

여객 열차 화재의 수치해석을 위한 민감도 분석 A Study on Sensitivity Analysis for Numerical Solution of Passenger Train Fire

김우석[†] · 노삼규* · 정우성**

Woo-Seok Kim[†] · Sam-Kew Roh* · Woo-Sung Jung**

현대하이카손해사정(주), *광운대학교 건축학과,
**한국철도기술연구원 철도환경연구실
(2008. 1. 16. 접수/2009. 2. 13. 채택)

요 약

본 연구의 목적은 화재 예측모델로 널리 사용되는 FDS(Fire Dynamics Simulation) ver. 4.07을 여객 열차 화재예측에 적용하기 위하여 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 수행하는 것이다. 주요 분석 변수(Parameter)는 격자 크기(Grid size)와 Solid angle number이다. 분석결과, 격자크기의 변화는 온도(Plume temperature)와 상부층 온도(Upper layer temperature), 연기층 높이(Layer height) 결과 값에 약 10~20%의 차이를 갖게 하는 주요 민감도 변수이며 Solid angle number는 민감도에 영향을 크게 미치지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 0.05m의 Grid size가 0.1m보다 결과 해상도가 높은 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The aim of this study is to analyse the sensitivity of fire simulation parameters including grid size and solid angle number which affect the performance of subway cabin fire simulation by FDS 4.07 version. The results of sensitivity analysis shows average of 10~20% differences in plume temperature, upper layer temperature, and layer height depending on the change of grid size. The study also shows that simulation with 0.05m grid size produces better resolution than that with coarse one which is 0.1m.

Keywords : Sensitivity analysis, Fire dynamics simulator, Passenger train fire, Fire simulation

1. 서 론

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

현재의 화재 예측방법 중 흔히 사용되는 전산유체역학 시뮬레이션 모델들은 다양한 입력 및 설정변수들

에 따라 예측 결과가 상이하게 되며, 모델 자체의 계산 오차를 최소화하기 위하여 모델 본연의 V&V (Verification & Validation)를 검증하여야 하며, 분석 대상의 조건에 따른 민감도 분석(Sensitivity analysis)에 의하여 결과 값에 영향을 주는 주요 민감도 변수를 확인하는 과정이 요구된다.

이러한 예상 주요 입력 변수에 포함되는 화재의 크기, 격자 및 그 외의 물리적 변수들을 민감도 분석을 통하여 결정하여 예측하고자 하는 화재 현상에 결과 값의 오차를 최소화할 수 있는 설정 값을 부여하게 된다.

물론 민감도 분석이 전산유체역학 모델이나 연소 및 난류 방정식 등의 한계를 해소할 수 있는 방법론은 아니며, 분석 대상에 대하여 가능한 최상의 환경을 만들어 주는 것이 목적이다.

본 연구에서는 화재 예측모델로 널리 사용되는 FDS

[†]E-mail: baeshin@hicar.co.kr

(Fire Dynamics Simulator) ver. 4.07을 지하철 차량화재 예측에 적용하기 위하여, 요구되는 주요 입력데이터 중 수치적 변수(Numerical parameter)인 격자크기와 열전달의 주요변수인 복사 변수(Radiation parameter) 중 Solid angle number(이하 S.A.)의 변화에 따른 민감도를 분석한다.

2. 국외 사전 연구 사례 조사

EPRI의 연구¹⁾에서는 Nuclear power plant에 FDS를 적용하기 위하여 모델 민감도의 문제점과 모델의 결과에 영향을 주는 주요 입력 변수들에 따른 결과 값 변화에 대하여 분석하였다. 입력 변수는 크게 수치적인 부분과 물리적인 부분으로 나누며, 중요 수치 변수는 기본적인 격자의 크기이고 물리적 변수는 화재의 크기, 벽 재질, 생성물의 수율(Product yields)이다.

이 연구에서는 격자 크기(Grid size)가 민감한 변수로 작용되며 S.A. 및 난류 변수(Turbulence parameter) 등은 영향이 많지 않다고 제시하였다.

또한, 지문학 등의 연구²⁾에서도 원자력발전소 방화 지역의 방화위험에 적용하기 위한 FDS의 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과 격자 크기가 가장 큰 민감도를 나타내며 그 외 가연물의 량, 열류량(Heat flux) 등에 미치는 영향은 크지 않다고 명시하였다.

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

3. 민감도 분석 시나리오

적용 해석 모델은 FDS Ver 4.07이며 대상 차량은 서울 지하철 객차 1량으로 차량의 크기는 Table 1과 같다. 차량의 개구부는 Figure 1과 같이 승강장에 맞닿

Table 1. Cabin Sizes

Location	Size
Exterior	19.5m(W) × 3.2m(D) × 3.1m(H)
Interior	18.9m(W) × 3.0m(D) × 2.4m(H)
Door	1.3m(W) × 1.9m(H)

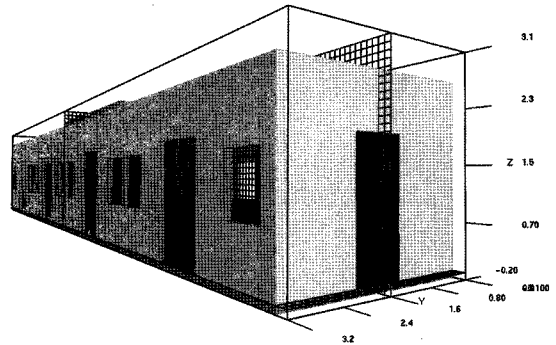


Figure 1. Snapshot of cabin model.

1면의 출입문이 모두 열리는 것을 가정하여 총 4개소가 개방된 것으로 설정하였다.

연구는 크게 격자 크기의 변화에 따른 민감도 분석(이하 F-G 분석)과 복사 변수인 S.A.에 대한 민감도 분석(이하 Ra 분석)으로 구분된다.

F-G 분석에서는 화재크기(Heat release rate)를 500, 1000, 1500kW로 증가시켜 각각 분석하였다.

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 물리적 변수(Physical parameter)를 분석하고, 먼 곳(TC-3)에서는 연소생성물에 관계되는 변수를 분석하는 등 총 6 Case(Table 2)로 구분된다.

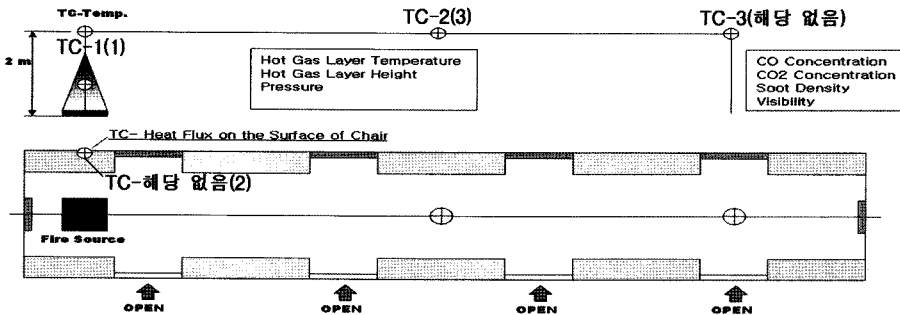


Figure 2. Position of thermocouples (TC No. of Ra analysis in parenthesis).

Table 2. Sensitivity Analysis Cases(F-G분석)

Case	Fire Size (kW)	Grid Size (m)
Case 1-1	500	0.1 × 0.1 × 0.1
Case 1-2	500	0.05 × 0.05 × 0.05
Case 2-1	100	0.1 × 0.1 × 0.1
Case 2-2	100	0.05 × 0.05 × 0.05
Case 3-1	1500	0.1 × 0.1 × 0.1
Case 3-2	1500	0.05 × 0.05 × 0.05

Table 3. Sensitivity Analysis Cases(Ra분석)

Case	Number of solid angles (Grid size = 0.1 × 0.1 × 0.1m)
Case 1	100
Case 2	200
Case 3	300

Table 4. Specifications of an Operated Computer

CPU	AMD Athlon(TM) 64X2 dual core processor 3800+ 2.0GHz
RAM	2.0GB
OS	Microsoft Window XP Professional

이 경우 격자는 정방형으로 0.1 × 0.1 × 0.1(m)와 0.05 × 0.05 × 0.05(m) 크기의 두 종류로 구분된다.

이는 격자수가 증가되면서 늘어나는 해석 시간에 대하여 해당 연구에서 허용 가능한 한계치이며 기존연구 자료 조사를 통하여 결정된 격자의 크기이다.

Ra 분석에서는 화원상부(TC-1), 화원 인근 의사표면(TC-2), 차량 중앙 상부(TC-3)에 TC가 설정(Figure 2) 되며 총 3 Case(Table 3)로 구성된다.

TC-1에서는 온도, TC-2에서는 열류량(Gauge Heat Flux), TC-3에서는 상부층 온도*와 온도가 측정된다.

사용된 격자의 크기는 0.1 × 0.1 × 0.1(m)의 크기 단일 모델이며, 분석에 사용된 컴퓨터의 사양은 Table 4와 같다.

4. 분석 결과

분석결과인 Figure 3~12는 전체 결과 중 주요 결과에 대한 그래프만을 제공한다.

*FDS의 상부층(Upper layer) 온도는 존(Zone)모델의 원리에 기반 하므로 “온도”와는 구분된다.⁵⁾

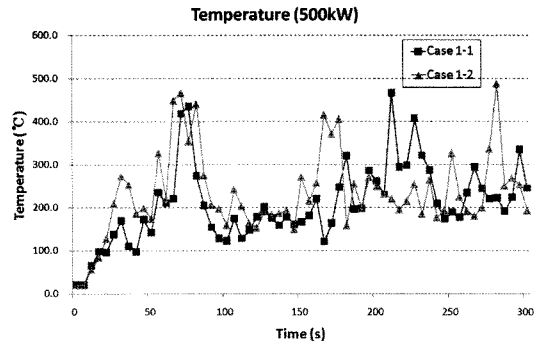


Figure 3. Temperature of case 1-1, 1-2.

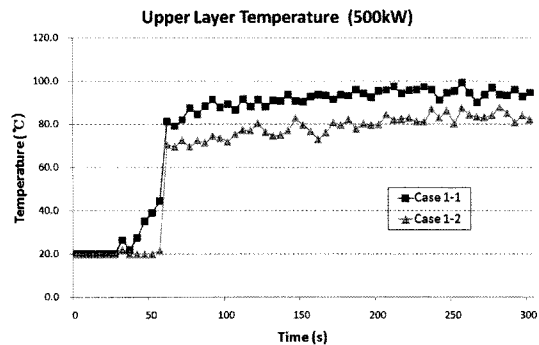


Figure 4. U.L. temperature of case 1-1, 1-2.

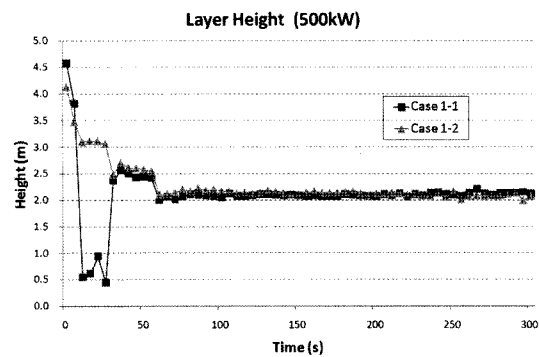


Figure 5. Layer height of case 1-1, 1-2.

4.1 F-G 분석 결과

Figure 3~5를 보면, 500kW화원 중앙 상부의 온도(TC-1)는 최댓값에 대해서 약 20%의 차이를 보이며, 차량 중심 상부 상부층 온도(TC-2)는 초기 화재 상승기를 제외하면 약 10% 이내의 차이를 갖는다.

또한, 차량 중심 상부 연기층 높이(Layer height, TC-

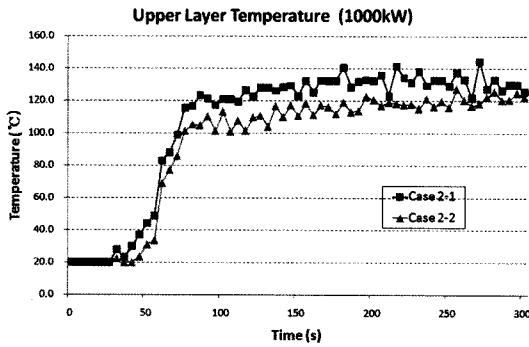


Figure 6. U.L. temperature of case 2-1, 2-2.

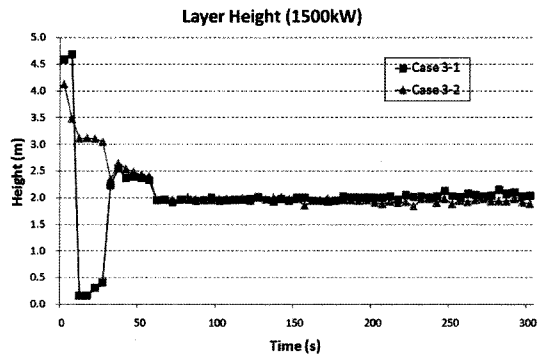


Figure 9. Layer height of case 3-1, 3-2.

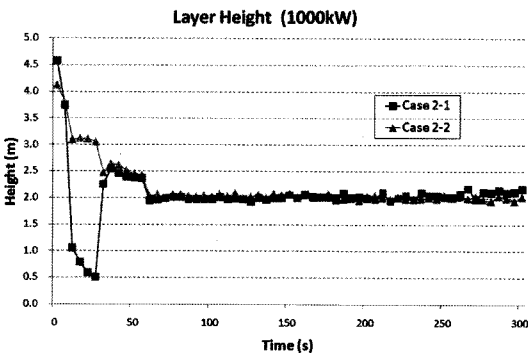


Figure 7. Layer height of case 2-1, 2-2.

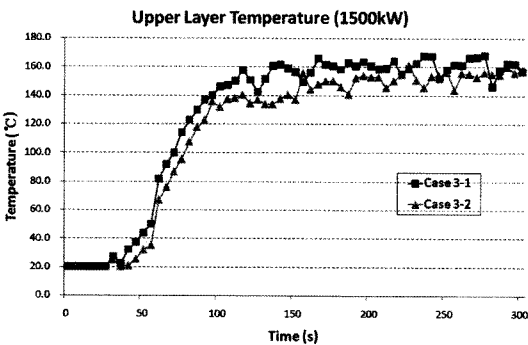


Figure 8. U.L. temperature of case 3-1, 3-2.

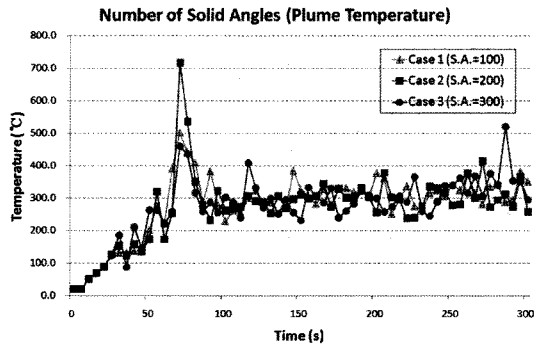


Figure 10. Plume temperature above fire source.

2)에서 초기 약10~30초 사이에 결과 값의 큰 차이를 나타낸다.

Figure 6과 7은 1000kW일 경우 결과로 차량 중심 상부(TC-2) 상부층 온도는 초기 화재 상승기를 제외하면 약 25% 차이를 보이며, 차량 중심 상부(TC-2) 연기층 높이에서 초기 약10~30초 사이에 결과 값의 큰

차이를 갖는다.

이것은 격자의 크기가 큰 부분(0.1m)에 대하여 결과 값의 오류로 판단할 수 있으며 격자해상도의 문제로 볼 수 있는데 이것은 작은 격자에서 양질의 결과 값을 얻을 수 있음을 나타내는 것이다.

Figure 8과 9의 경우, 1500kW의 화원으로 차량 중심의 상부 상부층 온도(TC-2)는 초기 화재 상승기를 제외하면 약 20% 차이를 보이며, 차량 중심 상부(TC-2) 연기층 높이는 1000kW의 경우와 유사한 결과를 나타낸다.

4.2 Ra 분석 결과

S.A.의 변화(100, 200, 300)에 대한 분석 결과, Figure 10과 11에서와 같이 화원 중심 상부(TC-1) 플럼 온도에서 Case 2(S.A. = 200)의 최댓값과 차량 중심 상부(TC-3)의 상부층 온도에서 최솟값 등에 부분적 차이가 발생하나 민감도의 변화는 크지 않다. 또한, Figure 12의 의자표면 열류량 분석에서도 유사한 결과를 갖는다.

이는 선행연구의 결과들과 동일한 것으로 기본 값인

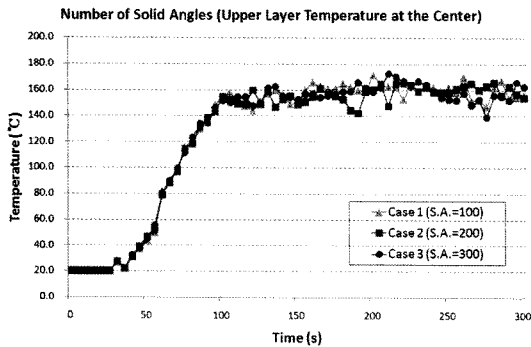


Figure 11. U.L. temperature at center.

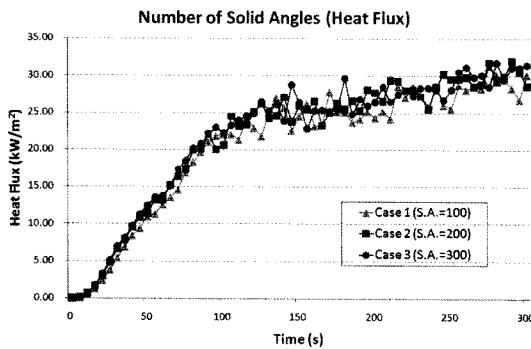


Figure 12. Heat flux at chair surface.

100의 선택이 적절하다는 것을 보여주는 것이다.

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

5. 결 론

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

(1) 화재 크기의 변화에 따른 격자 크기에 대한 민감도 분석 결과, 500kW 경우 가장 큰 민감도를 갖는 것은 화원중심상부의 온도와 차량 중심 상부의 상부층 온도, 연기층 높이이다. 그 외의 출력 값은 격자의 변화에 대하여 유사한 추세를 보인다.

1000kW과 1500kW의 경우 격자크기 변화에 가장 큰 민감도를 갖는 것은 차량 중심 상부의 상부층 온도와 연기층 높이이며 그 외의 출력 값은 격자의 변화에 대하여 유사한 추세를 보인다.

(2) 복사 변수 S.A. 변화(100, 200, 300)에 대한 민감도 분석 결과, 화원 중심 상부(TC-1)의 온도에서 Case 2(S.A. = 200) 최대값의 차이와 차량 중심 상부의 상부층 온도(TC-3)에서 최솟값 등에 부분적 차이가 발생하나 민감도의 변화는 크지 않다.

총 해석 소요시간은 Case 1에서 12.70시간, Case 2에서 14.77시간, Case 3에서 16.61시간으로 각각 약 2시간의 편차를 나타낸다.

결과적으로, 격자크기 변화(F-G 분석)의 변수에 대하여 온도, 상부층 온도, 연기층 높이 결과 값에 대한 민감도가 높음을 알 수 있으며, S.A.는 민감도에 영향이 크지 않고 기본 값 100의 적용이 가능하다고 판단된다.

또한, 본 지하철 객차 모델에서 0.05m의 격자에 대한 결과 값이 0.1m 격자의 결과 값보다 해상도가 높은 양질의 결과를 나타내었다.

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

감사의 글

2007년 광운대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. EPRI, “NUREG 1824 - Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7 : Fire Dynamics Simulator (FDS)”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA(2006).
2. 지문학, 이병곤, 정래혁, “성능기반 화재모델(FDS)을 이용한 원전 방화지역 화재위험 분석조건에 대한 민감도 해석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.2, pp.98-104(2007).
3. ASTM, “E 1355 - 05a, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models”, pp.4-5, ASTM E American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (2005).
4. NIST, “Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide” (K. McGrattan, Editor), NIST Special Publication 1018, pp.65-69, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD(2004).
5. K. McGrattan and G.P. Forney, “Fire Dynamics

- Simulator (Version 4) User's Guide", NIST Publication 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, pp.27-36(2007).
7. 이덕희, 정우성, 이철규, 김선욱, "지하철 내장재료의 재료특성에 따른 화재안전도 평가", 한국철도학회, 2003년도 추계학술대회 논문집(III), pp.338-344(2003).