

연기유동에 대한 Network 모델의 유형과 최근의 동향

1. 서 언

화재사고에 있어서 연기이동은 매우 중요한데 왜냐하면, 피난통로와 대피소까지 소요되는 시간이 인명안전에 직접적으로 관련되기 때문이다. 여러가지 화재사례에서 기술된 바와 같이 화재조사는 연기이동의 연구에 매우 가치있는 정보를 제공해준다. 여기에서는 어떤 특정건물에 대한 화재조건 즉, 화재의 위치와 크기, 건물 상황, HVAC(Heating, Ventilating and Air Conditioning) 시스템, 외창의 온도 및 바람 등으로 제한하여 기술한다.

장애물을 통과하는 연기흐름의 속도는 장애물 주위의 압력차와 구획된 공간으로부터의 공기의 누출값에 따라 다르다. 구획된 공간이라 함은 실(room), 층 또는 엘리베이터실이나 계단실과 같은 수직 샤프트를 말한다. 화재실에서의 연기이동에 대한 분석은 대형 공간 예컨대, 아트리아, 쇼핑몰 및 공항터미널과 같은 곳에서 특히 중요하며, 다수인에 의하여 점유된 이들 공간에서의 연기는 사람들의 피난에 많은 장애요소가 될 수 있다.

대다수의 컴퓨터 화재모델은 누출개구부, 복도 및 수직 샤프트 등과 같은 대형 개구부를 통하여 연기흐름, 연기층, 연기 plume이 어떻게 성장·이동하는가를 시뮬레이트하기 위하여 개발되었다.

이에 대하여는 일반적으로 세가지 유형의 모델로 그룹화할 수 있는데, (1) Zone 모델, (2) Field 모델, (3) Network 모델이 그것이다. 이들은 수학적 모델을 이용하여 건물을 여러가지 제어량으로 분리한다. Zone 모델은 화재실 내부에 하나 이상의 제어량을 가지고 있으며, 이와 반대로 Field 모델은 무수히 많은 제어량을 가지고 있다.

Network 모델은 室당 한개의 제어량을 이용하나, 많은 실을 관장하며 화재실로부터 아주 멀리 떨어진 공간의 상태를 예측한다. 여기서의 온도는 주변과 같고 뜨거운 가스층은 발생하지 않는 것으로 가정한다. Zone 및 Field 모델은 아트리아, 쇼핑몰과 같은 대형 공간에서의 연기이동에 적합하고, 반면에 Network 모델은 많은 층과 수직 샤프트, 그리고 기계적인 연기 제어 시스템을 갖고 있는 고층건물에 적합하다.

본장에서는 제3의 컴퓨터 화재모델인 network 모델에 대하여 그 유형과 동향에 대하여 간략하게 살펴보기로 한다.

2. Network 모델의 유형

Network 모델은 주로 다층건물(소방법상 고층건물은 아니라 하더라도)의 공기 및 연기이동에 대한 역학적 이해증진과, 연기-제어기술의 개발 및 설계에 대한 기술향상을 위한 연구 tool로 사용되어 왔다. 이 모델에서는 건물이 여러개의 구획공간(node: 절편)으로 나뉘어지고 그 각각은 균일한 압력과 온도를 가지고 있는 것으로 가정한다. 이들 구획공간은 누출 개구부(유동 경로)와 수직 샤프트를 통하여 서로 연결된다. 주어진 흐름경로 주위와의 압력차를 질량유속으로 계산하기 위해 일반화된 오리피스 유동 방정식이 사용된다. 처음에는 모든 구획공간내에 압력이 있는 것으로 가정되며, 그런 다음에 모든 구획공간에 대해 질량유속과 관련된 입출량이 얻어질 때까지 압력이 점진적으로 반복·조정된다.

설계자는 연기-제어 시스템의 예상되는 성능을 분석하기 위하여 모델링을 이용한다. 이는 설계에 착수하기 이전에 설계상의 문제를 찾아내고 수정하는

데 유용하기 때문이다. Network 모델은 설계에 관련된 여러가지 옵션에 대한 시도를 용이하게 함으로써 최상의 설계가 되도록 한다. 또한, 이 모델은 여러가지 화재 시나리오에 대해 건물에서의 연기 위험성을 분석하는 데 사용할 수 있다. 여기에서 얻은 지식은 피난에 잠재된 여러가지 문제점을 찾아내어 효율적인 피난계획을 수립하여 대비할 수 있도록 시스템 설계에 활용할 수 있다.

Network 모델에 있어서 건물의 각 구획공간은 node로 나타나는 제어 zone이다. 여기에는 물질 수지방정식과 유동방정식이 채용되며 연기의 농도와 온도에 대한 방정식이 추가적으로 사용될 수 있다. 화재는 일반적으로 시간의 함수로서 온도와 연기의 생성특성에 대하여 기술된다.

Network 모델의 전형적인 입력 자료는 기상학적 자료(예 : 공기의 온도 및 풍속), 건물의 특성(예 : 높이, 누출면적 및 개구부의 상태), 환기공기의 공급, 화재특성 및 실내공기의 온도이다.

다층건물에서의 연기이동에 대한 network 모델의 예는 일본 건물연구소의 BRI 모델 ; 캐나다 국립연구소의 IRC 모델 ; 영국 건물화재연구소의 BRE 모델 ; 미·국립기술표준연구소의 NIST 모델 ; 네델란드 응용물리학연구소의 TNO 모델이 있다. 대부분의 모델에서는 연기가 건물에서의 통상적인 공기이동의 유형을 따르고, 공기와 완전하게 혼합하고 혼합과정은 순간적으로 일어난다고 가정하고 있다. 이들 모델의 개략적인 특성은 다음과 같다 :

가. 일본의 BRI 모델

와카마쓰는 구획된 건물에서의 연기이동에 대해 定常狀態 모델과 轉移모델을 개발하였다. 이들은 연기제어에 대한 개척자적 모델이라고 생각된 정상상태 모델은 정상상태에서의 공기흐름과 압력을 예측하지만, 연기농도만은 시간의 함수로서 예측된다. 화재실의 연기밀도나 온도와 같은 화재특성은 사용자에게 의하여 주어진다. 모델은 화재층 복도에 대하여 정상상태에서의 연기온도를 계산한다. 이것은 화재실의 개구부로부터 거리에 대한 1차 함수로 가정된다. 빌딩내 그밖의 다른 곳의 온도는 화재가 진행되

고 있는 동안 일정하다고 가정한다. 이 모델에서는 또한 환기공기의 공급에 대해서도 언급하고 있지만, 일정한 것으로 가정한다. 이 모델은 첫번째로 건물의 모든 곳에 대해 정상상태에서의 공기 흐름을 계산한다. 그리고 나서, 화재실의 농도와 관련된 연기농도와 안전대피시간에 대해 연기농도 데이터를 이용하여 계산한다.

이 모델은 full-scale 화재시험으로 검증되었다. 시험은 5층 건물인 福祉部 건물에서 실시되었는데 2층에 있는 어느 한 室을 점화시키고 5층에서 측정을 수행하였다. 연기의 측정값 즉, CO 및 CO₂의 농도는 계산치와 잘 부합되었다. 건물연구소 7층의 full-scale 화재시험 연구실에서 행해진 화재 및 연기시험은 연기이용 및 제어결과가 시뮬레이션에 의하여 정확하게 예측될 수 있다는 것이 확인되었고, 건물의 주요 구성부위에서의 공기누출 특성도 알려졌다.

전이모델의 주요 개선점은 정상상태 모델에 動的效果가 부가되었다. 전이모델은 건물의 모든 구획공간에 대한 시간의 함수로서 공기의 흐름, 압력, 연기농도 및 온도를 예측한다. 연기농도 및 온도의 예측을 위하여 물질수지 및 유동방정식에 2개의 편미분방정식이 부가적으로 사용되었다.

나. 미국의 NIST 모델

NIST 모델은 원래 가압된 계단실과 엘리베이터 샤프트를 분석하고 이들 시스템의 성능에 영향을 미치는 인자를 평가하기 위한 연구 tool로서 개발된 것이다. 이 모델은 건물의 연기-제어 시스템의 설계를 위한 ASHARE Design Manual에 포함되어 있다.

NIST모델은 연기-제어 시스템이 작동하고 있는 동안 건물 전체에 대하여 정상상태의 흐름과 압력(연기 및 온도계산이 안됨)을 계산한다. 이 모델은 화재구역은 배기되게 하고 다른 구역은 가압되게 하는 구역별 연기-제어 시스템과 구획된 공간을 갖고 있는 건물에 적용 가능하다. 이 모델은 공기조화 시스템에 의한 급기에 대하여 언급하고 있지만, 일정한 것으로 가정한다. 풍압은 사용자에게 의하여 주어지거나 모델에 의하여 계산된다.

건물은 일정압과 온도를 갖는 node의 network에

의하여 시뮬레이트된다. 계단실과 샤프트는 각층별 수직공간을 연속적으로 연결함으로써 모델화된다. 문과 창문은 누출 개구부로 취급되고 프로그램 시작시 개방되거나 폐쇄된 것 중의 어느 하나로 정해진다.

이 모델은 프랑스 CSTB 건물의 9층 타워의 공기 누출의 값에 대하여 가압된 계단실에 대한 비화재 시험으로부터 얻어진 데이터로 확인되었다. Klote와 Bodart는 예측된 압력 차이가 바람의 영향이 사소한 때에는 시험 데이터와 잘 일치한다고 보고하고 있다. 그러나 이 프로그램은 바람이 상당한 상황에서는 만족한 시뮬레이션을 수행할 수 없다. 이것은 풍압 계산에 대한 자료부족에 기인한 것이다. 이 분야에 대해서는 좀 더 연구가 필요하다.

다. 캐나다 NRCC의 IRC 모델

IRC 모델은 정상상태의 공기흐름과 압력을 예측하지만, 연기농도만은 시간의 함수로서 예측된다. 이 모델은 개방된 총평면을 갖는 건물에서 계단실과 엘리베이터실에 인접한 전실에 대하여 적용할 수 있다. 이것은 시뮬레이션 과정 중의 수직 샤프트의 마찰손실, 계단 및 엘리베이터실의 문의 작동, 개진 창문, 공기조화 시스템의 작동을 설명하고 있다. 그러나, 공기조화시스템의 급배기 속도는 일정하다고 가정한다.

압력, 흐름, 누설개구부는 각각 중간 정도의 수준으로 가정한다. 화재층은 누설개구부를 수직으로 배분하기 위하여 4개 레벨로 구분한다. 화재층에서의 상태는 사용자에게 의하여 정해진 온도-시간 및 연기농도-시간으로 시뮬레이트된다. 이 모델은 열전달 계산의 기능이 없어 실내공기의 온도를 예측하지 못하지만, 바람에 의해 압력을 줄 수 있는 방식 등으로 사용자에게 의하여 특정하게 주어질 수 있다.

이 모델은 NRCC의 화재실험 타워에서 가압된 계단실에 공기를 누출시켜 수행된 화재시험 데이터와 예측된 데이터를 비교함으로써 검증되었다. 이 시험을 위하여 온도예측의 기능이 없고 순간적 혼합을 가정해야 하는 모델의 본질적 한계성을 고려할 때, 계산된 결과는 측정된 데이터와 잘 부합하였다.

라. 영국의 BRE 모델

BRE 모델의 모습은 몇가지 상이점을 제외하고는 일본의 BRI 정상상태 모델과 유사하다. BRE 모델은 다음 2가지 모드중 어느 하나에서 작동이 가능하다. 2가지 모드는 결정론적 관점과 추정통계학적 관점이다. 추정통계학적 모드에 있어서, 변수는 특정한 통계분포로부터 임의로 샘플링한 것이다. 이 모델에서 주요한 통계학적 변수는 화재의 위치와 심도, 주변의 바람과 온도조건, 개방되어 있는 문과 창문의 숫자이다. 결정론적 모드에서는 모든 통계학적 변수에 대하여 사용자가 값을 부여한다. 그러한 가정중 몇가지는 다음과 같다.

- ① 연기는 화재실과 수직 샤프트 바깥 쪽의 복도를 제외하고는 모든 구획공간에 순간적으로 확산한다.
- ② 화재층 복도에서의 연기층은 복도길이 전체에 대하여 일정한 두께를 가지고 있으며, 이 두께는 균일하게 증가한다.
- ③ 화재실의 창문은 Flashover 즉시 파열된다.

이 모델은 일반적 관점에서 화재층의 연기이동과 특정건물에서의 냉각연기에 대하여 테스트 되었는데, Appleton은 이 모델이 이들 관찰과 잘 일치하는 것으로 보고하였다.

마. 네델란드의 TNO모델

네델란드의 응용물리학 연구소는 구획된 건물에서의 연기이동에 대한 Dynamic 모델을 개발하였다. 이 모델은 전이공기의 흐름, 압력, 온도 및 연기농도를 예측한다. 이것은 온도변화에 대한 유동방정식의 흐름계수를 연속적으로 변화시켜 화재를 성장시킴으로써 개구부(예 : 틈, 창문 등)의 변화를 설명한다. 이 모델은 모든 중요한 연기-기력에 대하여 설명한다.

환기를 위한 급배기 속도는 일정하다고 가정되거나 환기 network이 動的으로 시뮬레이트된다. 화재 특성(온도-시간 및 연기생성-시간)은 사용자에게 의하여 주어지거나, 사고 공급과 잔류연료의 질량에 대해 포괄 함수를 이용하여 연소속도를 계산하는 모델에 사용하여 계산된다.

열과 연기의 확산은 각 구획공간에 대한 열 및 물질수지를 계산함으로써 결정된다. 압력은 화재에 의

하여 생성되는 가스상의 생성물과 기계적 환기나 개구부를 통한 질량 이동과의 합계를 포함하여 미분 방정식으로 계산된다.

3. 모델링의 동향

고층건물의 화재안전에 있어서 연기이동과 피난이 커다란 문제점으로 대두되어 왔다. 이 문제에 대해 캐나다의 NRCC에서는 1960년대 초부터 언급하기 시작하였는데, 다층건물에서 연기이동에 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 건물에서의 Air Handling System과 Stack effect로 대변될 수 있다. 다층건물에서의 연기이동에 대하여 고층(9~45층)의 사무실 건물에 대해 field 방식이 논의되기 시작하였다. 이는 캐나다 The National Building Code의 1970년판(다른 북미국가에서는 좀더 늦게 연구됨)에서 소개된 바 있는데, 여러가지 연기제어방식의 개발에 수학적 모델이 사용되었다.

1970년대 NRCC의 연구자들은 연기이동에 관한 기술을 조사하고 연기제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 고층건물의 비화재상태에서 field 모델에 의한 측정을 시도하였다. 1980년대와 1990년대 중에도 NRCC의 화재타워(10층)의 실험에서와 같은 비화재 상태하에서의 시뮬레이션 연구는 더욱 확대되었다.

이 분야에 관한 첫번째 심포지움으로서 1968. 6월 미국의 열 및 냉동 공조학회에 의해 개최된 “고층건물에서의 HVAC시스템과 연기이동에 관한 화재 위험성”이 있었으며, 이어서 또다른 심포지움이 1969. 4월 영국 Watfort 기술대학에서 “연기의 발생 및 이동과 연기오염으로부터 피난로의 방호”에 관하여 개최된 바 있다.

1970년대 중에도 고층 건물화재로 인한 재해가 우리나라를 비롯하여 콜롬비아, 브라질 등에서 발생하였다. 그 결과 고층빌딩의 화재에 대한 해결방안의 개발이 전세계적으로 관심의 초점이 되었다. 그러한 것들 가운데 중요한 이벤트로서 1971. 4월 미. General Service Administration(GSA)에 의하여 개최된 ‘고층건물에서의 화재안전에 관한 국제회의’가 있

다. 그 회의에서는 고층빌딩에서의 완전한 피난은 실현 불가능하고, 건물에서의 화재는 내부적으로 진압되어야 한다는 것이 인식되었으며, 고층빌딩의 성공적인 화재안전시스템에 필요한 기술수준에 이르기 위해서는 부가적인 연구개발이 필수적이라는데 인식을 같이 하였다. 건물화재에서 연기이동의 제어에 관한 회의가 1975년 영국의 화재연구소(FRS)에서 개최되었다. 그 회의에서는 연기의 생성과 이동, 기계식 가압 및 배연에 의한 연기이동의 제어 및 기타 관련주제에 대해 ‘당시 시점에서의 기술수준’이 주된 토의 의제였다.

연기의 이동과 제어에 관한 미국의 연구는 원래 NIST의 건물화재연구소에 의하여 수행되었는데, NIST의 연구에는 2가지의 중요한 부분이 포함되어 있다: (1) 화재 및 실험적 연구 (2) 계단실 및 엘리베이터실과 구역별 연기제어 시스템 (Zoned smokecontrol system)에 대한 수학적 모델의 연구이다. 이 가운데 중요한 것으로서는 구역별 연기-제어 시스템의 성능을 확인하기 위하여 Plaza 호텔에서 수행된 화재시험이 있다. 다른 기관에 의하여 수행된 화재시험으로서는 미. 뉴욕항위원회 건물과 아틀랜타시의 Henry Grand호텔에 대한 것이 있다. 이들 시험은 계단실의 가압시스템의 성능을 점검하기 위하여 수행되었으며, 스프링클러로 방호된 화재상태 하에서 가압된 계단실의 성능을 조사하기 위해 수행한 것도 있다.

건물화재에서 연기이동의 일반적인 형태는 연소가스의 부력에 의하여 上方으로 이동한다는 것이다. 이러한 상방이동의 예와 연기에 의한 잠재적 치명성에 대해 Graphic 기법을 이용한 MGM Grand Hotel (26층) 화재에 대한 NFPA의 사고조사보고서(1980)가 있다.

최근의 화재연구의 동향은 컴퓨터를 이용한 simulation에 의하여 full-scale 시험을 대체하고 있다. 과거에는 고가의 비용 때문에 불가능하였던 연구가 이제는 컴퓨터 상에서 구현됨으로써 방재기술은 더욱 정교해지고 있는 추세이다.

(出典) : Tamura, G. T., “Smoke Movement & Control in High-Rise Building”, pp.99~110.