

실행위주의 소방설계 및 화재모델링의 응용

Application of fire modeling for performance based fire protection design

김 원 국
W. K. Kim

인제대학교 산업안전시스템공학부



- 1955년생
- 화재·폭발 위험성 평가, 화재 모델링, 건물화재시 인명안전 분석, 특수분야 기초소방설계(석유화학공장, 원자력 발전소 등)에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

지난 수십년 간 소방 분야의 연구의 결과로 말미암아, 오늘날 선진국에서는 종래의 법규에 의한 규제 일변도의 소방 설계에서 탈피하여 화재의 성상을 공학적으로 분석하여 그 결과를 설계에 적용하는 “실행위주의 소방설계(performance based fire protection design)”를 이미 시도하고 있다. 우리나라에서도 법규 적용이 어려운 새로운 공간에 대해서 화재 시뮬레이션을 통한 방재성능 평가를 이미 적용하고 있으나, 아직 법적인 근거가 마련되지 않고 있고, 교육 전파가 되지 않고 있어서, 대부분 관련 종사자들에게는 생소하게 여겨지고 있는 실정이다. 본 고에서는 실행위주의 소방설계를 소개하고, 화재의 공학적 분석 및 우리나라의 실정, 그리고 앞으로의 방향에 대하여 설명하고자 한다.

2. 실행위주의 소방설계

실행위주의 소방설계(performance based fire protection)란 우리가 현재 적용하고 있는 법규 및 관련 기준에 의한 설계가 아니라, 화재의 방화 공학적 분석에 의하여 설계 대상물의 화재 상황을

예측, 이에 알맞은 소화 설비를 하는 방법을 말한다. 실제로 법규나 기준은 소방 설계 대상물의 특색에 관계없이 일반적인 기준만을 요구하고 있으므로, 경우에 따라서는 소방 대상물의 화재 특성을 충분히 고려하지 못하는 경우가 있으며, 화재로부터 보호해야 하는 보호대상물(인명, 재산, 사업의 연속성 및 환경 보존)의 우선 순위가 바뀌거나 아예 무시되는 경우가 생기기도 한다. 또한 법규나 기준의 해석에 따라 과대한 투자를 하여야 하는 경우도 종종 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 방재 선진 각국에서 개발해온 방법이 실행위주의 소방 설계인 것이다. 본 장에서는 실행위주의 소방 설계에 응용되는 방화 공학의 분야 및 세계적인 추세 그리고 실행위주 소방 설계의 필요성에 대하여 설명하고 있다.

2.1 방화공학의 발전과 실행위주의 소방설계

방화공학은 다른 공학 분야에 비하여 학문적 체계의 확립이 매우 늦었다. 화재에 대한 인식은 아마도 인류가 최초로 불을 다루면서부터 출발했으리라 믿는다. 따라서 방화공학은 연구 대상인 화재의 유구한 역사에 비하여 매우 짧은 역사를 갖고 있다. 한편 방화공학은 화학공학, 기계공학, 건축공학, 전기 공학 등이 복합, 응용되어 있는 학문이기

때문에 따로 독립할 기회가 적었던 것도 방화공학이 늦게 출발하게 된 이유 중 하나가 될 수도 있을 것이다. 그러나 현재 방화공학에서 다루고 있는 여러 가지 테마 중에서 화재현상에 관한 연구인 화재 시뮬레이션(fire simulation)은 다른 공학분야에서는 찾아볼 수 없는 독창성을 갖고 있다. 다음은 현재의 방화 공학에서 다루고 있는 주요 과목에 관한 소개이다.

- 화재 역학(fire dynamics)
- 물을 이용한 소화 설비(water based fire suppression system)
- 특수소화 설비(special suppression system)
- 수동 방화 시스템(passive fire protection system)
- 화재 탐지 설비(fire detection system)
- 화재, 폭발 위험성 평가(fire & explosion risk assessment)
- 화재위험관리(fire risk management)
- 폭발역학(explosion dynamics)
- 공정안전관리(process safety management)

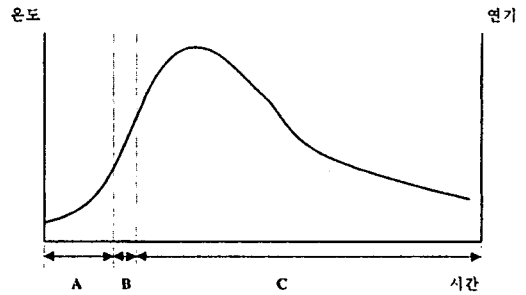
방화공학에서 다루고 있는 과목 중에서 화재 역학은 연소 메커니즘에서 열에너지의 이동 및 실내,외 화재의 진행 과정에 대한 공학적 분석을 다루고 있다. 사실상 현재 미국, 영국, 캐나다, 일본 등의 방재 선진국에서는 끊임없이 이 분야에 관한 연구가 지속적으로 진행 중이며, 이들의 연구 결과로 인하여 많은 경우의 화재를 재연할 수 있게 되었다.

(1) 실내 화재 성상

실내 화재의 경우, 실내의 화재 성상은 그림 1의 그래프로 설명할 수 있다.

1) 전실화재(flashover)

전실화재란 실내화재 시 연소열에 의해 천정류(ceiling jet)의 온도가 상승하여 600℃ 정도가 되면 천정류에서 방출되는 복사열에 의하여 실내에 있는 모든 가연물질이 분해되어 가연성 증기를 발생하게 됨으로써 실내 전체가 연소하게 되는 상태를 이야기하며, 이러한 현상을 full room involvement라고 표현하기도 한다. 전실화재 단



- A : pre-flashover (전실화재 전단계)
- B : flashover (전실화재 단계)
- C : post-flashover (전실화재 후단계)

그림 1 실내의 화재성상

계도 다시 구분하게 되면 pre-flashover 단계와 post-flashover 단계로 구분할 수 있다.

2) 전실화재 전단계(pre-flashover)

이 단계에서는 실내 화재가 전실화재로 발전하느냐 안 하느냐 여부가 가장 큰 관심이 된다. 또한 이 기간 중에 화재의 탐지 및 거주 인원의 안전 피난이 이루어지게 된다. 따라서 전실화재 전단계의 화재 분석은 거주인원의 화재 안전을 예측하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. 방의 크기 및 구조, 건축 자재, 창문의 크기, 연료의 양, 종류 및 배열 상태에 따라 전실화재까지의 시간 및 전실화재 여부가 결정된다. 경우에 따라서는 첫번째 점화된 가연물질만 연소되고 화재가 소멸하는 경우도 있다. 전실화재를 예측하는 수식은 제5장에서 자세히 다루기로 한다.

3) 실내 거주가능 조건

화재가 발생하게 되면 실내에 거주하고 있는 인원은 거주가능 조건 이내에 안전한 장소로 대피하여야 한다. 일반적으로 실내 온도가 100~110℃가 넘으면 거주 인원은 대피를 위한 판단 및 활동이 불가능하게 된다. 또한 연소 시 발생하는 연기는 대피하는 사람들의 시야를 방해하고, 궁극적으로는 연기로 인하여 질식하게 되어 생명을 잃게 된다. 실내 산소농도 또한 인간의 활동에 지대한 영향을 끼치게 된다. 정상적인 상태에서 공기 중 산소의 함유량은 21% 정도인데, 만약 18%로 감소하게 되면 인간은 지속적인 활동을 하지 못하게 되는데 이것은 호흡에 의하여 폐 속으로 들어간 공기

중 산소의 분압이 감소하게 되어 산소가 혈액 속으로 흡수되지 못하게 되기 때문이다. 불완전 연소로 인하여 발생하는 일산화탄소는 혈액 속의 산소를 신체의 각 부분으로 운반하지 못하게 하여 결국 의식을 잃게 된다. 또한 합성수지류 등의 연소 시 발생하는 독성 물질은 거주 인원의 목숨을 앗아가는 주원인이 되기도 한다.

4) 전실화재 후단계(post-flashover)

일단 전실화재로 발전하게 되면 실내온도는 계속 상승하여 1200℃ 이상까지 다다르게 된다. post-flashover 단계에서, 실내 온도를 결정하는 변수는 연료의 연소열량, 연소에 필요한 공기의 유입 상태, 단열 효과 등이다. 같은 종류의 연료일 지라도 연소 시 공급되는 공기의 양이 달라지게 되면, 실내온도의 변화가 틀려진다. post-flashover 상태에서는 일반적으로 창문의 크기 및 창문의 높이, 연료의 연소속도 등에 따라 환기지배형 화재(ventilation control fire)나 연료지배형 화재(fuel control fire)로 나누어지게 된다. 환기지배형 화재의 경우 최고 실내 온도 및 화재 지속 시간 등은 환기 조건에 따라 달라지게 된다. 전실화재 후단계의 연구는 건물의 내화 능력의 예측을 가능하게 하여 준다. 다시 말하면 화재 시 건물 내부의 온도 상승 및 화재 연속 시간 등을 예측하여, 이를 방화 설계에 반영할 수 있게 하여, 내화 온도 및 시간 등을 설정하게 하여 준다. 건물 내 화재가 flashover 상태로 발전할 경우 화재는 발생한 장소에서 소멸할 때까지 계속되던가 아니면 같은 층의 다른 방이나, 다른 층으로 이동하게 된다. 이들 경로 중에서 창문을 통하여 방출된 화염에 의한 화재의 전파가 가장 보편적이다. 이러한 창문을 통한 화재의 수직 전파 분석 또한 전실화재 후단계를 연구함으로써 가능하다.

(2) 실행위주의 소방설계(performance based fire protection design)

실행위주의 소방설계는 현재 방화공학의 발전에 힘입어 급속도로 그 응용범위를 넓혀가고 있고, 방재 선진국들은 실행위주의 소방설계를 합법화시키기 위한 작업을 서두르고 있다. 이러한 작업의 일환으로 NFPA에서는 이와 관련한 코드(NFPA 555, guide on methods for evaluating po-

tential for room flashover)가 제정되어 사용중이다.

실행위주의 소방설계의 장점을 열거하면 다음과 같다.

- 법규에 명시되지 않은 새로운 공간에 대한 설계
- 법규에 의한 설계의 안전도 확인
- 방재 시설 투자효과의 최적화
- 기존 시설의 안전도 확인
- 법규 적용 시 발생 가능한 분류의 해결
- 비상 조치 계획 작성 시 참고 자료

그러나 실행위주의 소방설계가 활성화되기 위해서는 다음과 같은 사항들이 선결되어야 한다.

- 소방 설계자의 교육
- 인·허가자의 교육
- 법규에서 실행위주의 소방설계를 인정; 표준 지침서의 개발
- 화재 관련 연구의 활성화
- 각종 건축자재 및 가구 등 연소물질의 연소 자료 표준화

결론적으로 실행위주의 소방설계는 기존의 법규에 의한 소방설계를 부정하는 것이 아니고, 보완하고 완성하는 것이라 할 수 있다. 법규에서는 최소한의 요구사항을 제시하고, 실행위주의 소방설계로써는 법규에 의한 설계의 화재 안전성을 점검하고, 미진한 부분을 보완해 가는 방법을 모색한다면, 완벽한 조화를 이룰 수 있다고 본다. 설계자 및 인, 허가 기관 이외에 건축물의 화재 안전에 관심을 갖고 있는 기관을 살펴보면 다음과 같다.

- 건물주
- 투자기관
- 보험회사
- 지방자치 단체(공공건물의 경우)

건물주는 합리적인 위험관리를 위해서도 실행위주의 소방설계가 필수적일 것이며, 투자기관 또한 투자 여부를 결정함에 있어서, 사업장의 화재 안전을 확인하기 위한 방편으로 실행위주의 소방설계를 활용할 수 있다. 보험회사 역시 합리적인 보험 요율을 결정하거나, 보험 가입자의 위험관리 지도를 위해서 실행위주의 화재안전 확인은 필수적이다. 공공건물의 경우 해당 지방자치단체에서

는 주민의 생명을 보호하기 위해서 전문가에 의한 화재안전 진단을 의뢰할 수 있고 화재 안전 진단은 법규의 준수 및 실행위주의 소방설계를 활용하여 안전도를 진단 할 수 있다.

사실상 우리나라에서도 이미 법규로 규제하기 어려운 대형 공간에 대해서는 화재 시뮬레이션을 통한 실행위주의 소방설계를 인정하고 있는 실정이다. 해당 정부 기관은 방재 선진국의 행정 방향을 적극 검토하고, 이에 대한 연구 및 교육을 지속하여 실행위주의 소방설계가 활성화 될 수 있도록 노력하여야 할 것이다. 이 모든 노력에 소방 기술인들이 앞장서야 하는 것은 당연하다고 본다.

2.2 실행위주의 소방설계의 활용

실행위주의 소방 설계란 방화공학을 이용하여 화재 현상을 모델링하고, 그 결과를 소방 설계에 응용하는 것이다. 현재 소방설계에서 활용하고 있는 실행위주의 소방설계의 예를 설명함으로써, 이에 대한 이해를 높임과 동시에 독자들로서 하여금 실행위주의 소방설계를 시도할 수 있도록 한다.

(1) 전실화재 가능성 판단

전실화재(flashover) 가능성에 대한 판단은 화재 발생 후 천정류의 온도를 실험식을 사용하여 예측함으로써 가능하다. 건축물의 화재안전을 확보하기 위해서는 전실화재를 방지하는 일이 매우 중요하다. 앞에서 설명한 바와 같이 전실화재가 발생하게 되면, 실내의 연소 가능한 물질은 모두 연소하게 되며 실내 온도가 1200℃ 이상 상승하게 되어 건물의 붕괴를 야기할 수도 있게 된다. 건물이 붕괴하게 되면 재산상의 손실은 말할 것도 없고, 피난 중인 거주인, 화재 진압 중인 소방대원 및 구조대원 등이 희생을 당하게 된다. 따라서 건축물의 화재 안전을 고려할 때에는 건축물내의 주요 공간에 대한 전실화재 가능성 여부를 분석해 보아야 하는 것이다. 건축물 내의 주요공간의 예는 다음과 같다.

- 내화처리 되지 않은 건축물의 구조물이 노출되어 있는 공간
- 화재 하중이 매우 큰 공간
- 배연 설비가 되어 있지 않은 지하 공간
- 건물의 용도상 방화 구획이 적용되지 않은

공간

- 기타 고정식 자동 소화 장치가 설치되어 있지 않은 공간
- 거주인원이 많은 공간

고정식 자동 소화 설비가 설치되어 있는 공간에서의 전실화재는 우선 고정식 자동 소화 설비가 진화에 실패하고, 소방대원이 화재 현장에 도착하기 전에 전실화재가 발생하거나, 전실화재 이전에 도착하더라도 수동화재 진압에 실패하는 경우에 발생하게 된다. 수동화재 진압이 실패하게 되는 경우는 대부분 질은 연기로 인하여 화원을 찾지 못하거나, 화재 성장 속도가 매우 빠른 경우이다. 수동소화에 실패한 후 화재는 전실화재로 발전할 수도 있고, 방의 일부만 태운 후 스스로 소화될 수도 있다.

고정식자동소화설비로 보호 받고있는 공간의 전실화재 발생 과정은 그림 2와 같다.

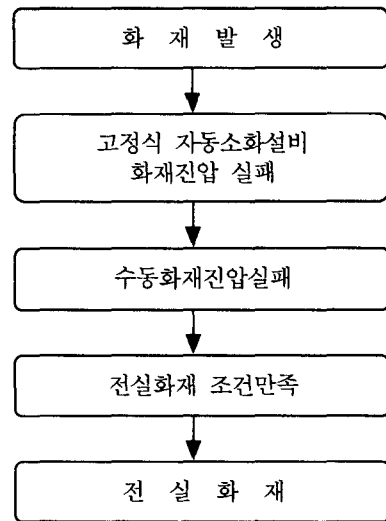


그림 2 전실화재발생 과정

1) 고정식자동소화설비

화재 발생 후, 고정식자동소화설비가 작동되기 시작하면, 화재가 완전히 진압되거나 스프링클러 시스템의 경우, 시스템이 작동되는 시점에서의 화재 크기로 조정되기 때문에 이 때의 실내 온도가 600℃가 넘지 않을 경우 전실화재는 일어나지 않게 된다. 그러나 고정식 자동 소화 설비는 설계, 설

치, 유지 및 시험 등의 활동에 따라서 그 신뢰도의 차이가 많이 나기 때문에 작동 시간 및 설계에 대한 세밀한 검토와 함께 설치 상태, 유지 보수 방법 등을 잘 살펴보아야 한다.

2) 수동소화단계

고정식 자동 소화 설비의 신뢰도가 떨어지거나 이러한 시설 자체가 없는 경우에는, 다음 단계의 수동소화단계로 넘어 가게 된다. 여기서 이야기하고 있는 수동소화단계는 훈련된 자체 소방대나 지역 소방서에서 출동한 소방관에 의한 소화활동을 의미한다. 다시 말해서 화재 초기에 거주인 등이 소화기를 사용해서 소화하는 것을 이야기하는 것이 아니고 소방관들이 소화전을 이용하여 화재를 진압하는 것을 의미하고 있다. 수동 소화 단계에서 고려하여야 하는 점은 소방대원들이 화재 현장에 출동하는 시간과 이들이 도착했을 때의 화재의 크기를 예측하는 일이다. 다시 말해서 소방대원들이 도착했을 때, 화재의 크기가 너무 커져서 전실화재까지 도달했다면, 많은 것을 잃게 될 수도 있기 때문이다. 예를 들어서 내화처리가 되지 않은 공간에서 소방대가 도착하기 전에 화재가 전실화재단계까지 이르렀다면, 구조체의 열변형에 의한 건물의 붕괴도 예상될 수 있는 것이다. 수동소화단계는 그림 3의 수동소화과정표와 같은 과정을 거친다.

그림 3에서 보는 바와 같이 소방대가 화재 현장에 출동하기까지는 화재를 탐지해서 소방서로 통보해야 하는 과정을 거쳐야 한다. 화재의 탐지의 탐지기의 종류, 설치 방법, 방안의 구조 및 연소물질의 종류 등에 따라 작동 시간에 차이를 나타낸다. 열·연 감지기의 작동 시간 또한 공학적인 방법으로 예측할 수 있다. 여기에 화재상황을 소방서에 연락하는 방법에 따라 소요 시간이 달라진다. 만약 소방서에서 화재 감지가 된다면 이 시간은 매우 짧을 것이고, 화재가 발생한 건물의 방재센터에서 화재를 감지한 후, 유선으로 소방서에 연락할 경우, 어느 정도의 시간 지연이 예상된다. 따라서 소방대가 화재 현장에 도착했을 때까지의 화재 성상을 예측하여 피난, 배연, 고정식자동소화 설비의 필요성을 판단하여야 한다.

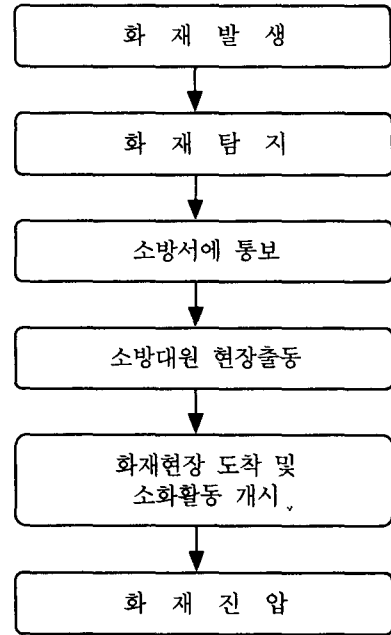


그림 3 수동소화 과정

3) 전실화재조건의 판단

수동소화마저 실패하게 되면 남는 것은 화재가 발생한 방의 조건이 전실화재로 발전할 수 있는지 여부를 판단하는 일이다. 거주가능시간 내에 거주 인원이 안전피난을 마친 후에도, 만약 전실화재로 발전하게 되면, 화재가 다른 방이나 상부로 이동할 수 있게 되고, 건물 구조에 열해를 주게 된다. 따라서 고정식자동소화설비나 수동소화에 실패한 후에 최종적으로 희망을 걸 수 있는 유일한 방법은 전실화재조건을 세밀히 분석하여 이를 최적화 함으로써 전실화재의 가능성을 최소화하는 것이다. 다음은 전실화재를 일으키는 조건들이다.

1968년 Waterman은 $3.64 \times 3.64 \times 2.43\text{m}$ 크기의 방에서 가구를 연료로 하여 전실화재조건에 대한 실험을 하였다. 전실화재 시점은 최초로 점화된 가구로부터 떨어진 바닥에 종이를 놓고, 이 종이 연소하는 시점을 전실화재로 간주하였다. 시험결과 Waterman은 천정류에서 방출되어 바닥에 도달하는 복사열량이 20kW/m^2 이 되어야 하는 것으로 결론 지었다. 이 에너지크기는 두꺼운 목재나 이와 유사한 기타 가연물을 지속적으로 연

소시킴에는 부족하지만 거의 모든 가연물에 초기점화를 시키기에는 충분하고, 가연물 표면을 따라 빠른 속도로 연소를 확대시키는데 충분하다. Waterman의 실험에 이어서 많은 사람들이 전실 화재에 대한 연구를 수행하였고, 전실 화재에 대한 조건도 바뀌게 되었다. 1979년 Babrauskas는 전실 화재의 조건으로 천정온도가 600℃가 되어야 한다는 것을 발표하였다. 그러나 1975년 Heselden과 Melinek는 천정 높이 1m의 소규모 실험에서는 전실 화재가 천정온도 450℃에서 일어나는 것을 발견하여, 전실 화재의 조건에 천정 높이가 큰 변수로 작용하는 것을 알게 되었다.

다음은 전실 화재에 영향을 미치는 변수들이다.

- 실의 모양(shape of compartment)
- 점화원의 위치(position of ignition source)
- 연료의 높이(fuel height)
- 환기창(ventilation opening)
- 연료의 밀도(bulk density of fuel)
- 연료의 연속성(fuel continuity)
- 마감재(lining ; wall and ceiling)
- 점화원의 크기(ignition source area)

Hägglund et al.의 실험결과에 의하면

$$QFO = 610(hkATAWH^{1/2})^{1/2} \text{가 된다.}$$

여기서 QFO는 전실 화재를 일으키기 위한 발화원의 발열량이다.

$$[QFO] = kW$$

$$[hk] = kW/m^2K$$

$$[AT, AW] = m^2$$

$$[H] = m$$

결론적으로 전실 화재에 이르게 되는 경로 및 변수를 연구함으로써, 전실 화재의 가능성을 배제하거나, 전실 화재에 이르는 시간을 연장할 수 있다. 건물에 일단 전실 화재가 발생하면, 화재를 진압하기가 어렵고, 화재 및 연기가 전체 건물로 번지게 되므로 인명 피해가 커지고, 건물의 구조에도 열해를 주게 된다. 따라서 설계 시 전실 화재의 가능성을 최소화하는 일이 매우 중요하다.

(2) 안전 피난 시간 예측

건물의 용도에 따라서 다소 달라질 수는 있겠으나, 어느 건물이든지 사람이 거주하는 상황에서 가장 중요한 방재 포인트는 거주인원의 안전 피난이다. 안전 피난은 거주인의 피난 능력, 화재 발생 공간의 거주 가능 조건, 피난로를 구성하고 있는 건축 구조물의 조건 등에 따라서 영향을 받게 된다. 따라서 실행 위주의 방화 공학을 사용한 안전 피난 시간의 예측은 그림 4와 같은 과정을 거쳐서 시행된다.

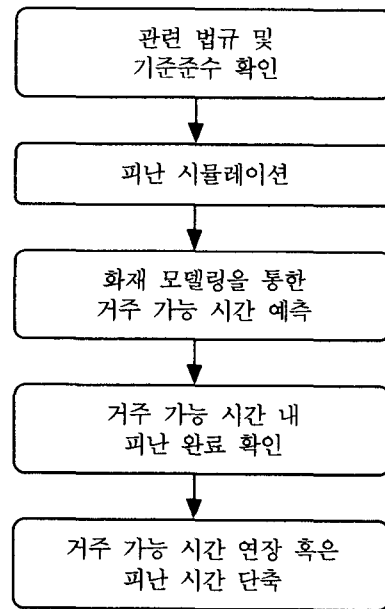


그림 4 안전 피난 시간 예측 과정

피난에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다.

- 거주 밀도
- 비상구 폭
- 피난 거리
- 수평 피난 속도
- 수직 피난 속도
- 비상구 통과 속도(통과 유량)
- 비상 계단 통과 속도(통과 유량)
- 출입구 개수
- 비상 계단 구조

주지한 바와 같이 거주 가능 시간 내에 안전 피

난이 불가능 한 경우 이를 개선하는 방법은 건물의 피난 능력을 개선하여 피난 시간을 줄이는 방법과 거주 가능 시간을 연장하는 방법 및 거주 인원을 제한하는 방법이 있다. 그러나 거주 인원은 설계 초기 단계에서 결정되어 지므로, 특별한 경우를 제외하고는 거주 인원을 통제하기 어렵다. 다음은 피난 시간 절감 및 거주 가능 시간의 연장에 대한 방안이다.

- 1) 피난 시간 절감안
 - 거주 밀도 하향 조정
 - 비상구 수 증가
 - 비상구 및 비상계단 폭 확대
 - 피난 거리 단축
 - 탐지 및 경보 시간 단축
 - 비상훈련에 의한 대피 시간의 단축
- 2) 거주 가능 시간 연장안
 - 배연·열 설비의 설치
 - 가연성 물질의 종류 및 사용량 제한
 - 고정식 자동 소화 설비의 설치
 - 실의 구조 변경
- 3) 안전 피난 소요 시간

Nelson과 MacLennan에 의하면 안전 피난에 소요되는 시간은 다음과 같이 표현된다.

$$T_{ae} = T_{me} + T_d$$

T_{ae} = 실제 피난 시간
 T_{me} = 계산에 의한 피난 시간
 e = 명백한 피난 효율
 T_d = 피난 초기의 지연

피난 효율의 요소를 예를 들면 다음과 같다

- ① 피난 관리 행동에 의한 지연
- ② 피난 흐름이 합류되는 지점에서의 흐름의 방해
- ③ 개개인의 판단
- ④ 불균형한 비상구의 사용(한쪽으로 몰리는 현상을 이야기 한다)

피난을 시작하면서 피난 시간을 지연시키게 되는 예

- ① 결정을 하는데 걸리는 시간

- ② 조사에 필요한 시간
- ③ 효율적인 피난 이외의 행동에 소모되는 시간
- ④ 피난로를 결정하는데 사용되는 시간

이 중에서 피난 시간을 가장 많이 지연시키는 것은 피난에 관한 결정을 하는데 소요되는 시간이다. 사람들은 의식적이든 무의식적이든 화재 경보를 접하게 되면 피난에 관한 의사결정을 하는 과정에서 표 1과 같은 행동을 하게 된다. 이 자료는 영국에서 조사한 화재 경보에 대한 반응이다. Wood는 이 자료를 작성하기 위하여 952건의 화재를 통하여 총 2,193명에게 인터뷰를 하였다.

표 1 피난시의 행동

행 동	%
다른 사람에게 알린다	8.1
불씨를 찾는다	12.2
소방서에 연락한다	10.1
옷을 입는다	2.2
건물을 떠난다	8.0
식구를 찾는다	5.4
불을 끈다	14.9
그 지역을 떠난다	1.8
아무 것도 하지 않는다	2.1
다른 사람에게 소방서에 연락하게 한다	2.8
자신의 소유물을 챙긴다	1.2
화재가 발생한 장소로 간다	5.6
가연성 물질을 치운다	1.2
건물로 들어간다	0.1
피난을 시도한다	1.6
화재가 발생한 곳의 문을 닫는다	3.1
화재경보기를 작동시킨다	2.7
사용중인 기기를 끈다	4.1

이것을 다시 다섯 가지 행동 유형으로 요약해보면 표 2와 같다

표 2 피난시의 행동유형

행 동	%
피난한다	54.5
화재가 발생한 곳으로 다시 들어간다	43
불을 끈다	14.7
연기 속에서 움직인다	60
돌아간다	26

안전 피난 시간 역시 컴퓨터 모델링으로 예측이 가능하다. 따라서 안전 피난 소요 시간의 예측은 화재 모델링과 함께 건물의 안전 피난 능력을 판단함에 있어서 매우 유용하게 사용되고 있는 방법 중의 하나이다.

(3) 창문을 통한 수직 화재 전파

건물 내부를 통한 화재 전파는 관련 법규나 기준을 적용하여, 방화벽 및 방화문 등을 설치, 상당 부분 막을 수가 있으나, 건물 외벽의 창호를 통한 수직 화재 전파는 이를 방지할 만한 마땅한 규제가 없는 실정이다. 미국의 경우에도 관련 건축법에서 Spandrel 부분(건물 외벽의 창호와 창호 사이의 벽체)의 최소 높이만을 규정하고 있을 뿐 별다른 규제가 없다. 그러나 수직 화재 전파가 있었던 화재 사례들을 분석해 보면 바로 건물 외벽 창호를 통한 수직 화재 전파의 예를 쉽게 찾을 수 있으므로 이에 대한 검토가 신중히 이루어져야 한다. 다음은 Thomas와 Law에 의해서 발견된 실험식이다(그림 5 참조). 이 실험식은 화재가 발생한 방에서 창문을 통해 방출되는 불꽃의 길이 및 높이를 구하는 데 사용할 수 있다.

$$z + H = 12.8(m/B)^{2/3}$$

$$x/H = 0.454/n^{0.53}$$

- H, B = 창문의 높이 및 폭[m]
- z = 불꽃 끝까지의 높이[m]
- m = 연소율[kg/s]
- x = 외벽에서 불꽃까지의 거리
- n = 2B/H(space factor)

여기서 불꽃의 길이는 불꽃의 온도가 550℃가

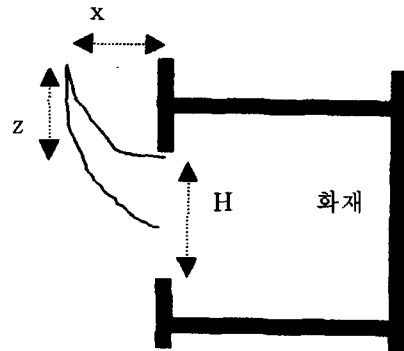


그림 5 창문을 통해 방출되는 불꽃의 길이 및 높이

되는 점으로 정한다.

사실상 이 실험식은 건물 내부의 화재가 건물 외부에 설치된 철 구조물에 미치는 영향을 판단하기 위해서 연구된 것이지만, 창문을 통해 나오는 불꽃의 길이를 예측함으로써 상층부로의 화재 전파 여부를 판단할 수 있게 된다. 요즘은 고층 건축물의 외벽은 경량화, 조립식화 되어가고 있으며, 유리창호 부분이 점점 더 많은 비율을 차지해 가고 있다. 반면 건축물 내부를 통한 화재 전파는 방화문, 건축 내장재, 관통부위 방화 충전재 등의 발전으로 인하여 화재의 내부 전파 가능성이 줄어들고 있는 반면, 거꾸로 외벽을 통한 화재 전파가 증가하고 있다. 실험식에서 알 수 있듯이 창문을 통해 방출되는 불꽃의 길이는 연소율, 창문의 크기, 모양, 높이 및 건물의 폭과 깊이 등에 따라 달라지게 된다. 여기서 연소율은 다시 화재가 발생한 방의 환기 조건에 따라 달라지게 된다. 분석한 결과는 건물 외벽을 통한 화재 전파를 방지하는데 사용되고 있다. 아직 우리나라에서는 이러한 규제가 없으나, 미국의 경우, 유리창을 통한 화재의 수직 전파를 방지하기 위하여, 유리창과 유리창사이의 최소 수직이격을 요구하고 있다. 다음은 유리창을 통한 화재의 수직 전파를 방지하는 방법이다.

- Awning(층간의 들출부)의 설치
- 방화 셔터의 설치
- 유리창에 드렌처 설비
- 연소율의 조정

3. 화재의 공학적 분석

방화 공학에서는 실내 화재를 전실화재 이전(pre-flashover)과 전실화재 이후(post-flashover)로 나누어 다룬다.

전실화재 이전 상태에서는 점화 시부터 전실화재가 일어나게 되는 현상을 주로 다루게 되고, 이때 주로 연구되는 대상은 화재 성장 속도, 최대 순간 발열량, 천장류의 온도, 연기의 생성 및 이동, 안전피난시간 등이다. 또한 스프링클러가 작동할 때의 화재의 크기를 예측하여 설계 살수 밀도치와 비교해 봄으로써, 스프링클러에 의한 화재 진압의 성공 여부를 예측할 수도 있다. 그러나 전실화재 이전 상태에서 가장 큰 관심사는 역시 전실화재 가능성에 대한 예측이라 할 수 있겠다.

전실화재 이후에는 주로 건물의 내화 성능 및 화재 전파가 중요 관심사가 된다. 일단 전실화재가 발생하게 되면 방안에 연소할 수 있는 모든 가연성 물질이 연소하게 되므로, 화재 하중을 계산하게 되고 화재 하중 및 환기 조건에 따라 연소지속 시간 및 실내 온도가 결정된다.

다음은 전실화재 이전 및 이후 상황에서 중요하게 다루어지는 사항에 대한 공학적 분석 예이다.

3.1 천장류(ceiling jet)의 온도 예측

(1) 항상 일정한 크기의 화재(steady fire)

Steady fire하에서 천정류의 온도에 대해서 일반적으로 통용되는 공식은 Alpert에 의해 만들어진 다음과 같은 공식이다(그림 6 참조).

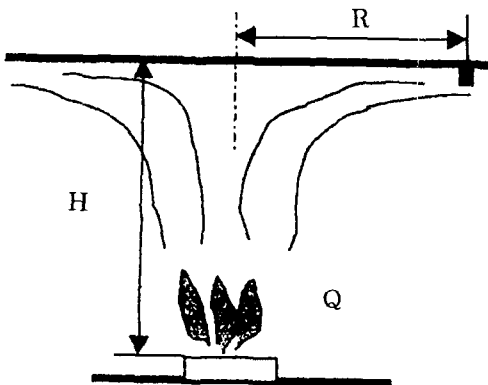


그림 6 천장류의 온도

$$T - T_{\infty} = 16.9Q^{2/3} / H^{5/3} \quad r/H < 0.18 \text{인 경우}$$

$$T - T_{\infty} = 5.38(Q/r)^{2/3} / H \quad r/H > 0.18 \text{인 경우}$$

$$U = 0.96(Q/H)^{1/3} \quad r/H < 0.15 \text{인 경우}$$

$$U = 0.195Q^{1/3} H^{1/2} / r^{5/6} \quad r/H > 0.15 \text{인 경우}$$

여기서 온도 T는 °C로 속도 U는 m/sec로 나타내며, 발생 열량 Q의 단위는 kW, r과 H의 단위는 m이다.

(2) 시간에 따라 변하는 화재 (time dependent fire)

실제로 건축물 화재에서 발생하는 열량은 steady state가 되는 일이 거의 없고 시간에 따라 변하게 된다. 우리는 앞장에서 연소 시 발생하는 열량이 시간의 제곱에 비례한다는 사실을 발견하였다. 시간에 따라 변하는 화재에서 천정류의 온도 및 속도를 구해 보기로 한다.

$$\Delta T_2^* = 0, \quad t_2^* < t_f^*$$

$$\Delta T_2^* = \{ (t_2^* - t_f^*) / (0.188 + 0.313r/H) \}^{4/3}$$

$$U_2^* / \sqrt{\Delta T_2^*} = 0.59(r/H)^{0.63}$$

여기서,

$$t_2^* = (t - t_i) / (A^{-1/5} \alpha^{-1/5} H^{4/5})$$

$$U_2^* = U / (A^{1/5} \alpha^{1/5} H^{1/5})$$

$$\Delta T_2^* = (T - T_{\infty} \Delta T_2^*) / \{ A^{2/5} (T_{\infty} / g) \alpha^{2/5} H^{-3/5} \}$$

$$A = g / (C_p T_{\infty} \rho_{\infty})$$

$$\alpha = Q / (t - t_i)^2$$

$$t_f^* = 0.954(1 + r/H)$$

3.2 실내 온도 예측

3.1에서는 화재 시 천정류의 온도를 예측하는 방법을 소개하였다. 본 Chapter에서는 전장에서 연구한 천정류가 방안 전체의 상부의 평균 온도를 알아보기로 한다.

(1) 전실화재 전 실내 온도 예측

McCaffrey 및 Quintiere, Harkeroad에 의하면 실내 상층부의 온도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_g = 480(Q / \sqrt{g c_p \rho_{\infty} T_{\infty} A_0 \sqrt{H_0}})^{2/3}$$

$$(h_k A_T / \sqrt{g c_p \rho_{\infty} T_{\infty} A_0 \sqrt{H_0}})^{1/3}$$

여기서,

- A_0 = 개구부의 크기 [m²]
- H_0 = 개구부의 높이 [m]
- g = 9.8m/s²
- c_p = 1.05kJ/kg·K
- ρ_∞ = 1.2kg/m³
- T_∞ = 295K
- $h_k = k/\delta$ $t > t_p$ 인 경우
- $h_k = (k \rho c/t)^{1/2}$ $t < t_p$ 인 경우
- ρ = 실내 내장재 표면의 밀도 [kg/m³]
- c = 내장재의 비열 [kJ/kg·K]
- k = 내장재 표면의 전도율 [kW/m·K]
- δ = 내장재의 두께
- t = 노출 시간
- t_p = 열침투 시간

(thermal penetration time) [s]

(2) 전실화재 후 실내 온도 예측

Babrauskas에 의하면 전실화재 후의 실내 온도는 다음과 같은 방법으로 예측할 수 있다.

$$T_g = T_\infty + (T^* - T_\infty) \theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5$$

연소속도(θ_1)

- $\theta_1 = 1.0 + 0.51 \ln \Phi$ $\Phi < 1$ 인 경우
- $\theta_1 = 1.0 - 0.05 (\ln \Phi)^{5/3}$ $\Phi > 1$ 인 경우
- $\Phi = m_r / m_{f, st}$
- $m_{f, st} = 0.5A_0 \sqrt{H_0}$

여기서 m_r 는 연소율 [kg/s], $m_{f, st}$ 은 완전연소율을 말하며, r 은 연료 1 kg당 완전 연소 시 소요되는 산소의 양이다.

벽을 통한 열손실(steady-state losses) :

$$\theta_2 = 1.0 - 0.94 \exp\{-54(A_0 \sqrt{H_0}/A_T)^{2/3} (L/K)^{1/3}\}$$

벽을 통한 열손실(transient losses) :

$$\theta_3 = 1.0 - 0.92 \exp\{-150(A_0 \sqrt{H_0}/A_T)^{0.6} (t/k \rho c_p)^{0.4}\}$$

개구부의 높이 : $\theta_4 = 1.0 - 0.205 H_0^{0.3}$

연소 효율 : $\theta_5 = 1.0 + 0.5 \ln b_p$

(3) 전실화재의 예측

McCarfrey, Quintiere 및 Harkleroad에 의

한 전실화재의 예측은 다음과 같다.

$$Q = (\sqrt{g c_p \rho_\infty T_\infty^2 (\Delta T_g/480)^3})^{1/2} (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})$$

여기서 전실화재가 발생하려면 ΔT_g 가 500°C 이상이 되어야 하므로, 위 식은 다시 아래와 같이 정리된다.

$$Q = 610 (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{1/2}$$

여기서, h_k = 열전도계수

A_T = 건물 내부 면적 [m²]

A_0 = 개구부의 면적 [m²]

H_0 = 개구부의 높이 [m]

4. 우리나라의 실정 및 앞으로의 방향

서론에서 언급한대로 현재 선진 각국에서는 화재에 대한 연구를 정부 차원에서 꾸준히 진행하고 있고, 이를 토대로 실행위주의 소방 설계를 실현시키기 위한 노력을 전개하고 있다. 이미 실행위주의 소방설계를 뒷받침해 주는 법적 근거를 제도화한 나라도 있다. 그러나 우리나라의 경우 실행위주의 소방설계를 향한 계획적이고도 총체적인 움직임이 아직 감지할 수 없다. 단지 몇개의 프로젝트를 통하여 화재 모델링을 응용한 건물의 방재계획서가 작성되어 제출되었을 뿐이며, 심의 기관에서는 실행위주의 소방설계에 대한 이해가 적은 상태에서 이러한 보고서에 대한 심의가 어떻게 이루어지고 있는 지 매우 궁금하다. 국가 지원의 연구 프로젝트도, 실행위주의 소방설계의 시행을 목적으로 하여 부처간 협의를 거쳐 시행되지 못하고 있다.

그렇다면 앞으로 우리는 어떤 일들을 하여야 되는지 생각해 보기로 하자. 우선 국내,외에서 수행되어 왔었고, 현재 수행되고 있는 소방 분야에 대한 연구 결과를 정리하여야겠다. 이것은 앞으로 우리나라에서 수행되어야 할 연구 분야를 가시적으로 보여줄 수 있는 중요한 자료가 될 것이다. 또한 소방공무원은 우리나라에서도 실행위주의 소방설계가 가능할 수 있도록 법적인 토대를 제공하여야 할 것이다. 동시에 학계에서는 연구가 지속적으로 이루어져야 하며, 소방에 종사하고 있는 사람들에 대한 교육이 수행되어야 한다.