

성능위주설계의 신뢰성 확보를 위한 외국 사례 검토

황준호 · 문성웅 · 최규출* · 유상훈

(주)페스텍 화재시험연구소, 동원대학 소방안전관리과*

Reliability of the Performance-Based Design: International Cases

Hwang, Jun Ho · Moon, Sung Woong · Choi, Kyu Chool* · Ryu, Sang Hoon

Fire Test Laboratory, Festec International Co., Ltd.

Dept. Fire Safety Management, Tong Won College*

요 약

법률 중심적인 사양위주 설계의 한계를 극복하고자 국내 · 외 다양한 분야에서 성능위주 설계가 사용되고 있다. 국내에 도입된 소방 설비에 대한 성능위주 설계는 도입단계로 볼 수 있어, 선진국의 사례를 통해 도입 초기인 현재 발생할 수 있는 문제점과 대안을 분석하였다.

1. 서 론

대형 화재는 항상 소방관련 제도를 발전시켜 왔다. 특히 건축물의 고층화 및 인구의 밀집 때문에 화재로 말미암은 인명 피해는 더욱 커질 수밖에 없었다. 이에 건축재료, 소방설비, 피난설비 등에 대한 기준 제정을 통해 최소한의 안전 확보를 위해 노력하고 있다. 최근에는 법률 위주의 설계를 통해 안전을 확보하기 어려운 대형 또는 특수 건축물에 대해 예상 화재 시나리오를 설정해 소방 및 피난 설비의 효용성을 검증하는 성능위주 설계를 도입하고 있다.

그러나 성능위주 설계 또한 설계자의 해석, 지식수준에 따라 유동적인 결과가 나올 수 있어 평가 시 분쟁의 여지를 가지고 있다. 이에 외국 사례를 검토하여 성능위주 설계 중 발생할 수 있는 문제점과 그 해결방안을 찾고자 한다.

2. 성능위주 설계 시행 중 발생하는 문제점

The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering은 성능위주 설계의 과정과 성능 평가기준을 제시하여 성능위주 설계자에게 지침서와 같이 사용되고 있다. 그러나 설계 수행 중 필요한 화재 물성값 및 시나리오의 설정은 설계자가 정하도록 하고 있다.

이처럼 성능위주 설계의 신뢰성 확보는 설계자가 어떤 시나리오를 구성하는지, 화원은 어떻게 설정할 것인지 등 주관적인 판단이 필요한 부분이 있기에, 이에 따라 발생할 수 있는 문제점을 지적하고자 한다.

2.1 시나리오에 적합하지 않은 시뮬레이션 프로그램 선정

화재 모델링은 화재역학적인 공식을 기반으로 실험실실험을 통해 구축한 자료를 바탕으로 화재현상을 구현하는 것으로서 필드 모델링을 중심으로 보면 미국 표준 기술연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)의 FDS(Fire Dynamics Simulator)와 밀폐공간의 연기 유동을 분석하는 JASMINE(Analysis of Smoke Movement In Enclosure), SOFIE(Simulation Of Fires In Enclosures), 특수한 경우에는 가연성 소재의 방과 같은 복잡한 환경의 위험요소를 분석하고 예측하는 BRANZFIRE, 화재 시에 사람의 움직임을 고려하여 화재현장을 재현하는 FRS의 CRISP(Computation of risk Indices by Simulation Procedures) 등이 있다. 이중 국내에서 보편적으로 3차원 필드모델링 프로그램인 FDS는 CFD를 기반으로 하는 프로그램으로 화재의 정량적 위험성 분석을 위하여 성능위주 설계에 사용하고 있다.

모든 프로그램은 서로 다른 특징을 가지고 있어 설계자는 어떠한 프로그램을 이용하여 화재 위험성을 평가할 것인지에 대해 고려하여야 한다. 특히 사용할 소프트웨어의 한계성에 대해 정확한 파악이 필요하다.

2.2 물질의 화재 특성 수치 데이터 부족

화재시뮬레이션은 물질의 입력 변수에 따라 결과의 신뢰성이 결정된다. 입력요소로 사용하는 특성 수치는 열전도도, 비열, 밀도, 반응열, 연소열, 연소 온도 등이 있으며 이중 열전도도, 비열, 밀도는 가연물질의 제조사에서 제공되는 것이 일반적이거나, 화재 특성치인 반응열, 연소열, 연소온도는 체계적으로 정리된 국내 자료가 없어 콘칼로리미터, 룬코너 실험 등 설계에 사용되는 물질의 화재 특성 수치를 수집할 수 있는 장비들이 설치된 연구소 및 기관을 이용할 수 있으나 대부분의 전산 시뮬레이션 사용자는 비용 문제 때문에 NIST의 표준 입력 자료에서 공개한 소수 물질(plastic, fabric, foam, PMMA, hand-made carpet)의 특성 수치를 사용하고 있어 결과의 신뢰성을 저해하고 있다.

NIST, VTT, NRC 등의 보고서에서는 해당 물질의 정확한 화재 특성 수치가 입력되었을 때 시간별 온도상승, 화염전파 등이 실물화재와 유사한 결과를 도출할 수 있다고 말하고 있다.

필드 모델링의 한 종류인 FDS에서 화재로 발생하는 이산화탄소의 발생량은 발화 물질의 구성 원소를 바탕으로 계산된다. 그러나 불완전 연소 중 발생하는 일산화탄소는 사용자가 입력하여 결과 값에 반영하게 되어 있어 성능위주 설계에 적용할 경우, 반드시 정확한 값을 입력해야 일산화탄소 발생으로 나타난 위험도를 산정할 수 있다. FDS 반응 매개 변수 (Reaction Parameters)의 기본설정에서는 연료에서 Soot이 차지하는 비율을 0.01, CO가 차지하는 비율은 0으로 두고 있다. 결국, 정확한 값을 입력하지 않을 때 Soot과 CO 등 발생량이 전혀 다른 결과 값을 얻을 수 있음을 의미한다.

3. 성능위주설계의 신뢰성 확보를 위한 외국 사례

3.1 환경 및 특수성에 따른 화재해석 도구 선정

Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications Volume 1에서는 화재 해석 도구인 FDT, CFAST, FDS의 장단점을 비교하였다. 상부의 뜨거운 공기 온도를 예측하는 데에는 CFAST와 FDS가 우수한 것으로 나타났다, 화염 높이는 FDT와 CFAST가 우수한 것으로 나타났다. 실내 압력에 대해서는 CFAST와 FDS는 결과 값이 우수하나 FDT는 계산할 수 없는 것으로 나타났다.

이처럼 해석하고자 하는 목적과 환경에 따라 화재해석 도구를 선정하는 것이 신뢰성을 확보하는 주요한 변수가 될 수 있다.

3.2 입력 로직의 공개를 통한 신뢰성 확보

VTT는 4가지 재료(Spruce timber, MDF board, PVC wall carpet on gypsum board, upholstered)에 대해 콘칼로리미터, SBI, 룸 코너 실험을 시행하였으며, 그 결과 값을 화재 FDS의 결과 값과 비교한 연구가 진행되었다. 또한, 보고서에 활용된 물질의 입력 로직을 공개해 신뢰성을 확보하였다.

Parameters used for the 9 mm thick spruce timber in cone calorimeter, SBI test and room corner test simulations

```
&MISC REACTION=WOOD_1'/
&REAC ID=WOOD_1'
  FYI=Ritchie, et al., 5th IAFSS, C_3.4 H_6.2 O_2.5'
  SOOT_YIELD=0.01
  NU_O2 = 3.7
  NU_CO2 = 3.4
  NU_H2O = 3.1
  MW_FUEL = 87.
  EPUMO2 = 11000. /

&SURF ID='SPRUCE'
  PHASE = 'CHAR'
  MOISTURE_FRACTION = 0.1
  DELTA=0.01
  A_PYR=2.6E1
  MASS_FLUX_CRITICAL=0.012
  TMPIGN=320.0
  HEAT_OF_VAPORIZATION=400.
  DENSITY = 450.
  KS=0.20
  C_P=1.3
  CHAR_DENSITY = 150.
  KS_CHAR=0.12
  C_P_CHAR = 1.5
  WALL_POINTS = 30
  BACKING = 'INSULATED' or 'EXPOSED' /
```

NB. BACKING='INSULATED' was used with cone calorimeter. With SBI test simulations, both options BACKING = 'INSULATED' or BACKING = 'EXPOSED' were used. In room corner test simulations we used the option BACKING = 'INSULATED'.

B.3 ICFMP BE #4

```
&HEAD CHID='ICFMP4_01', TITLE='NRC ICFMP Benchmark Exercise 4, Test 1' /
&GRID IBAR=36, ZBAR=72, XBAR=56 /
&FDIM XBAR=0.0, XBAR=3.6, YBAR=0-3.6, YBAR=3.6, ZBAR=5.7 /
&TIME TMIN=1800. /

&MISC TMFA=19., SURF_DEFAULT='LIGHT CONCRETE', NFRAMES=1800, REACTION='DODECANE' /

&REAC ID='DODECANE'
  FIT='C_11.64 H_25.29'
  MH_FUEL=45.0
  NU_O2=17.96
  NU_CO2=11.64
  NU_H2O=12.65
  EPUNO2=12736.
  DTSAM=15.
  CO_YIELD=0.012
  SOOT_YIELD=0.042 /

&SURF ID='BURNER', HRRPFA=1000., RAMP_Q='e1', RGB = 0.40, 0.40, 0.40, IMPVAL=216. /
&RAMP ID='e1', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='e1', T= 92.0, F=0.11994 /
&RAMP ID='e1', T= 180.0, F=1.5936 /
&RAMP ID='e1', T= 260.0, F=2.62364 /
&RAMP ID='e1', T= 600.0, F=3.19716 /
&RAMP ID='e1', T= 822.0, F=3.35124 /
&RAMP ID='e1', T= 870.0, F=3.3812 /
&RAMP ID='e1', T=1368.0, F=3.5816 /
&RAMP ID='e1', T=1395.0, F=0.0 /

&SURF ID = 'CONCRETE'
  RGB = 0.66, 0.66, 0.66
  C_P = 0.88
  DENSITY = 2400.
  KS = 2.1
  DELTA = 0.25
  BACKING = 'INSULATED' /

&SURF ID = 'CONCRETE TARGET'
  RGB = 0.76, 0.76, 0.76
  C_P = 0.88
```

그림 1. 입력 로직을 공개한 VTT 및 NRC 보고서

결국, 입력 로직 공개는 성능위주설계의 공정성을 판단하는 잣대가 될 수 있다. 그러나 모든 입력 로직이 쉽게 얻을 수 있는 것은 아니다. 예를 들어 총방출열량은 콘칼로리미터, SBI 실험 등을 통해 얻을 수 있으며, 인화점과 연소점은 Tag Closed Cup Flash Point Analysis나 Cleveland Open Cup Flash Point Analysis를 통해 얻을 수 있다. 이처럼 물질에 맞는 수치 사용을 통해 더욱 정확한 성능위주 설계를 시행할 수 있다.

4. 결 론

국내에서는 성능위주설계에 대한 검증할 수 있는 연구기관이 없으며, 관련 연구도 초기 단계에 머물고 있다. 그러나 이미 소방사업에 성능위주설계가 도입된 만큼 신뢰성을 높일 방안에 대해 지속적으로 연구해야 한다. 특히 성능위주설계 시행에 따라 설계자와 감독기관의 분쟁을 예방하기 위해서는 상황에 맞는 화재 해석도구 선정 및 정확한 화재특성 수치의 삽입을 위한 노력이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Philip J.DiNenno, P.E., Dougal Drysdale, PhD., Craig L. Beyler, PhD., W. Douglas Walton, P.e., Richard L.P.Custer, John R. Hall, Jr.,PhD., John M. Watts, Jr., PhD., (2003). "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering" Natl Fire Protection Assn.
2. 지호성 등 5인, (2011). "화재감식(Kirk's Fire Investigation 6판)" 두양사.
3. Jukka Hietaniemi, Simo Hostikka and Jukka Vaari, (2004). "FDS simulation of fire spread - comparison of model results with experimental data", VTT Building and Transport.
4. M. H. Salley, R.P. Kassawara, (2007). "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications : Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS)", NUREG-1824, EPRI 1011999 Final Report.