컴퓨터 모델링을 통한 화재현장 재현

Fire Scene Reconstruction Using Computer Modeling

Flora Chen, P.E.

화재와 폭발 조사에 관한 NFPA 921 가이드는 화재조사 단체에서 가장 널리 용인되는 실무 규약 중의 하나이다. 이 가이드는 과학적인 접근이야말로 복합적인 화재를 조사하는 가장 적절한 기초방법이라고 말한다. 그리고 과학적인 방식을 사용하는 발단된 감식분야에서도 화재 공학적 분석은 중요한 부분이기도 하다.

화재조사 단체에서는 복합적 분석을 위해서 화재 공학에서 일반적으로 인정되어 사용되는 화재역학 시뮬레이터(FDS: Fire Dynamics Simulator)를 채택하여 왔다. FDS의 이러한 대폭적인 수용은 무상으로 이용할 수 있다는 점과 정보를 삼차원적으로 나타내주는 가시성으로 인해 가능했다. FDS는 다양한 화재를 연구하고 모델링하고 조사하는데 사용되어져 왔는데 세계무역센터를 비롯하여 아파트, 주택, LPG 누출, 벽난로, 화염 전파 및 가스 확산 등이 그 예다.

이 글은 FDS를 통한 화재현장을 재현해 보는 연구로 2005년 12월 Arizona Peoria 지역 이동식 주택에서 발생한 치명적인 화재에 대하여 논의해 보겠다. 이 모델은 화재 발화, 성장, 확산, 그리고 화재피해자들이 겪게 되는 궁극적인 곤경상태를 조사하는데 사용되어진다. 그 화재는 [표 1]의 보여 지듯이 어른 1명과 3명의 아이들, 즉 4명의 사망자를 발생시켰다.

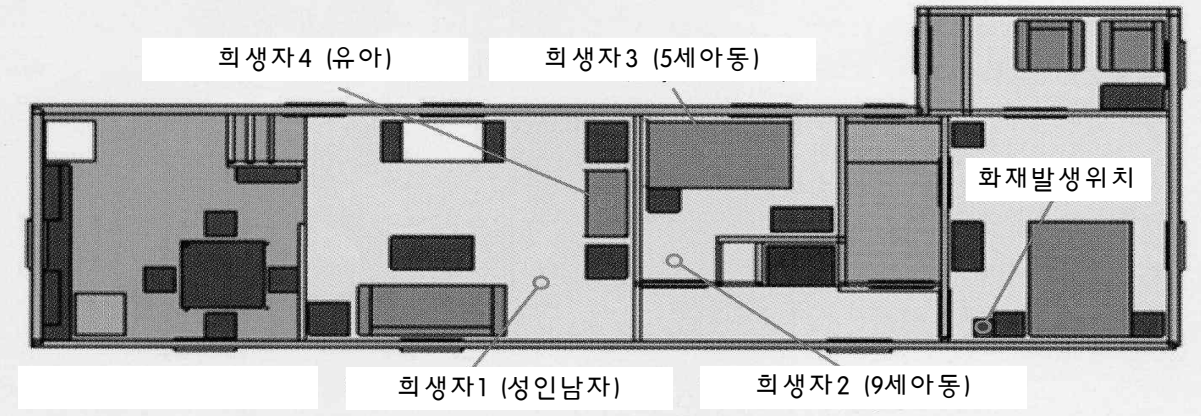
[표 1] 화재 희생자

희생자	나이	위치
희생자 1	성인 남자	복도 입구. 얼굴은 바닥을 향함. 침실로 향한 것으로 추정
희생자 2	9세 아동	침대 발치에 있는 창문 아래
희생자 3	5세 아동	2단 침대 상층부
희생자 4	5개월 유아	유아용 침대 안

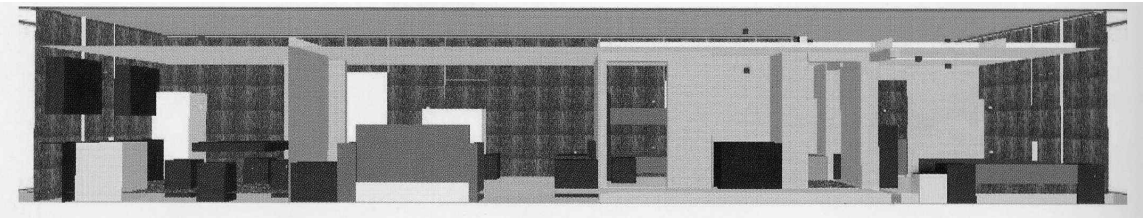
□ 화재 현장 재현

화재 발생 이전 조건은 현장 시찰과 인터뷰, 도표, 사진에 의해 결정되었다. [그림 1]의

평면도와 [그림 2]의 입면도는 1982년에 생산된 단층형 이동식 주택을 묘사해준다. 건물의 총 연면적은 대략 76 ㎡(820 ft^2)이며, 내장재는 합판, 그리고 외장재는 금속판재이다. 화재경보설비나 스프링클러설비는 설치된 바 없다.



[그림 1] 평면도



[그림 2] 입면도

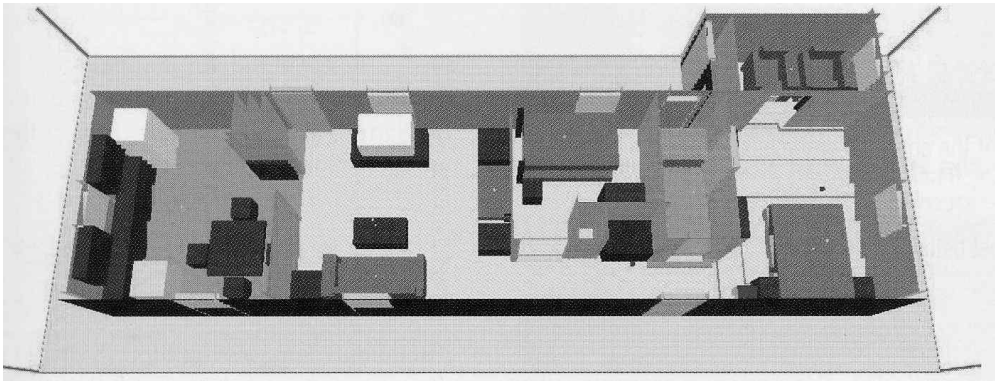
화재 성장에 미칠 초기 화재하중과 배치의 영향력을 정확히 예측하는 것이 중요하기 때문에 FDS 모델[그림3]에서 표시되는 화재 발생 위치는 신중히 재현되었다. 그러나 여러 가지 이유에서 화재 현장을 정확하게 재구성 하는 것은 불가능했다. 그래서 주요 가구들을 모델에 배치하는 반면, 몇몇 작은 요소들은 모델 입력 내용에서 제외되었다. 예를 들어, 의류나 아이들의 장남감과 같은 것들은 모델링되지 않았다. 이러한 잡다한 가연성 연료 항목들은 시뮬레이션의 전체적인 내용에 있어서 화재 진행이나 분석 결과를 크게 변화시키지 않을 것으로 사료되기 때문이다. 이를 확신하기 위해서 민감도 분석이 진행되었다.

□ 화재 전개

화재사고에 대한 사전 조사를 기반으로 주요한 화재가 전기, 흡연, 발화성 액체 또는 천연 가스를 원인으로 시작된 것은 아니라고 결론지었다. 수립된 증거와 정보로 결정된 바로는, 화재의 발단은 침실 중의 한 곳에서 시작되었다. 거주자들이 일상적으로 사용한 것으로 알려진 촛불이 발화의 근원으로 추정되었는데, 촛불 바로 옆의 휴지통으로 불이 옮겨 붙었을 것이다.

하지만 화재가 시작되었을 당시 집 밖에 있었던 생존한 가족에 따르면, 그녀가 집을 나왔을 때 양초는 점등되어있지 않았다고 증언했다. 이점이 화재의 원인을 "미결"로 남겨놓았다.

불은 [그림 1]에서 나타나듯이 안방에 위치한 휴지통에서 시작되었다고 결정되었다. 그래서 쓰레기더미가 화재 입력 초기값으로 모델링에 적용되었다.



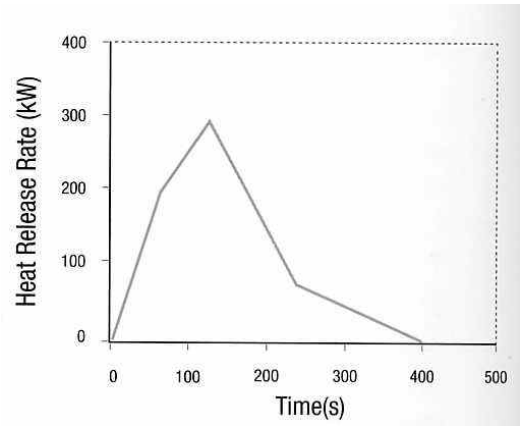
[그림 3] 집의 FDS 모델

[표 2] 화재 입력 초기값

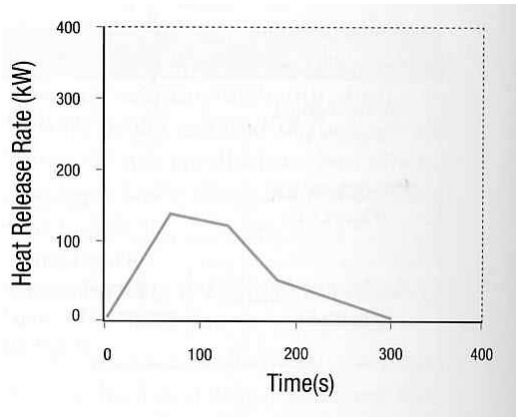
초기 화재	해 설
화재 시나리오 1(그림4)	쓰레기 꾸러미 2개, 총 질량=2.34 kg(5.1 lb)
화재 시나리오 2(그림5)	쓰레기 꾸러미 1개, 총 질량=1.17 kg(2.6 lb)
화재 시나리오 3(그림6)	12개 우유팩이 들어있는 작은 공간(6.6 ℓ)의 플라스틱 휴지통의 자유 화재 이 화재 초기값은 50KW 램프를 10초안에 밝힐 수 있으며 200초를 밝히다가 그 후 희미해지고 300초 후에는 불이 꺼질 정도로 추정된다.

SFPE 핸드북은 12개 우유팩이 들어있는 작은 실내공간(6.6 ℓ용량)의 플라스틱 휴지통은 열 방출양이 대략 200초 동안 50㎾ 정도라고 한다. 나아가 핸드북은 50㎾에서 300㎾까지의 범위는 평범한 주택, 사무실, 비행기 또는 유사하게 수용된 쓰레기봉투와 쓰레기통으로부터 예상되는 대부분의 화재를 포용한다고 말한다. [표 2]에 열거된 바처럼 세 가지 화재의 경우를 모델링 했다.

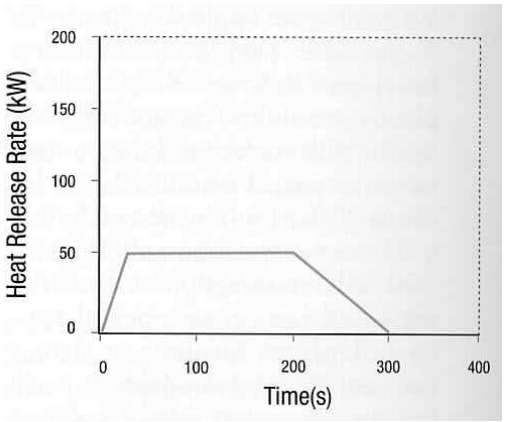
화재 시나리오 1은 기본 가정으로 사용되었다. 시나리오 2와 3은 민감도 분석의 일환으로 연구되었다. 민감도 분석이 실시된 이유는 화재 조건을 달리하여 설계할 때 그 조건이 미치는 영향 정도를 이해하는 것이 중요하기 때문이다.



[그림 4] 화재 시나리오 1



[그림 5] 화재 시나리오 2



[그림 6] 화재 시나리오 3

□ 결과와 분석

플래시오버 현상은 보통 상부의 기온이 500℃(900°F)~600℃(1,100°F)까지 도달했을 때, 그리고 바닥면에 도달하는 방사 에너지가 대략 20㎾/㎡일 때 일어난다. 축소 제작된 실험용 구획실에서는 450℃(850°F)에서 플래시오버가 발생했다고 보고되었다. 일반적으로 플래시오버 이후의 화재에서는 고온과 유독 가스의 농축, 그리고 낮은 산소 농도로 생존이 불가능하다.

모델에 따르면 천장은 2.2분 정도에 발화되었다. 방은 4분 정도에 플래시오버가 발생했고, 그때 화재는 복도로 확산되었다. 거실은 7.5분에, 마지막으로 주방은 8.5분에 화염에 휩싸였다. 화재 전개 모습은 [그림 7]과 같다.

[그림 8]은 1분 이후의 화재 현상이며, [그림 9]는 화재 현장에서 수집된 증거와 일치하는 화염의 확산 양상을 보여준다. 거실에 위치해 있는 모델링된 소파는 실제 현장사진과 아주 유사하여 그 상관성을 증명해준다.

화재 희생자들이 피신할 수 있는 능력을 상실했을 시간을 추정하기 위하여 유독성과 열기의 영향이 평가 되었다. 유독성 화재 가스가 사람들에게 미치는 영향을 평가하기 위

한 실용적인 방법은 FED개념(Fractional Effective Dose)이다.

Modeling Effort의 측면에서 모델에서의 데이터 샘플링 위치들은 희생자들이 발견된 곳으로 정해졌다.

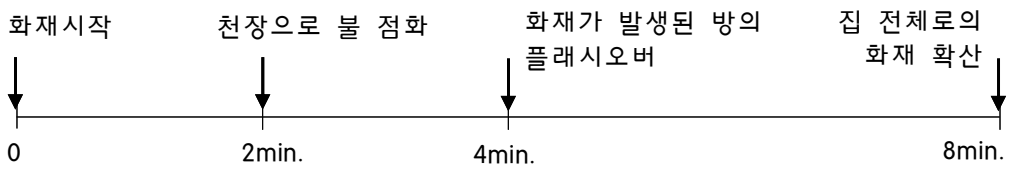
FED를 사용하여 계산된 무능력 시각은 [표 3]에 요약 표시했다. [표 3]의 데이터들은 화재로 발생한 열기와 유독성 가스는 희생자들을 대략 동일한 시간에 무능력하게 만들었을 것이라고 나타내 준다. 그리고 플래시오버 현상 이전 시간인 6~7분 사이에 아마도 희생자들은 피신 능력을 상실했음을 데이터를 통해 알 수 있다. 아이들은 일산화탄소를 어른들 보다 훨씬 빨리 마시고 쓰러졌을 것이다. 따라서 예측된 무능력 시간은 아이들에게는 과대평가 되었던 것 같다.

[표 3] 화재 입력 초기값

장소	무능력	무능력	예측
	유독성 가스로 인한 소요시간(초)	열기 노출에 의한 소요시간(초)	무능력 시간(초)
거실 소파(희생자 1, 잠자는 자세)	400	400	400
거실(희생자 1, 서있는 자세)	500	400	400
침실(희생자 2, 기어가는 자세)	400	400	400
침실(희생자 3, 잠자는 자세)	500	400	400
거실 유아용 침대 (희생자 4, 잠자는 자세)	400	400	400

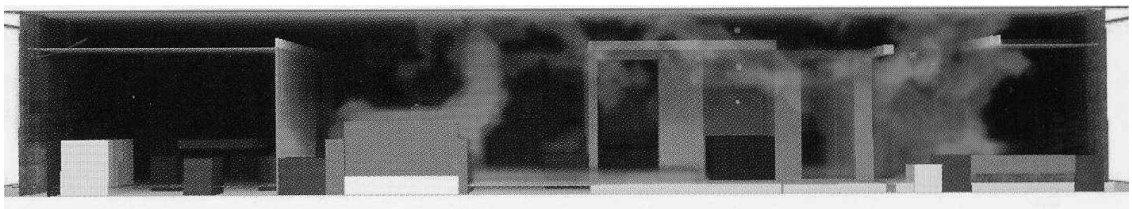
일산화탄소의 영향으로 어른 희생자의 죽음을 충분히 설명할 수 있다. 대략 40% COHb 또는 더 낮은 농도에서 의식을 잃게 되었을 것이다. 50~70%까지의 COHb 농도 또는 더 낮은 농도에서 사망이 예측된다.

어른 사망자는 침실 내 소파에서 잠이 들기 전에 어느 정도의 술을 마셨던 것으로 판명되었다. 초기 화재 진행 상황 동안 일산화탄소는 그를 더 깊은 수면 상태로 몰아넣는 효과를 발휘했을 것이다. 화재가 발생된 방에서 플래시오버 현상으로 유리가 깨지기 시작하자 그 남자는 잠에서 깨었을 것이나 수평으로 뉘어져있던 몸을 걷는 자세로 일으켜 세우는 동작이 CO의 흡수를 촉진시키는 결과를 초래했을 것이다. 그래서 즉시 소파 옆에 주저앉게 되었고 그는 그곳에서 발견되었다. 복도의 입구 바닥에 얼굴을 바닥으로 향한 체 누워있던 성인 남성의 위치는 합리적인 분석결과와도 일치한다. 열기의 노출 또한 주요 원인일 수 있다. 2.5 ㎾/㎡은 방사열의 한계점이다.



[그림 7] 시간에 따른 화재 전개 양상

[그림 8] 모델에서의 화재 성장 모습(1분경과)



[그림 9] 모델에서의 화재 확산 모습(7.5분경과)

이 한계점 밑으로도 방사열은 몇 분 동안은 견딜 만하다. 하지만 한계점 이상에서는 거주자들은 무기력한 상태가 되기 전 단지 몇 초간만 신체 기능이 유지될 뿐이다. 보호되지 않은 피부가 견딜 수 있는 대류열의 한계 온도는 120℃(248°F)이다. 이 온도 이상에서는 화상과 함께 급속도로 깊은 상처를 입게 된다. 이 한계 온도보다 낮은 대류열은 노출된 시간에 따라 고체온증을 유발하여 무기력 상태를 초래할 것이다.

화재 사건이 소방서에 보고되어 대응하기까지 10~12분의 시간이 흘렀을 거라고 추정된다. 희생자들은 6~7분 사이에 피신할 능력을 상실했을 것 같다. 소방대가 화재 현장에 도착했던 때 피신할 수 있는 창문의 크기는 극도로 작았다.

□ 민감도 분석

민감도 분석은 주어진 모델 출력 값이 입력 변수에 얼마나 영향을 받는지를 결정하기 위해 이용된다. 이 단계는 연구결과의 질과 신뢰도를 체크하기 위한 중요한 단계이다. 만약 입력 값의 작은 변동이 출력 값의 큰 차이를 가져온다면 이는 출력 값이 입력 변수에 민감하다고 평가된다. 이것은 합리적인 결과를 취득하기 위해서는 입력 변수가 매우 정확히 결정되어야 한다는 것을 의미한다. 반대로 변수 값의 차이가 아주 적은 차이의 결과 값을 보여줄 때는 출력 값이 변수에 민감하지 않다는 것이다. 이것은 입력 값의 정확도가

별로 중요하지 않다는 것을 의미한다.

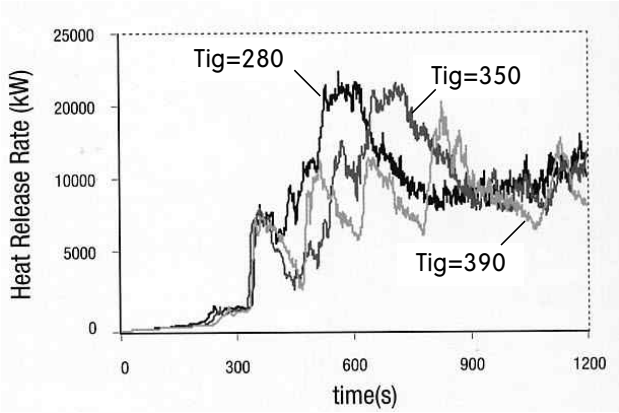
4가지 화재 입력 변수에 따른 6가지 화재 시나리오는 초기 입력 화재에 미치는 시뮬레이션의 민감도를 평가하기 위하여 연구되었다. 결과는 [표 4]에 요약 정리되었다. 휴지통 옆에 있는 테이블 가장자리의 표면 전체가 천으로 덧대어져 있는 경우의 시나리오는 화재가 발생한 곳 주위에 존재하는 가연성 물품의 영향정도를 실험하기 위해 사용될 수 있었다는 것은 중요한 점이다.

실험 결과는 일단 자유 화재 연소가 시작되면 최고 열방출율과 평균적인 열방출율 모두 초기 화재와는 상관성이 없다는 것을 보여준다. 나아가 시뮬레이션은 작게 설계된 화재의 경우 플래시오버 현상에 도달하기까지 긴 시간이 요구된다는 것을 증명했다. 화재 발생 위치의 배치는 화재 성장과 플래시오버 시간에 미치는 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고 천장재의 가연성 정도는 공간 내 화재 확산에 결정적인 역할을 함을 추가로 알게 되었다. 만약 천장이 가연성 재질이 아니라면 화재는 반자내부로 침투되지 않을 것이며 결과적으로 다른 방들로 확산되지 않을 것이다. 천장과 벽이 모두 가연성이 아니라면 화재는 애초 발생된 그 방 안에서만 연소하고 있을 것이다.

이 연구는 건물내부 합판의 가정된 발화온도에 대한 민감도 또한 측정했다. 합판재의 발화 온도로는 346℃가 적절한 수치이다. Babrauskas에 따르면 실험적인(piloted) 발화온도 범위는 210℃~497℃, 자연발화(autoignition) 온도는 200℃~500℃이며 직접적인 화염(direct-flaming)에 의한 발화는 보통 300℃~365℃의 표면온도에서 발생한다. 따라서 이 변수에 대한 민감도를 측정하기 위하여 280℃, 350℃, 그리고 390℃의 온도를 선택하였다.

[표 4] 초기 화재의 민감도 분석 결과 요약

초기 화재	화재 확산	플래시오버까지 걸리는 시간(초)	최고 HRR(MW)	평균 HRR(MW)
화재 시나리오 1	네	350	22	15
화재 시나리오 2	아니요	해당없음	해당없음	해당없음
화재 시나리오 2(휴지통 옆 테이블 가장자리에 냅킨 한 장 있는 경우)	네	370	22	15
화재 시나리오 3(휴지통 옆 테이블 가장자리에 냅킨 한 장 있는 경우)	아니요	해당없음	해당없음	해당없음
화재시나리오 3(휴지통 옆에 있는 테이블 가장자리의 표면 전체가 천으로 덧대어져 있는 경우	네	870	22	15
15KW의 화재 원인과 함께 휴지통 옆에 있는 테이블 가장자리의 표면 전체가 천으로 덧대어져 있는 경우	아니요	해당없음	해당없음	해당없음



[그림 10] 인테리어 발화 온도에 대한 민감도

[그림 10]는 결과적으로 낮은 발화 온도일수록 더 빠른 플래시오버 현상과 더 높은 최고 온도 방출율을 초래함을 보여준다. 일정한 열 방출율은 이 요인에 민감하게 작용하지 않는다.

출처 : Fire Protection Engineering (2008 Spring, No.38)

번역 : 부산경남지부 정동원