

컴퓨터모델링에서 화재시험데이터의 이용

Use of Fire test data in Computer modeling

Arthur J. Parker, P.E.

□ 서 론

방화공학은 건물을 설계할 때에 성능위주설계(PBD : Performance Based Design)의 해법을 활용하기 위해 규범적 코드의 요구사항을 충족시키기 위한 초기의 과도기에 있다. PBD 과정의 중요한 구성요소는 컴퓨터 모델의 이용이다. 이들 모델은 열전달, 화재와 연기의 확산, 감지기의 작동, 건물 거주자의 피난과 많은 다른 화재 관련 현상들을 예측하기 위해 이용되고 있다.

컴퓨터 모델을 통하여 유용한 결과를 제공받기 위해서는 계산과정에 기본적인 입력정보가 필요하다. 대표적인 모델 입력정보에는 공간과 환기장치, 구획실 연결 개구부의 위치와 크기 등과 같은 건물 형상의 특징을 기술한 사항, 소방시설의 위치와 방을 구획하는 바닥, 벽 또는 천장의 열전도도, 밀도, 비열용량과 두께 등과 같은 재료의 특성을 포함한다.

화재가 건물 내의 소방시설에 어떻게 영향을 미치는 가는 많은 요인에 달려있다. 화재 모델링을 수행할 때, 이러한 요인들은 화재 모델에 입력 정보로서 표현되어 진다. 화재를 표현하는 입력 정보에는 연소속도, 연소열, 가스의 발생률, 그리고 이산화탄소와 그을음의 발생률을 포함한다.

이들 입력 정보는 일반적으로 표준시험형태이든 또는 특별하게 설계된 화재시험이든 간에 시험재료에 따라 결정되며, 추가적인 계측장비는 평가될 구조물이나 부재 관련 화재의 영향에 대한 특성을 기술하기 위해서 포함된다.

알코올이나 PMMA(poly methyl methacrylate; $-CH=C(CH_3)COOCH_2-$) 등과 같은 잘 특성화된 연료 공급원과 알고 있는 열방출속도를 사용하여 화재를 모델링할 때, 모델링 작업은 상대적으로 용이하다. 모델링 작업은 그 목적이 시험을 수행하기에 앞서 특정한 화재 시나리오에 대한 열방출속도 및 알지 못하거나 또는 잘 특성화되어 있지 않은 가연물의 화학적 특성 값을 예측하고자 할 경우에는 더욱 어려워진다. 이 논문에서는 이들 변수를 어떻게 측정하고 밝힐 것인지, 그리고 현실에서의 문제점을 해결하기 위해서 화재 모델에 어떻게 입력할 것인지를 설명하고 있다.

제품, 재료 및 부재에 대한 내화성능평가의 수행을 위한 규범적 요구사항은 현재 빌딩 코드, 연방규정집(CFR), 군사 규격(MIL SPECS), 그리고 산업기술기준 등과 같은 연방규

정으로써 제공되고 있다. ASTM E119, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction Materials와 같은 표준내화성능시험에서는 규정된 시간-온도 노출에 대한 시험체를 바탕으로 시간 단위의 내화성능을 제공한다.

시간 단위의 내화성능은 컴퓨터 모델링의 목적상 거의 유용하지 않은 입력 정보 데이터이다. NFPA 286, Standard Methods of Fire Tests for Evaluating Contribution of Wall and Ceiling Interior Finish to Room Fire Growth (Room-Corner Test), 그리고 ASTM E 1354, Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rated for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter (Cone Calorimeter)와 같은 다른 표준화재시험법은 평가될 동일 시험체에 대해 열방출속도와 연기 생성량을 직접 측정한다.

NFPA 286 Room-Corner Test에서는 내장재에 대한 실물크기의 화재성능이 평가되었고, ASTM E 1354 Cone Calorimeter에서는 소규모 시험체 (100 mm × 100 mm)를 다양한 레벨의 입사열선속에 노출시켰다. Room-Corner Test와 Cone Calorimeter Test로부터 생성된 데이터는 컴퓨터 모델링을 위해서 유용한 열 및 연기 방출 관련 데이터를 제공한다.

표준내화성능시험에 있어서, 시험체 내부 또는 가열로의 내부에 장착된 추가적인 계측 장비는 해당 부재를 관통해서 근처 주변까지 시험체에 전달되는 열 관련 데이터를 제공할 수 있다. 특성화된 화재 노출(fire exposure, 연소확대위험)에 대해서 부재를 관통하는 열전달분석을 수행하는 하나의 견해는 컴퓨터 모델을 검증 및 확인하는 데에 있다. 내화성능 데이터의 개선은 기준시험데이터가 모델링 시나리오와 다를 수 있는 PBD용 모델의 적절한 검증과 확인이 가능하게 할 것이다.

□ 시험 데이터의 적용

확실한 적용을 위해서, 바르게 적용된 경우에는 완전한 “표준”시험 데이터 이면 충분할 것이다. 다른 예를 들면, 증설된 계측 장비는 특정한 화재 노출(연소확대위험)에 대한 전체 반응을 적절하게 이해하는 것과 현실에서의 적용이 가능토록 유용한 데이터의 제공이 필요하다.

많은 기관에서 PBD 과정이 수행되는 동안에 기존의 조건을 정량화하는 방법과 시험 데이터를 적용하는 방법과 관련된 기술지침을 제공하기 위한 문서와 기준을 개발하고 있다.

NFPA의 수용품 및 비품의 위험과 리스크 기술위원회에서는 NFPA 557, Standard for Fire Loads for Engineering Design of Structural Fire Resistance in Building의 개발이 진행 중에 있다. 이 기준에는 건물 구조 부재의 내화성능을 산정하기 위한 화재하중 선정 작업에 대한 기본 원리를 확립함으로써 PBD 분석을 지원하기 위한 것이다. 이러한 유형의 정보는 구조물이나 부재의 화재성능의 사정(査定) 작업을 위한 설계화재를 개발하기 위해서 이용될 수 있다.

미국소방기술자협회(SFPE)에서는 건물 구조재에 대한 화재 노출(연소확대위험)을 산정하는 것과 표준에 맞지 않는 예상된 화재 노출(연소확대위험)에 대한 내화부재의 열적 성능을 예측하기 위한 방법을 다루기 위한 두 개의 기준을 개발하고 있는 중이다. 이렇게 진행되고 있는 모든 작업은 변화하는 노출 조건 하에서 재료나 시스템 성능을 예상하기 위한 컴퓨터 모델에 입력할 수 있는 준비된 데이터에 제공된다. 연구를 위한 이러한 접근법의 핵심은 적합한 양과 유형의 데이터가 생성되도록 하는 방식으로 적합하게 계측장비를 장착하기 위한 것이다.

이러한 분석 유형에 대한 두 개의 보기는 표준화재시험실이 예비 계측장치의 유무에 따른 빌딩코드 요구사항을 충족시키면서 제품의 성능을 예측하기 위해 어떻게 컴퓨터 모델이 이용되어져 왔는지에 대한 설명은 아래와 같다.

□ 단열재료의 열전달 분석

실험실 용도의 13층짜리 건물의 환기설비는 각 실험실 층에 설치되어 있는 전용 급기 및 배기 덕트를 포함한다. 이격거리의 제약으로 인하여, 덕트설비는 환기설비가 설치되어 있는 층의 아래층의 상부 공간에 위치되어 있었다. 방화댐퍼는 바닥의 내화성능이 유지되도록 내화구조의 바닥 슬래브를 관통하는 각 덕트설비에 설치되도록 규정되어져 있다.

건물의 소유주는 건물 내에 설치되어져 있는 수많은 방화댐퍼에 대해서 건물의 수명 동안 제기될 수 있는 문제점 전반에 걸쳐서 댐퍼의 유지관리를 위한 점검과 정비를 하도록 지시했다.

분석이 정격 방호구획실의 내부에 있는 각 전용 덕트설비의 방호에 의해서 방화댐퍼를 배제할 수 있는 가능성을 평가하도록 수행된 경우에는 각 전용 덕트설비는 내화구조의 샤프트 부재로 간주되어진다. 내화구조의 덕트 부재를 만듦으로서, 이들 전용 덕트는 정격 샤프트로 간주되어질 수 있고, 방화댐퍼를 배제시킬 수 있다.

실험실의 특수한 특성으로 인하여, 배기덕트가 화재 시에도 항상 운전되도록 전용 전원이 설치되어 있어야 한다.

화재가 화재구역 내부에 있는 덕트설비의 방호되지 않은 구역의 침투로 덕트설비 안으로 화재가 확대될 것으로 조심스럽게 추정되어졌다. 분석이 설치 요구사항을 확립하기 위해 수행되어 졌을 경우에는 덕트설비 내부의 화재가 덕트 내부로 제한할 뿐만 아니라 덕트 근처에 있는 가연성 물질을 착화시키지도 않을 것이다.

보강 강재 덕트 부재(reinforced steel duct assembly)의 노출되어 있는 쪽에 설치되어 있는 두께가 38 mm인 단층의 세라믹 섬유 단열재가 두 시간의 내화성능이 있는지를 확인하기 위한 실물크기 화재시험이 수행되었다. 외부의 화재가 덕트설비 내부로 침투하는 것에 대비해서, 이번 시험에서 화재가 덕트설비의 내부로 침투되지 않음이 확인되었다.

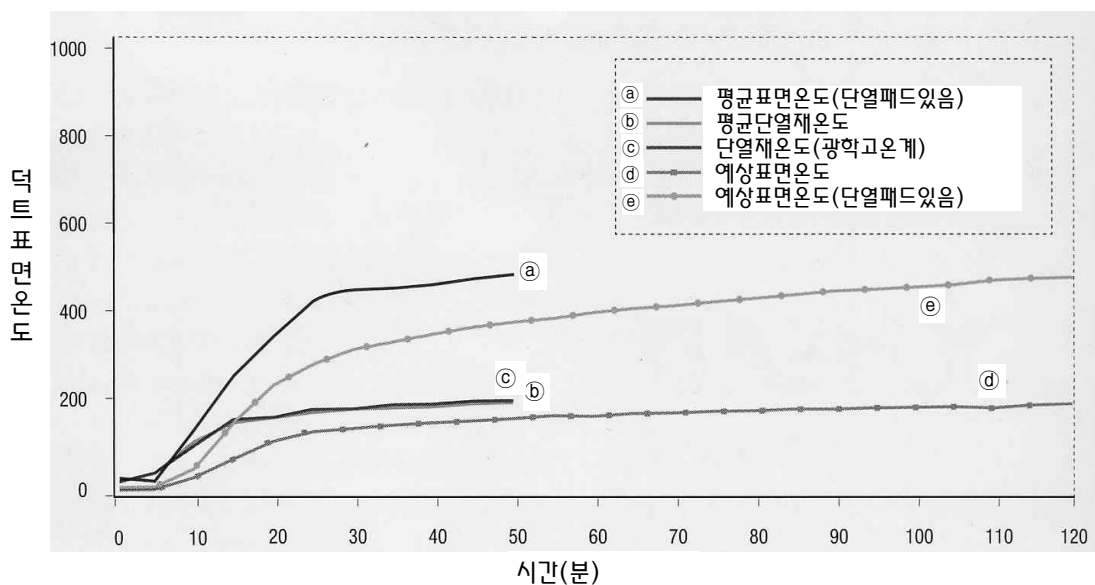
이러한 시험 데이터를 이용하여, 유한요소 (FEM) 열전달 모델 HEATING 7은 단열재의

비열과 열전도도를 산정하기 위해 수행되었다. 단열재료의 두께와 밀도는 시험을 수행하기 이전에 확인되었으며, 최종 시험보고서에 기록되어졌다.

알고 있는 화재 노출(연소확대위험)과 단열재료의 특성을 이용한 시험 측정값을 재연한 다음에 단열 처리된 덕트의 화재성능이 평가되어졌다. 모델링의 결과는 화재 노출 120분 후에 단열재료의 표면온도는 대략 200°C이었으며, ASTM E 119 표준 열전대 패드의 아래에서는 대략 480°C이었던 것으로 예상되었다.

예상된 표면온도에 있어서의 예상치 못한 큰 불균형이 주어진 상황에서 (열전대 패드 덮개의 유무에 따라), 소규모의 내화성능 시험이 단열 처리된 부재를 통과하는 온도 변화를 측정하기 위해 수행되었다. 강관은 노출되지 않은 표면을 두께가 25 mm인 단층의 세라믹 섬유 단열재료로 단열 처리되었으며, ASTM E 119 열전대 패드로 덮인 열전대는 노출되지 않은 표면에 설치되었고, 피복되지 않은 열전대는 ASTM E 119 열전대 패드의 직근에 있는 단열재료의 표면에 배열되었다. 광학 고온계는 노출되지 않은 표면의 중앙에 표면온도를 측정하기 위한 적당한 장소에 설치되었으며, 추가적인 열전대는 ASTM E 119 열전대의 아래에 있는 강관/단열재료의 경계면에 설치되었다.

노출되지 않은 과도표면온도는 [그림 1]에 예시되어 있는 ASTM E 119 단열패드가 있는 열전대와 없는 열전대로 측정되었다. 측정시험데이터는 해당 모델 (기존 제품으로 인하여) 보다 33% 얇은 시험부재에 설치되어 있는 단열재료로 인하여 예상온도 보다 대개 높다. 전체적인 온도 비교를 무시하더라도, ASTM E 119 열전대 패드 덮개가 있는 것과 없는 것의 표면온도의 측정 차이는 예상표면온도와 비슷하였다. 이번 시험의 결과는 모델 예상 값이 적용 가능하였고, 분석결과는 분석 결론의 전후관계 내에서 타당하였다.



[그림 1] 노출되지 않은 덕트 단열 표면의 측정온도와 예상온도

이러한 분석의 결과로서, 각각의 전용 덕트설비는 방호구획실의 경계(the rated fire zone boundary)에서부터 건물 바깥으로의 출구(the point of discharge)까지를 내화구조

의 샤프트 구획실로 간주될 수 있는 것으로 입증되었고, 방화담퍼는 바닥의 높이로 설치될 필요가 없었다.

□ 방어능력 조건과 거주자 피난

제품은 플라스틱 치장재가 합체된 벽체 또는 천장용의 내장재로서 기능을 하도록 의도되었으며, 빌딩코드에 규정된 내장재 요구사항을 충족시키기 위해서, 이러한 노출형 플라스틱 외관은 ASTM E 84, Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials에 따라서 시험했을 경우에 Class A로서 분류될 필요가 있었다.

시험은 빌딩코드의 대체 내장재 규정에 따라 수행되었으며, 이 규정은 NFPA 286에 따라서 재료의 화재성능을 평가하는 것을 허용하고 있다. 시험결과는 이 재료가 벽체에만 또는 벽체와 천장에 설치되었을 경우에 화염확산의 제한이 관측되었던 것으로 나타났지만, 연기 발생 범위를 초과하였다. 컴퓨터 화재 모델링은 설치 형태가 빌딩코드 요구사항을 충족시키지 못한 경우에 설치된 형태의 내부에서 거주자의 피난을 방해하는 방어할 수 없는 조건으로의 발전이 예상되지 않았음을 결정하기 위해 이용되었다.

CFAST(Consolidated Fire and Smoke Transport) 컴퓨터 모델은 스프링클러설비가 설치되지 않은 다양한 건물 형태의 내부에서 연기의 확산과 축적 및 시계(視界)의 감소를 예상하기 위해 이용되었다. 방어할 수 없는 조건으로의 발전 관련 예상시간은 건물의 거주자가 화재 시에 안전하게 건물에서 피난할 것으로 예상되는 시간을 평가하여 예상피난시간과 비교하였다.

건물의 거주자들이 안전하게 피난하기 위해서 피난시간은 방어할 수 없는 조건에 도달하는 시간보다 반드시 많아야 한다. 방어할 수 없는 조건으로의 발전 관련 시간은 연기 축적이 시계(視界)를 10 m 이내로 제한하거나 연기 층이 바닥 위로 1.8 m 까지 하강하는 시간으로서 규정되어져 있다.

시험설비 내부의 화재 및 연기 조건은 Room-Corner 시험 중에 생성된 데이터를 바탕으로 모의시험을 하였다. 상층부의 온도는 시험실의 내부에서, 그리고 열방출속도와 연기 발생량은 배기후드의 내부에서 측정되었다.

시험실/후드의 형태는 CFAST에 있어서의 시험실로 모사되었으며, 측정된 전체 열방출속도 곡선 (버너의 입력과 내장재로부터의 출력)은 이 모델을 위한 화재 입력(fire input)으로 사용되었다. 배기덕트에서의 측정된 연기생성량은 예상 및 측정 전체 연기방출속도가 대등하게 될 때까지 탄소/이산화탄소 (C/CO_2)의 비율을 조정함으로써 모델화되었다.

연기확산모델링은 평가될 특정 건물 형태의 내부에서 연기의 축적, 상층부의 형성과 하강 속도를 결정하기 위해 수행되었다. CFAST는 시계(視界)를 산정하기 위해 이용된 시간 및 연기흡광도(OD, optical density)의 함수로서 (바닥 위쪽으로 측정된) 연기층 높이를 산정했다.

산정피난시간과 방어불가능한 조건의 발생시점 관련 시간의 비교는 거주자가 방어불가능한 조건의 발생시점 이전에 건물로부터의 피난하는 능력이 있다는 것을 나타내었다.

이들 분석결과는 내장재로서 이러한 제품의 설치에 거주자에 대한 위험이 없으며 빌딩 코드 요구사항의 의도가 충족되었다는 것을 나타내었다.

□ 모델의 제한사항

모델에 의해 생성된 결과는 단지 모델 자체와 입력 정보의 특성이 같으며, 적절히 정의된 화재시험데이터는 특정 시나리오를 위한 적합한 입력 정보를 제공하는 것 외에 해당 모델을 확인 및 검증하기 위한 능력을 제공한다. 설계 기술자를 위한 유효시험데이터의 전체 양이 점점 증가하는 것은 컴퓨터 모델 출력정보의 신뢰도를 개선시키는 하나의 핵심적인 견해이다.

모델의 제한사항은 입력 정보의 특성만큼 중요하며, 이들 제한사항은 확인 및 검증 과정에서 평가되어져 왔다. 그렇지만, 대부분의 경우에 방화기술자는 이러한 평가 과정에 관련되어 있지 않다. 산정작업이 착수되기 전에 등록되어 있는 제한사항을 포함하여 모델 산정 알고리즘의 완벽하게 이해하는 것이 중요하다.

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

번역 : 대전충청지부 차장 백운용