방화셔터와 피난계단이 존재하는 실내 환경의 화재 컴퓨터 시뮬레이션

유두열* · 양정민**

A Fire Computer Simulation of Inner Space with Fire Shutters and Refuge Stairs

Doo-Yul Yoo* · Jung-Min Yang**

요 약

본 논문에서는 방화셔터와 피난계단이 존재하는 실내 환경의 화재 시뮬레이션을 실시하여 방화셔터와 화재 확산 사이의 관계를 분석하였다. 화재 시뮬레이션용 상용 소프트웨어인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 사용하여 가상으로 설정한 실내 로비에서 화재 규모와 방화셔터의 개폐 여부를 변화시켜 가면서 모의실험을 실시하였다. 실험을 통해 화재실 벽면과 계단 입구의 온도 변화, 이산화탄소 농도 변화, 연기의 확산 등의 변수들을 구하고 결과를 검토하였다. 피난계단에서 온도와 이산화탄소의 분포는 화재규모와 개구부의 개폐 여부와 별 상관없이, 방화셔터의 부분 하강이 연기의 확산을 막고 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper analyzes the relation between fire shutters and fire spread by conducting fire simulation on inner space with fire shutters. Using Fire Dynamics Simulator (FDS), a commercial fire simulation software, the simulation is done on an ideal inner lobby, where fire size and the open/close of fire shutters are varied. Our simulation environment can derive significant fire parameters such as temperature variation of fire room walls and entrances of refuge stairs, variation of carbon dioxide, and soot spread. According to the simulation results, temperature and carbon dioxide distribution in refuge stairs have little dependence on vent open or close, but the part close of fire shutters blocks soot inflow to refuge stairs.

키워드

Fire Simulation, Fire Dynamics Simulator (FDS), Fire Shutters, Refuge Stairs, Refuge Safety
화재 시뮬레이션, Fire Dynamics Simulator, 방화셔터, 피난계단, 피난 안전도

1. 서 론

여러 가지 소방 시설의 확충 및 시설 기준의 강화에도 불구하고 건축물 실내에서 발생하는 화재는 여전히 사람의 안전에 가장 위협적인 존재 중 하나이다. 건축물에서 화재가 발생하게 되면 가연물의 연소에

의한 연소열, 연기, 연소 가스 등 다양한 연소생성물이 발생한다. 이러한 연소생성물 가운데 대형 고층건물에서 발생하는 화재 시 많은 인명피해를 입히는 주원인으로 지목되는 것이 연기(soot)에 의한 질식이다. 연기는 건물 내에서 확산되는 속도가 매우 빠르기 때문에 그 피해는 매우 크다. 따라서 화재발생 시 연기

* 부경대학교 소방공학과(yoo210@nate.com)

** 교신저자(corresponding author): 경북대학교 전자공학부(jmyang@ee.knu.ac.kr)

접수일자 : 2013. 09. 06

심사(수정)일자 : 2013. 10. 21

게재확정일자 : 2013. 11. 15

의 확산 및 관련 화재 변수를 정확하게 예측하고 이러한 위험요인을 피해 안전한 장소로 대피할 수 있는 적절한 피난동선을 구축하는 작업은 재난방지를 위해서 반드시 필요한 일이다[1-3].

본 논문에서는 건축물 내부에 설치하는 소방 시설 중 방화셔터와 피난계단에 주목한다. 건축법시행령 제46조에 의하면 방화구획은 내화구조로 된 바닥, 벽 및 자동 방화셔터를 포함한 갑종(甲種)방화문으로 구획하도록 규정된다(건축법 시행령 제46조(방화구획의 설치) 참조). 이 중 방화셔터는 방화구획에서 내화벽으로 구획하기 불가능한 장소에 한하여 설치하며, 갑종방화문으로부터 3m 이내에 설치하도록 되어 있다. 하지만 방화셔터는 내화벽이나 방화문에 비해 구획 성능이 뒤떨어지며, 차연 성능이 없음에도 불구하고 방화구획으로 인정하고 있으므로 방재 역할을 하는 데 문제가 많다. 또한 방화셔터는 관리자의 유지관리 능력의 부족으로 제대로 폐쇄가 되지 않아 대형 사고를 유발하는 경우가 종종 있다.

피난계단은 대형 건축물의 수직피난동선을 구성하는 중요한 소방 시설이다. 점점 고층화되고 심층화되는 최근 건축물의 구조로 인하여 발화점으로부터 안전한 장소까지의 수직피난동선이 매우 길고 제한적이 되는 경우가 많이 생긴다. 따라서 화재발생 시 각 층에 거주하고 있는 재실자의 안전한 피난동선 확보를 위하여 피난계단은 어떠한 위험 상황에서도 최대한 안전한 공간으로 보장되어야 한다[45].

본 연구의 목적은 방화서터와 피난계단이 존재하는 실내 환경의 화재 시뮬레이션을 실시하여 방화서터와 화재 확산 사이의 관계를 분석하는 것이다. 대표적인 화재 시뮬레이션용 상용 소프트웨어인 FDS(Fire Dynamics Simulator)[6]를 사용하여 가상으로 설정한 실내 로비에서 화재규모와 방화서터의 개폐 여부를 변화시켜 가면서 모의실험을 실시하였다. 연기 확산을 포함하여 발화점과 피난계단에서의 온도 변화, 이산화탄소 농도 변화, 연기의 확산 등의 변수들을 구하고 결과를 검토하였다. 본 연구에서 수행한 모의실험의 분석 결과 화재실과 피난계단의 온도와 이산화탄소 변화는 방화서터의 개폐 여부와 별 상관없이 연기의 유입 속도는 방화서터의 1차 계폐가 일정한 차단 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

II. 화재 시뮬레이션 환경 설정

본 논문에서 화재 시물레이션용 환경으로 공공장소의 주 출입 장소인 로비를 설정하였다. 그림 1은 본 논문에서 사용하는 가상의 로비를 그린 것이다. 로비의 크기는 $12\text{m} \times 10\text{m} \times 6.4\text{m}$ 이며 연기의 유동해석을 좀 더 구체적으로 표현하기 위해서 복층 구조로 설계되었다. 지상1층 로비의 크기는 $5.8\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}$, 계단실의 크기는 $6.0\text{m} \times 10\text{m} \times 6.4\text{m}$ 로 각각 설정하였다. 그림과 같이 주 출입문 한 개와 계단으로 출입할 수 있는 방화셔터, 그리고 1층에서 2층으로 연결되는 계단실에 개구부를 각각 설정하였다.

그림 1. 화재 시뮬레이션용 가상 로비 : (a) 정면도, (b) 측면도

Fig. 1 Imaginary robbery for fire simulation : (a) front view and (b) lateral view

방화셔터 출입문의 중심을 지나는 수직축을 따라

점 $P_1 \sim P_5$ 를 정하여 0.3m 간격으로 열전대(thermo-couple)를 배열하였고(그림 1(b)), 계단참의 중심을 지나는 축을 따라 점 $P_6 \sim P_9$ 를 정하고 역시 0.3m 간격으로 열전대를 배열하였다(그림 1(a)). 이 열전대는 화재발생 후 시간경과에 따라 변화하는 온도와 연기, 그리고 이산화탄소의 체적 농도를 기록하는 지점이다.

열방출율은 발화점 위치에서 360kW/m^2 라고 설정하였고, 화재발생 전에 방화셔터가 완전 개방된 경우와 절반 개방(1.5m 하강)된 경우에 대해서 각각 시뮬레이션을 수행하였다. 화재발생 순간을 $t=0$ 으로 놓고 두 경우에 대해서 모두 600초 동안 시뮬레이션을 수행한 다음 결과를 비교 분석하였다. 또 그림 1의 $X=7.0\text{m}$ 지점, 즉 피난계단이 차지하는 Y-Z 평면이 화재발생 후 보이는 온도, 연기, 이산화탄소량 등의 변화도를 살펴보고, 수직축에 대한 평균 온도를 측정하여 분석하였다.

III. 시뮬레이션 결과

3.1 방화셔터 완전 개방

먼저 화재규모가 360kW/m^2 이고 화재발생 전 방화셔터가 완전히 열려 있는 경우에 대해서 화재 시뮬레이션을 수행하고 결과를 도출한다. 그림 2는 화재 시뮬레이션의 기본 결과 중의 하나인 열방출율에 의한 화재실 벽면의 온도변화이다. 발화점 바로 위 천장으로부터 열이 방사형으로 퍼지는 사실이 확인된다. 또한 시각 $t=600\text{s}$ 에서 개방된 방화셔터까지 최고(最高) 열이 접근하여 옆방으로 전도되기 직전임을 알 수 있다.

주 피난동선을 형성하는 피난계단 입구에서의 온도 변화 역시 화재 시뮬레이션의 중요한 변수 중 하나이다. 그림 3은 방화셔터가 개방된 상태에서 시뮬레이션했을 때 얻어진 계단 입구 지점 $P_1 \sim P_5$ 에서의 온도 변화 그래프이다. P_5 에서의 온도는 상온과 거의 같게 유지되지만 P_4 에서부터는 점차 온도가 상승하여 P_3 의 온도는 70°C 정도를 유지함을 볼 수 있다. 가장 높은 지점인 P_1 은 방화셔터가 1차 하강된 구획부분에 막혀 고온의 기류가 정체되면서 오히려 P_2 보다 낮은 온도 분포를 나타냈다. P_3 에서 온도가 가장 높은 이유는 P_3 이 방화셔터 1차 하강 하단부에 위치하고 있으며, 이

위치에서 발화점에서 생긴 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 정도의 기류가 계단으로 유입되기 때문이다.

그림 2. 화재실의 벽면 온도 변화(열방출량= 360kW/m^2 , 방화셔터 개방) : (a) $t=150\text{s}$, (b) $t=300\text{s}$, (c) $t=450\text{s}$, (d) $t=600\text{s}$

Fig. 2 Wall temperature variation(fire size= 360kW/m^2 , fire shutter open) : (a) $t=150\text{s}$, (b) $t=300\text{s}$, (c) $t=450\text{s}$, (d) $t=600\text{s}$

그림 3. 계단 입구 $P_1 \sim P_5$ 에서의 온도 변화(열방출량= 360kW/m^2 , 방화셔터 개방)

Fig. 3 Temperature variation at the refuge stair entrance(fire size= 360kW/m^2 , fire shutter open)

그림 4는 $X=7.0\text{m}$ 지점, 즉 피난계단이 차지하는 Y-Z 평면이 보이는 시간에 따른 온도 분포를 표시한 것이다. 방화셔터가 완전히 개방된 경우에는 각 시간

대별로 온도 분포의 큰 차이점은 나타나지 않는다. 하지만 방화셔터 하단을 통과하여 상승하는 열기의 흐름이 상승기류를 형성하여 계단 천장을 따라 확산되는 현상을 보여주고 있다.

그림 4. $X=7.0\text{m}$ 에서의 온도 분포(열방출량= 360kW/m^2 , 방화셔터 개방) : (a) $t=120\text{s}$, (b) $t=240\text{s}$, (c) $t=480\text{s}$, (d) $t=600\text{s}$

Fig. 4 Temperature distribution at $X=7.0\text{m}$ (fire size= 360kW/m^2 , fire shutter open) : (a) $t=120\text{s}$, (b) $t=240\text{s}$, (c) $t=480\text{s}$, (d) $t=600\text{s}$

그림 5. 계단 입구에서의 이산화탄소 농도 변화(열방출량= 360kW/m^2 , 방화셔터 개방)

Fig. 5 Carbon dioxide density at the refuge stair entrance(fire size= 360kW/m^2 , fire shutter open)

그림 5는 화재규모가 360kW/m^2 이고 방화셔터가 화재발생 전 열려 있는 경우의 화재 시뮬레이션에서 얻어진 계단입구에서의 이산화탄소 농도 변화이다. 유독

성 연기와 함께 이산화탄소 농도의 급격한 증가 역시 화재발생 시 인명 피해를 일으키는 주원인이다. 그림 5를 보면 시간의 경과에 따라 계단내부의 이산화탄소의 농도 분포는 큰 변화가 없다. 방화셔터 1차 하강부 분에서는 이산화탄소의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다, 셔터 하부의 P₃ 지점에서 이산화탄소의 농도가 상대적으로 높게 나왔다.

그림 6. 방화셔터 작동 전 계단내부의 연기분포(열방출량= 360kW/m^2 , 방화셔터 개방) : (a) $t=120\text{s}$, (b) $t=360\text{s}$, (c) $t=480\text{s}$, (d) $t=600\text{s}$

Fig. 6 Soot density distribution in the refuge stair(fire size= 360kW/m^2 , fire shutter open) : (a) $t=120\text{s}$, (b) $t=360\text{s}$, (c) $t=480\text{s}$, (d) $t=600\text{s}$

마지막으로 그림 6은 화재실에서 발생하는 연기의 이동 분포를 나타낸 그림이다. 연기 이동 분포는 화재 시뮬레이션이 가지는 공간 모델 방법에 따라 다르게 계산된다. 공간 모델 중 Zone 모델은 화재로 발생하는 연기를 상부의 고온 연기층과 하부에 발생하는 저온의 공기층 등 두 개의 공간으로 구분하며, 각 부분에서 온도나 농도 등의 모든 성질이 균일하다고 가정한다. 그러므로 상호작용에 의한 과정들인 물질 전달, 복사, 혼합, 유체 유동 등에 대한 실험 관계식과 상미분방정식의 해를 구하는 데 유리하다. 이에 비해 본 연구에서 사용하는 FDS는 Field 모델을 사용한다[7]. Field 모델은 공간을 수많은 셀(cell) 형태로 분할하여 셀에 대한 에너지의 유동을 실시간으로 해석하며, 각각의 공간에 대한 정보를 자세히 시각화 할 수 있다. Field 모델로부터 구한 그림 6의 결과를 보면 시간 경과에

따라 계단내부의 연기의 분포는 시각 $t=120s$ 이후에서 큰 변화가 없다. 이러한 이유는 출입문과 상층부로 연기의 수직 확산이 지속적으로 유지됨으로서 계단 내에 연기가 축적되지 않기 때문이라고 분석된다.

3.2 방화셔터 절반 개방

다음으로는 열방출량은 $360kW/m^2$ 으로 동일하나 방화셔터가 화재발생 시 절반 개방된 경우에 대해서 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 방화셔터가 절반쯤 개방되는 상황은 건물 방재 책임자가 화재발생 시 셔터 차단을 용이하게 하기 위해서 흔히 설정하며, 방재 책임자의 부주의로 개폐가 완전하게 안 되어 발생할 수도 있다. 화재 경과 시간(0~600초) 등 다른 시뮬레이션 조건은 모두 앞의 경우와 동일하게 설정한다.

그림 7은 계단입구의 온도변화 결과이다. 방화셔터가 완전 개방된 시나리오의 결과인 그림 3과 비교했을 때 $P_1 \sim P_3$ 지점에서는 방화셔터 부분 폐쇄의 영향으로 온도가 $20^\circ C \sim 24^\circ C$ 정도로 유지되지만 P_3 과 P_4 지점에서는 $30^\circ C$ 정도 온도가 상승하였다. 이것은 화재 발생 초기부터 방화셔터 하부로 기류의 흐름이 가능하기 때문에 P_3 과 P_4 지점에서 상대적으로 높은 온도가 나타난 것으로 보인다. 하지만 그림 3과 비교하면 화열에 의한 영향이 계단 내에는 거의 미치지 못한다는 사실을 알 수 있다.

그림 7. 계단 입구 $P_1 \sim P_5$ 에서의 온도 변화(열방출량= $360kW/m^2$, 방화셔터 절반 개방)

Fig. 7 Temperature variation at the refuge stair entrance (fire size= $360kW/m^2$, fire shutter half open)

그림 8은 $X=0.7m$ 지점, 즉 계단 단면에서의 온도 분포 그래프이다. 그림 4와 비교했을 때 아래 계단 부분에서 온도가 떨어졌음을 확인할 수 있다. 이것은 방화셔터의 부분 차단 역할이 구동되어 일종의 차단창 구획이 형성되어 계단 내로 열기류의 흐름이 대부분 차단된 현상을 보여준다.

그림 8. $X=0.7m$ 에서의 온도 분포(열방출량= $360kW/m^2$, 방화셔터 절반 개방) : (a) $t=120s$, (b) $t=240s$, (c) $t=480s$, (d) $t=600s$

Fig. 8 Temperature distribution at $X=0.7m$ (fire size= $360kW/m^2$, fire shutter half open) : (a) $t=120s$, (b) $t=240s$, (c) $t=480s$, (d) $t=600s$

그림 9. 계단 입구에서의 이산화탄소 농도 변화(열방출량= $360kW/m^2$, 방화셔터 절반 개방) : P_5 지점만 표시

Fig. 9 Carbon dioxide density at the refuge stair entrance (fire size= $360kW/m^2$, fire shutter half open) : only P_5 is displayed

그림 9는 이산화탄소 농도 분포 그래프이다. 방화셔터의 부분폐쇄로 인하여 $P_1 \sim P_4$ 지점에서는 이산화탄소의 영향이 거의 없었고(그림 9에서 표시 안 함), P_5 에서도 방화셔터 하단부에서만 이산화탄소의 분포가 검출되었다. 하지만 시간의 경과에 따라 방화셔터 하부의 이산화탄소의 분포의 변화는 별로 없었다.

마지막으로 그림 10은 화재실에서 발생하는 연기의 이동 분포로서 방화셔터가 완전 개방된 경우와 가장 차이를 보이는 실험 결과이다. 앞 경우는 방화셔터의 제연 경계벽으로서의 효과가 거의 없었지만, 절반이 폐쇄된(1.5m 하강) 현 상태에서는 계단 내로 연기의 침투가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 부득이하게 계단입구에 방화셔터를 설치할 경우 1차 하강범위를 결정하는 중요한 결과로서, 피난동선을 결정할 때도 큰 영향을 미친다.

그림 10. 방화셔터 작동 전 계단내부의 연기분포(열방출량=360kW/m², 방화셔터 절반 개방) : (a) t=120s, (b) t=360s, (c) t=480s, (d) t=600s

Fig. 10 Soot density distribution in the refuge stair(fire size=360kW/m², fire shutter half open) : (a) t=120s, (b) t=360s, (c) t=480s, (d) t=600s

IV. 결 론

화재 발생 직후 화재의 확산을 막고 피난 경로를 확보하기 위해서는 방화셔터의 올바른 동작이 반드시 수행되어야 한다. 본 논문에서는 로비에서 발생하는 화재 시 방화셔터가 피난계단에 미치는 여러 가지 원인을 분석하기 위해서 FDS를 이용하여 화재 시물레

이션을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 모의실험의 분석 결과 화재실과 피난계단의 온도와 이산화탄소 변화는 방화셔터의 개폐 여부와 별 상관없이 없으나, 연기의 유입 속도는 방화셔터의 1차 계폐가 일정한 차단 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 추후 연구로서 화재발생 시 방화셔터 하강 높이에 따른 온도 변화를 분석할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Yong-Jae Lee and Beom-Jae Lee, "A study on the evacuation character and regulation for high-rise apartment buildings in Korea", Transactions of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 13-21, 2000.
- [2] Ki-Jung Kim, "A study on the implementation of digital anti-fire monitoring system with multipoint communication protocol", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 6, pp. 1423-1428, 2012.
- [3] Wan-Pyo Hong and Soon-Hwa Lee, "Design of transport network on the digital TRS system for the emergency and disaster communication", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 5, No. 6, pp. 555-562, 2010.
- [4] Jin Yong Jeong, Gi Bae Hong, Jae Ha Lee, and Hong Sun Ryou, "An experimental study of flow behavior in underground stairway fire", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 821-823, 2003.
- [5] Yun Seok Ko, "The arc fault determination method for the electric fire prevention", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 3, No. 4, pp. 260-265, 2008.
- [6] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, and R. Rehm, "Fire Dynamics Simulator (ver. 5) Technical Reference Guide," NIST, Gaithersburg, Maryland, 2007.
- [7] Fire Dynamics Simulator User's Guide (ver. 6), National Institute of Standards and Technology (NIST), 2012.

저자 소개

유두열(Doo-Yul Yoo)

2010년 부경대학교 안전공학과 졸업(공학석사)

2012년~현재 부경대학교 소방공학과 박사과정 재학 중

2010년 10월~2013년 5월 (주)정엔지니어링 소방감리(상주)

2013년 6월~2013년 현재 (주)유일방재엔지니어링 소방감리(상주)

※ 관심분야 : 화재 시뮬레이션, 방재 시스템

양정민(Jung-Min Yang)

1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학사)

1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학석사)

1999년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학박사)

1999년~2001년 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어 기술연구소 선임연구원

2001년~2013년 대구가톨릭대학교 전자공학과 교수

2013년~현재 경북대학교 전자공학과 부교수

※ 관심분야 : 비동기 순차 머신 제어, 실시간 시스템, 화재 시뮬레이션