 크기, 벽 재질, 생성물의 수율(Product Yields)이다. 이 연구에서는 Grid Size가 민감한 변수로 작용되며 Solid Angle 및 Turbulence Parameter 등은 영향이 많지 않다고 제시하였다.

또한, 지문학 등(2007)의 연구에서도 원자력발전소 방화지역의 방화위험에 적용하기 위한

FDS의 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과 Grid Size가 가장 큰 민감도를 나타내며 그 외 가연물의 량, Heat Flux 등에 미치는 영향은 크지 않다고 명시하였다.

이러한 연구들은 원자력 발전소 등의 구조물 연구를 위하여 수행된 연구로 한정되어 있으며 이에 적용 또한 제한적이다.

2. 시나리오의 설정

적용 해석 모델은 FDS Ver 4.07이며 대상 차량은 서울지하철 (The Subway Car on Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp.) 객차 1량으로 차량의 크기는 다음과 같다.

- 차량 외부 크기 (Outer Car Size) - 19.5m (W) × 3.2m (D) × 3.1m (H)
- 차량 내부 크기 (Inner Car Size) - 18.9m (W) × 3.0m (D) × 2.4m (H)
- 문의 크기 (Door Size) - 1.3m (W) × 1.9m (H)

차량의 개구부는 승강장에 맞닿는 1면의 출입문이 모두 열리는 것을 가정하여 총 4개소가 개방된 것으로 설정하였다.

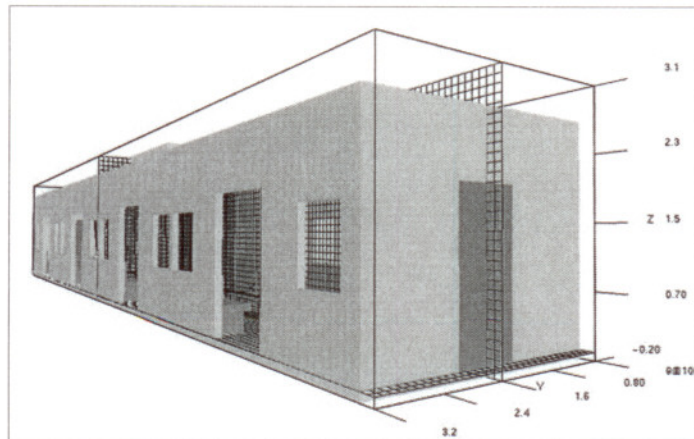


Figure 1. Car Model

연구는 크게 화재크기와 Grid Size의 변화에 따른 민감도 분석(이하 F-G)과 Radiation Parameter인 Solid Angle Number에 대한 민감도 분석(이하 Ra)으로 구분된다.

F-G 분석에서 차량 내부의 측정점(Thermocouple, 이하 TC)은 총 3개소(Figure 2)이며 해당 TC에서 분석되는 변수는 화원에 근접한 곳(TC-1, 2)에서는 온도, 압력 등의 Physical Parameter 들을 분석하고, 먼 곳(TC-3)에서는 연소생성물에 관계되는 변수를 분석하는 등 총 6 Case(Table 1)로 구분된다. 이 경우 Grid Size는 $0.1 \times 0.1 \times 0.1\text{m}$ 와 $0.05 \times 0.05 \times 0.05\text{m}$ 의 두가지로 구분된다.

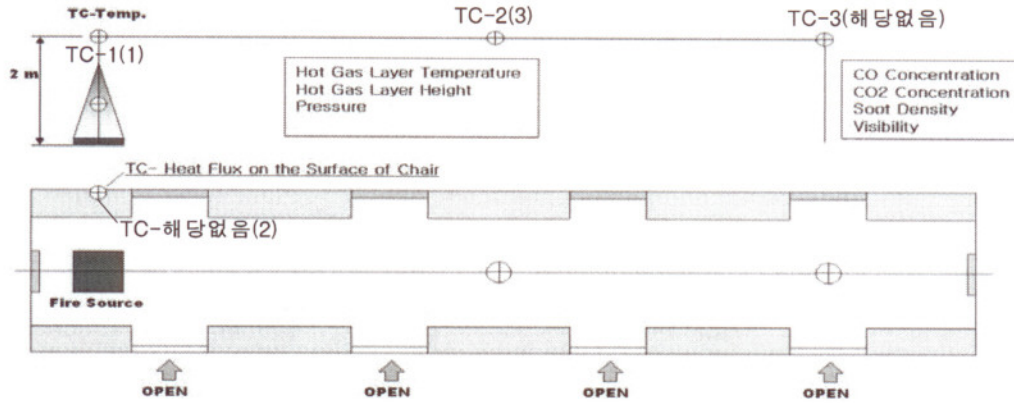


Figure 2. Position of Thermocouples (TC No. of Ra analysis in parenthesis)

Ra 분석에서는 화원상부(TC-1), 화원 인근 의자표면(TC-2), 차량중앙 상부(TC-3)에 TC가 설정(Figure 2)되며 총 3 Case (Table 1)로 구성되어 TC-1에서는 Temperature, TC-2에서는 Gauge Heat Flux, TC-3에서는 Upper Temperature(Zone Model Parameter)와 Temperature가 측정된다. 사용된 격자의 크기는 0.1×0.1×0.1m 의 크기 단일모델이다.

Table 1. Sensitivity Analysis Cases

F-G Analysis			Ra Analysis	
Cases	Fire Size	Grid Size (m)	Cases	No. of Solid Angles (Grid Size=0.1×0.1×0.1m)
Case 1-1	500kW	0.1 × 0.1 × 0.1	Case 1	100
Case 1-2		0.05 × 0.05 × 0.05		
Case 2-1	1000kW	0.1 × 0.1 × 0.1	Case 2	200
Case 2-2		0.05 × 0.05 × 0.05		
Case 3-1	1500kW	0.1 × 0.1 × 0.1	Case 3	300
Case 3-2		0.05 × 0.05 × 0.05		

3. F-G 분석 결과

Figure 3의 (a)~(c)를 보면 500kW화원 Centerline 상부의 Temperature(TC-1)는 최대값에 대해서 약 20%의 차이를 보이며, 차량 중심 상부 Upper Layer Temperature(TC-2)는 초기 화재 상승기를 제외하면 약 10% 이내의 차이를 갖는다. 또한, 차량 중심 상부 Layer Height(TC-2)에서 초기 약10~30초 사이에 결과 값의 큰 차이를 갖는다.

(d)와 (e)는 1000kW일 경우 결과로 차량 중심 상부(TC-2) Upper Layer Temperature는 초기 화재 상승기를 제외하면 약 25% 차이를 갖으며 차량 중심 상부(TC-2) Layer Height에서 초기 약10~30초 사이에 결과값의 큰 차이를 갖는다.

(f)와 (g)의 경우는 1500kW의 화원으로 차량 중심 상부 Upper Layer Temperature(TC-2)는 초기 화재 상승기를 제외하면 약 20% 차이를 갖으며 차량 중심 상부(TC-2) Layer Height

는 1000kW의 경우와 유사한 결과를 나타낸다.

Note :

- (a) 500kW Temperature
- (b) 500kW Upper Layer Temperature
- (c) 500kW Layer Height
- (d) 1000kW Upper Layer Temperature
- (e) 1000kW Layer Height
- (f) 1500kW Upper Layer Temperature
- (g) 1500kW Layer Height

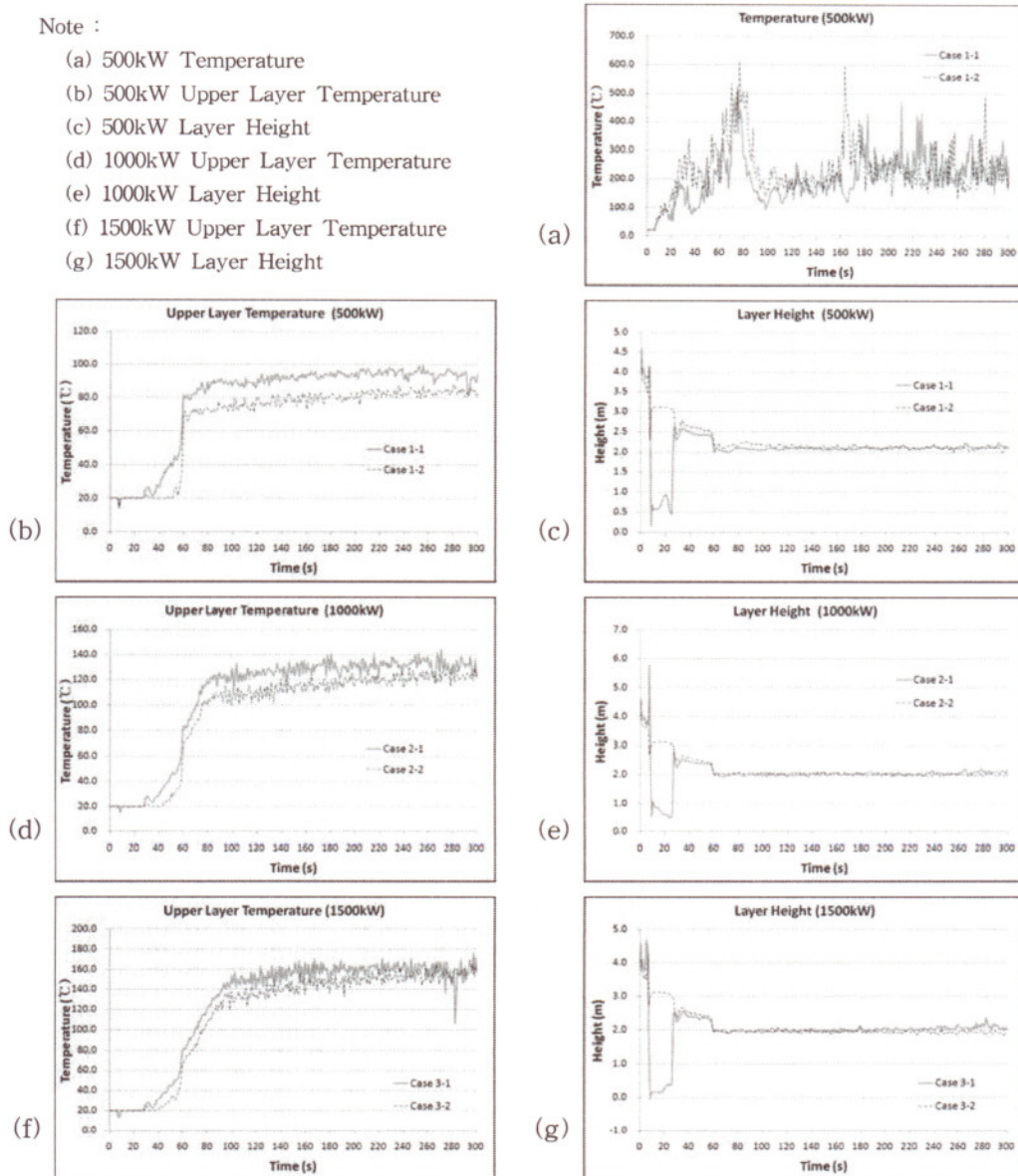


Figure 3. F-G Analysis Results

4. Ra 분석 결과

S.A. Number의 변화(100, 200, 300)에 대한 분석 결과, Figure 4의 (a)와 (b)에서와 같이 화원 Centerline 상부의 Temperature (TC-1)에서의 Case 2(S.A.=200)에서 최대값의 차이와

차량 중심 상부 Upper Layer Temperature (TC-3)에서의 최소값 등에 부분적 차이가 발생하나 민감도의 변화는 크지 않다. 이는 선행연구의 결과들과 동일한 것으로 기본 값인 100의 선택이 적절하다는 것을 보여준다.

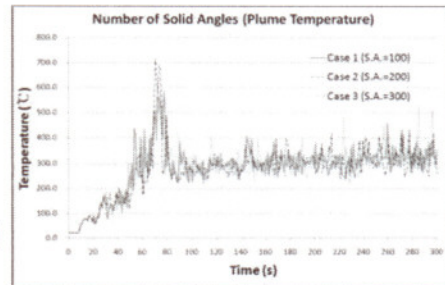
총 해석 소요시간은 Case 1(S.A.=100)에서 12.70hr, Case 2(S.A.=200)에서 14.77hr, Case 3(S.A.=300)에서 16.61hr 이다.

Note :

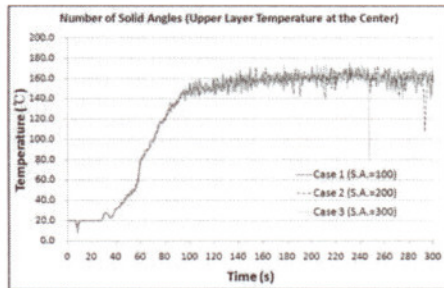
- (a) Plume Temperature above Fire Source
- (b) Upper Layer Temperature at center
- (c) Heat Flux at Chair Surface

※ Specifications of an operated computer

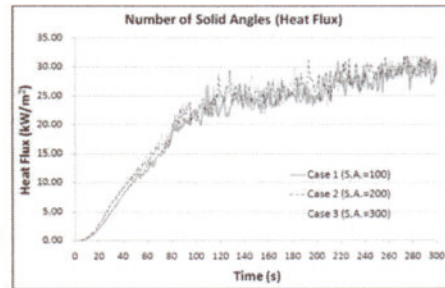
CPU	AMD Athlon(TM) 64 X2 Dual Core Processor 3800+ 2.0GHz
RAM	2.0 GB
OS	Microsoft Window XP Professional



(a)



(b)



(c)

Figure 4. S.A. Analysis Results

5. 결론

본 연구는 지하철 차량의 화재에 대하여 전산 수치해석 모델 중 FDS 프로그램을 적용하기 위한 민감도 분석 연구로서 연구 결과는 다음과 같다.

(1) Grid & Fire Sizes Sensitivity Analysis의 결과, 500kW 경우 가장 큰 민감도를 갖는 것은 화원 Centerline 상부의 Temperature와 차량 중심 상부 Upper Layer Temperature와 Layer Height이다. 그 외의 입력값에 대해서는 격자에 대하여 유사한 추세를 보인다.

1000kW과 1500kW의 경우 가장 큰 민감도를 갖는 것은 차량 중심 상부 Upper Layer Temperature와 Layer Height이며 그 외의 입력값에 대해서는 격자에 대하여 유사한 추세를 보인다.

(2) Radiation Parameters Sensitivity Analysis의 결과, Solid Angle Number의 변화(100, 200, 300)에 대한 분석 결과에서 화원 Centerline 상부의 Temperature(TC-1)에서의 Case 2(S.A.=200) 최대값의 차이와 차량 중심 상부 Upper Layer Temperature(TC-3)에서의 최소값 등에 부분적 차이가 발생하나 민감도의 변화는 크지 않다.

총 해석 소요시간은 Case 1(S.A.=100)에서 12.70hr, Case 2(S.A.=200)에서 14.77hr,

Case 3(S.A.=300)에서 16.61hr 으로 각각 약 2hr의 편차를 나타낸다.

이 결과는 향후 진행되는 실대 실험 연구에 기초자료를 제공할 것이며 또한, 실험결과와의 비교를 통하여 적절한 변수들을 실제 화재 시뮬레이션에 적용하게 될 것이다.

본 논문은 건설교통부 기술연구개발사업의 “철도화재안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”과제 2차년도 연구로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. "NUREG 1824- Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7 : Fire Dynamics Simulator (FDS)", EPRI 1011999, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2006
2. 지문학 외, "성능기반 화재모델(FDS)을 이용한 원전 방화지역 화재위험 분석조건에 대한 민감도 해석", 한국화재소방학회 논문지, 제 21권 2호, 2007
3. "E 1355 - 05a, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of De-terministic Fire Models", ASTM EAmerican Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2005.
4. "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide" (K. McGrattan, Editor), NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
5. McGrattan, K., and G.P. Forney, "Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide," NISTPublication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2005.
6. S.K.Roh, "A Study on the Emergency Response Manual for Urban Transit Fires", 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology, 2007.
7. 이덕희 외, "지하철 내장재료의 재료특성에 따른 화재안전도 평가", 한국철도학회, 2003년도 추계학술대회 논문집(Ⅲ), 2003