화재현장의 FDS 분석을 통한 액체가연물 관여 판단에 관한 연구

A Study on Determination of Liquid Fuel Involvement Through FDS Analysis of the Fire Scene

이승훈* · 최돈묵**

Lee, Seunghun*, and Choi, Donmook**

Abstract

Determining whether liquid combustibles are used is important while investigating a fire. In principle, involvement of liquid combustibles is investigated by chemical analysis. However, combustion and evaporation in the scene of fire make it difficult to determine the involvement of liquid fuel by chemical analysis of the fire residue. Therefore, as an alternative method for the determination of the involvement of liquid combustibles, the fire scene was simulated with FDS. The results were compared in terms of fire behavior and verified that additional conditions such as liquid combustibles were involved. Our results have confirmed that FDS verification is an effective method in spite of its limitations due to petroleum-based liquid combustibles that cause macroscopic effects on the fire behavior such as growth and spread of the fire.

Key words : Fire investigation, Liquid Fuel, Arson, FDS

요 지

화재현장 조사에 있어서 액체가연물의 사용여부의 판단은 매우 중요한 요소이다. 액체가연물의 판단은 원칙적으로 화학분석 결과에 근거하는 것이 원칙이다. 그러나 완전 연소와 증발 같은 현장의 한계로 인하여 현장 시료의 화학분석에 의한 석유류 양성반응의 결과를 받는 것은 매우 어렵다. 따라서 화재현장 액체가연물 관여여부의 판단을 위한 대안적인 방법으로서 화재 현장을 FDS로 모사하고, 그 결과를 화재거동의 관점에서 비교하여 액체가연물 등 별도의 조건이 관여되었음을 검증하였다. 현장에 관여된 석유류 액체가연물은 화재의 성장 및 확대 등 화재거동에 있어서 거시적 효과를 발생시키게 때문에 이러한 사례의 FDS 검증은 프로그램의 오차범위 및 한계에도 불구하고 효과적인 방법이라는 점을 확인하였다.

핵심용어 : 화재조사, 액체가연물, 방화, 화재시뮬레이션

1. 서 론

Fire Dynamic Simulation (FDS) 프로그램은 다양한 종류의 화재시나리오를 설명하기 위해서 많이 사용하고 있는 컴퓨터 화재 시뮬레이션 중의 하나이다. 2000년에 최초 버전이 배포된 이후 지속적으로 개발이 거듭되어 현재(2018년) FDS 6.7에 이르고 있지만 실물 화재에 비하여 여전히 컴퓨터만으로 해결하기에 부족한 한계를 가지고 있다. 저속 유동가

정, 사각의 지오메트리, 화재의 성장과 확산 모델에서의 한계, 연소와 열전달을 포함한 몇 가지의 한계가 남아 있다. 그러나 화재의 열 방출율을 지정한 상태에서 열 및 배기, 연소생성물의 이동을 확인하기 위한 목적일 경우 안정적으로 사용할 수 있다. 이 경우 모델은 수치 격자의 분해능에 따라 실험 측정치의 10~20% 오차 내에서 유속과 온도를 예측하며 화재실험에 비해 큰 오류를 유발하지는 않는다. 본 연구에서 수행하고자 하는 분석은 화재거동에 있어서

*정회원, 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발 조사관(E-mail: storm374@empal.com)

Member, Fire Investigator, Div. CSI, Seoul Police Agency

**교신저자, 정회원, 가천대학교 소방설비공학과 교수(Tel: +82-31-750-5716, Fax: +82-31-750-8749, E-mail: fire@gachon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. Fire & Disaster Protection Engineering Gachon University

현저한 차이를 유발할 수 있는 액체가연물의 관여 여부를 확인하는 것이므로 FDS의 오차율 20 %와 고려되는 한계 내에서 충분히 검증 가능한 것으로 사료된다.

2. 시뮬레이션의 개요

2.1 사례

사례의 현장은 168 m² 크기의 아파트로 내부는 침실 4개, 화장실 2개, 거실, 주방으로 구분된 구조이며 침실1, 거실, 침실2, 침실3과 인접한 발코니의 공간은 확장되어 각 침실과 거실의 공간으로 활용되고 있다. 사례 현장의 구조도에 확장·개조부위를 표시하여 Fig. 1에 제시하였다.

Fig. 1. The Compartment of the Scene

현장의 바닥재에는 액체가연물이 의도적으로 살포된 방화현장에서 관찰되는 풀-형태 연소패턴이 관찰되었다. 특히 거실과 침실4 사이의 복도 바닥에서 화재를 특정 방향으로 확산시키기 위해 액체가연물을 살포한 트레일러로 의심되는 바닥재의 연소패턴이 관찰되었다. 이러한 연소상황을 등소선으로 표시하여 Fig. 2에 제시하였다.

Fig. 2. The Burn Pattern of the Scene

현장의 연소정도와 상황을 Fig. 3에 제시하였다. 거실과 침실4에 이르는 복도의 중간에는 침실2, 침실3의 문이 열린 상태로 위치하였으나 이곳은 연소되지 않은 상태로 거실과 침실4가 집중적으로 연소되었다. 현장의 화재는 발화부로부터 점차 인접착화 방식으로 확산되는 일반적인 화재거동과 일치하지 않는 부자연스러운 연소의 흔적이 관찰되었다. 조사 당시 액체가연물이 살포된 것으로 의심되는 지역에서 유증 검지관을 이용한 석유류 물질 예비검사를 실시하였으며, 연소 잔해를 수집하여 석유류물질 검출여부에 대해 화학적 분석을 하였지만 예비검사와 분석결과는 각각 음성반응으로 확인되었다.

Fig. 3. The Fire Scene

2.2 시나리오 및 검증 범위

현장의 연소형태는 거실과 복도, 침실4에 액체가연물이 관여되었다는 가설과 부합한다. 그러나 현장에서 수집된 분석시료에서 석유류 물질이 검출되지 않았으므로 액체가연물 관여에 대한 확신 수준을 높이고자 FDS를 활용하여 모사 결과를 현장의 연소형태와 비교하였다. 어떠한 가설이 실제 화재현장의 화재패턴과 일치하는지 등 다음과 같은 항목에 대해 중점적으로 검토하였다.

- ① 거실에서 침실4로 향하는 복도의 바닥재 온도분포와 거실과 인접한 주방, 침실2의 온도분포를 확인하여 바닥재의 열변형이 현장과 같이 발생할 수 있는지를 확인하였다.
- ② 거실에서 화재가 발생하였을 때 인접한 주방이나 침실2의 연소가 진행되지 않은 상태로 침실4가 심하게 연소될 수 있는지를 확인하였다.

2.3 FDS 입력값

2.3.1 메시 그리드 및 구조

전체적인 시뮬레이션의 규모는 크기 $12.1 \times 15.1 \times 30.1 \text{ m}^3$ 이다. 미국 원자력 규제위원회(NUREG)의 보고서 NUREG-128에서 추천하는 적정 메시의 계산 방식을 따르는 Mesh Calculator (utfirersearch.com)를 이용하여 계산하였고 Table 1과 같이 추천된 3개의 종류 중 가장 조밀한(Fine) 격자크기를 시뮬레이션에 적용하였다. 메시의 각 면은 Vent를 이용하여 Grid Open 상태이다.

Table 1. Recommended Mesh Size

	Cell size (meter)	Quantity
Coarse	$0.302 \times 0.315 \times 0.314$	184,320
Moderate	$0.126 \times 0.126 \times 0.125$	2,764,800
Fine	$0.076 \times 0.079 \times 0.078$	11,796,480

구조는 포털 사이트 네이버(http://naver.com) 부동산에서 제공하고 있는 현장 아파트의 도면을 참조하였으며 시뮬레이션에 적용된 구획 및 구조는 Fig. 4에 제시하였다. 현장 조사 시 도면과 다르게 개조되었던 침실1, 거실, 침실3, 주방 등은 당시 상황과 동일하게 해당부위의 발코니가 확장된 구조로 모사하였다.

Fig. 4. The FDS Modeling of the Scene

2.3.2 시간

시뮬레이션 시간은 화재의 성장과 감쇠, 소멸을 충분히 확인할 수 있도록 1,000초로 설정하였으며, 시나리오는 1,000초 이내에서 화재상황이 종료되었다.

2.3.3 가연물

바닥재를 모사하기 위해서 2가지의 재료가 사용되었다. 액체가연물이 사용되지 않은 바닥재는 1 cm의 Yellow Fine (Incropera et al., 2007)로 설정하였다. 그리고 거실과 각 침실, 주방에 설치된 선반, 테이블 등은 Douglas Fir, Plywood 재질로 설정하였으며 소파 및 침대의 재질은 FDS-NIST에서 제공하는 예제파일에서 차용한 Upholstery로 구성되어 있으며 이것은 0.2 mm의 Fabric과 10 cm의 Form이 레이어로 설정하였다(Hietaniemi et al., 2004).

2.3.4 개구부

사례의 현장에서 닫혀 있고 유리가 깨지지 않은 창문은 시뮬레이션 상에서 표현하지 않았다. 화재현장의 창문을 형태를 분석해서 화재이전부터 열려져 있던 부분은 Hole로 모사하였다. 창문이 닫힌 상태였으나 화재에 의해서 파괴된 거실과 침실, 주방 등 각 유리창문은 연소상황에 따라서 사라지도록 모사하였다. 화재에 의해 파괴되는 유리는 5 mm 두께로 사용되었다. 기존의 연구(Lee et al., 1998) 및 NIST에서 수행한 화재현장 검증 시나리오(Madrzykowski et al., 1999)에서 창문에 근접하여 설치한 서모커플의 온도가 500 °C에 도달하였을 때 설정된 크기의 블록 단위로 사라지도록 하였던 방법에 비하여 본 시뮬레이션에서는 온도에 따라서 창문이 깨져 환기에 활용될 수 있도록 연소열이 없는 물질로 300 °C에서 연소되어 사라지도록 설정하였다. 이와 같은 설정으로 모사하였을 때 유리면과 인접한 대기의 온도가 약 500 °C에 이르렀을 때 셀 단위로 타서 없어지는 것을 확인하였으며, 연소열(HRRPUA)을 1.0 kW/m²로 매우 낮게 지정하였으므로 화재에 미칠 수 있는 열적인 영향을 최소화하였다.

2.3.5 점화원

점화원은 화재가 시작되었을 때 가장 빠르게 성장할 수 있는 거실 창문과 가까운 책장과 접한 소파의 팔걸이 부위에서 주어진 뜨거운 입자에 의해 착화되어 화재가 성장하도록 하였다. 선정된 위치는 화재의 성장에 영향을 미치는 가연물과 환기 조건이 매우 양호한 위치로 검증하고자 하는 가설에 대하여 가혹한 조건으로서 선정하였다. 시뮬레이션에 배치된 모습은 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 5. The Ignitor on the Sofa

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 입력 값은 실제 사례의 모든 가연물을 입력하지 않은 것이다. 대표적인 가연물들만을 배치하였으며 실제 현장에 있던 가구의 목재종류가 조사되지 않았으므로 유사한 수준의 다른 물성을 입력하였다. 따라서 본 연구의 시뮬레이션에서 확인된 시간에 따른 화재강도는 실제 사례와 일치하지 않을 것으로 추정된다. 그러나 본 시뮬레이션에서 확인하고자 하였던 목적은 단지, 사례 아파트의 구획·구조적 특징이나 창문의 위치 및 개방정도에 의한 영향 때문에 거실에서 발생한 화재가 침실4로 전진되었을 가능성의 유·무를 확인하기 위한 것이므로 입력값은 목적 내에서 적절한 것으로 사료된다.

시뮬레이션 결과, 화재의 성장과 온도분포는 발화부 중심으로 온도가 높고, 이곳으로부터 멀어질수록 온도가 낮게 나타났고 발화부로부터 점차 주변으로 확산되어가는 일반적인 화재거동의 범위를 벗어나지 않았으며 사례의 구획·구조와 개구부는 특별한 영향을 미치지 않았던 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 시뮬레이션은 목적을 해결하기 위한 범위 내에서 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.

3.1 화재상황

Fig. 6은 화재의 강도가 가장 높은 시기인 시뮬레이션 시간 336초의 바닥재 표면의 온도를 제시한 것이다. 온도 순으로 보면 발화부인 거실 부위(316°C)가 가장 높았으며 주방1(194°C), 주방2(147°C), 복도(102°C), 침실3(71°C), 침실4(50°C)의 순서로 온도분포가 나타났다. 초기부터 화재가 성장하여 소멸될 때까지 화재가 시작된 거실 중심으로 온도가 가장 높으며 이곳으로부터 멀어질수록 온도가 낮아지는 것으로 확인되었다.

Fig. 6. Floor Temperature at 360 Sec

Fig. 7에서 제시한 시간대별 바닥재의 온도분포를 확인해 보면 발화부 중심으로 온도가 높았으며, 이곳으로부터 멀어질수록 낮게 나타났다. 60초부터 바닥재의 가시적인 온도변화가 관찰되기 시작하였고, Fig. 7의 ㉠에서 제시한 120초에 이르러 거실과 인접한 주방의 온도가 점차적으로 상승하였

고, 거실의 바닥은 320°C 까지 상승하였으며 그 범위는 거실의 화염 연소 중인 가연물의 위치에 따라서 이동되며 지속적으로 상승하였다. 거실의 가연물 소진에 의해 화재가 감소하면서 Fig. 7의 ㉢에서 360초 이후에는 점차적으로 감쇠하며 소화되었다.

Fig. 7. Boundary Temperature by Time

구조의 내부를 가로지르는 X, Y 축의 대기 온도를 확인하기 위한 Slice temperature는 Fig. 8에 제시하였다. HRRPUV 및 바닥재의 온도변화에서 확인하였던 것과 동일하게 초기부터 화재가 성장하여 소멸될 때까지 화재가 시작된 거실 중심으로 온도가 가장 높으며 이곳으로부터 멀어질수록 온도가 낮아지는 것으로 확인되었다. 60초의 Slice temperature는 상층부의 수평적인 고온층이 형성되기 시작하였으며 Fig. 8의 ㉠에서 제시한 120초에 층고의 중간 높이까지 하강하였다. Fig. 8의 ㉢에서 제시한 240초에는 거실에서 상승 확대되는 열기층의 분포가 보이며 Fig. 8의 ㉤에서 제시한 360초

이후 화세의 감소로 인해 열기층은 점차적으로 약해지는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8. Slice Temperature by Time

3.2 현장과 비교

시뮬레이션의 결과는 사례의 화재현장 연소형태와 일치하지 않았다. 최고 강도인 시뮬레이션 시간 336초의 바닥재 표면의 온도는 거실 부위(316 °C)가 가장 높았으며 주방1(194 °C), 주방2(147 °C), 복도(102 °C), 침실3(71 °C), 침실4(50 °C) 순으로 나타났던 점, 공간 내 대기의 온도분포를 확인하기 위한 중요지점인 거실과 복도를 가로지르는 X, Y축의 Slice temperature에서 거실 소파부위의 온도가 가장 높으며, 이곳으로부터 거리가 멀어질수록 온도가 낮게 측정되었던 점은 일반적인 ‘열원으로부터 멀어질수록 온도가 낮다’는 기본적인 화재거동이 재현된 것으로 보인다. 화재거동 측면에서 가연물이 연속적으로 배치된 상황을 고려해보면 화재는 발화지점으로부터 순차적으로 인접한 가연물들을 연소시키며 침실4까지 전파되었을 것을 예상해 볼 수

있다. 사례에서는 거실과 침실4 사이에 위치한 침실2와 3이 연소되지 않은 상태이며 비교적 멀리 떨어진 거실과 침실4가 연소된 것은 발화부 중심으로 확산되어 가는 시뮬레이션의 결과와 일치하지 않았다.

시뮬레이션에 의한 결과는 거실에서 발생한 화재가 주변의 가연물을 태워 침실4까지 확산된 것이 아니라는 점, 또는 반대로 침실4에서 발생한 화재가 주변의 가연물을 태워 거실까지 확산된 것이 아니라는 점을 설명해 준다.

사례 현장의 비정상적 화재확산의 이유에 대한 가설로서는 거실과 침실4가 독립적으로 발화하였거나 거실과 침실4를 잇는 매우 잘 타는 물질, 예를 들자면 석유류 액체가연물이 존재하였을 가능성을 들 수 있을 것이다. 본 사례에서는 거실과 침실4를 잇는 복도의 바닥에서 열변형 흔적이 길게 늘어져 관찰되었다는 점으로 볼 때 후자의 가능성을 더욱 높게 평가할 수 있다.

4. 결론

액체가연물이 관여된 것으로 의심되는 현장에서 수집된 증거의 분석결과에서 양성반응을 얻지 못했던 사례에 대하여 연소패턴 분석을 통해 액체가연물이 관여되었다는 가설을 검증하기 위해서 FDS 시뮬레이션을 실시하였다. 액체가연물이 관여된 결과를 현장과 비교·검토하여 다음과 같은 결론과 감식착안 사항을 도출하였다.

- (1) 액체가연물이 관여되지 않은 시뮬레이션은 일반적인 화재성장 및 화재거동을 고려하여 예측할 수 있는 범위를 벗어나지 않았고 현장의 구획구조 및 개구부 조건은 거실과 침실4의 화염건인에 특별한 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.
- (2) 시뮬레이션의 결과는 사례 현장의 연소형태와 부합하지 않았으며 표현되지 않은 별도의 조건이 관여되었음을 확인하였다.
- (3) 별도의 조건에 대한 가설을 고려할 때 시뮬레이션 결과와 현장 복도 바닥의 열변형 상태를 고려하면 액체가연물이 길게 늘어져 있었을 것으로 추정된다. 즉 FDS 결과는 액체가연물이 관여되었다는 가설을 지지한다.

FDS의 활용은 컴퓨터 시뮬레이션의 한계를 충분히 인식하고 그 한계의 범위 내에서 사용해야 한다. 액체가연물이 화재현장에 관여되었을 때에는 연소확대 및 성장에 있어서 현저히 차이가 발생하는데 이러한 거시적인 변화는 FDS의 한계 내에서도 충분히 검증 가능한 것으로 사료된다.

본 연구의 사례와 같이 현장에서 수집한 연소 잔해로부터 화재촉진제의 양성반응 결과를 얻지 못한 경우, 화재패턴 분석의 가설을 검증하고자 할 때 유용하게 활용할 수 있는 것으로 사료된다.

References

- Hietaniemi, J., Hostikka, S., and Vaari, J. (2004). FDS simulation of fire spread comparison of model results with experimental data. VTT Building and Transport Working Papers 4.
- Incropera F., De Witt, D., Bergman, T., and Lavine, A. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Lee, S.K., Kim, J.H., Choi, J.W., and Lee, J.H. (1998). A experimental study on window glass breakage in compartment fires. *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 12, No. 3,

pp. 21-30.

- Madrzykowski, D.M., Forney, G.P., and Walton, W.D. (1999). *Simulation of the dynamics of a fire in a two-story duplex, Iowa, December 22, 1999*. National Institute of Standards and Technology Interagency/Internal Report 6854.
- Mesh Calculator. Retrieved from <https://www.utfireresearch.com/fds-mesh>

Received	February 25, 2019
Revised	February 27, 2019
Accepted	March 19, 2019