

A-15

## 구조물 내화성능 평가에 대한 고찰

한상훈, 최승관  
한국건설기술연구원 화재및설비연구센터

## Review on the Estimation of Structural Fire Resistance

HAN Sanghoon, CHOI Sengkwan  
Korea Institute of Construction Technology,  
Fire & Engineering Services Research Center

## 1. 서론

근래에 건축 및 토목 구조물에 있어서 다양한 구조물 설계 개념 및 FE 해석기술의 발달로 구조물의 형상과 구성 등에 장시간, 대공간 및 다목적 등의 많은 변화가 오고 있으며, 특히 강구조는 내화설계의 공학적 기법이 적용되면서 철골조의 기술적 활용 범위가 증대되고 있다. 이러한 환경에서 구조물의 연속적 붕괴현상과 인접지역으로의 화재확산을 제어하고, 최소피난시간의 확보 및 적절한 화재진압을 위하여 성능기반 내화구조설계 기법이 등장하여 발전하게 되었다. 이에 국내에서도 화재안전과 성능설계의 개념을 도입하여, 현재 설계 적용을 시도하는 단계에 있다.

건축물의 내화설계는 구조물 전체 또는 부재단위의 요구되는 내화(성능 또는 내화시간)를 위하여 또는 종합적인 화재안전을 위하여 내화피복과 함께 소방설비가 필요하게 되는데, 구조의 관점에서 내화설계는 구조부재의 화재시 내화성능의 평가를 기본 전제로 한다. 이에 구조화재공학 연구를 지속해 온 유럽 여러 기관들의 강구조 내화설계 기준 또는 시방서에는 구조재 및 내화재의 고온물성과 부재의 화재거동 등의 기초 실험자료를 바탕으로 각각의 조건에 부합하는 제한온도를 설정하여 설계에 이용하고 있다.

본 연구에서는 화재공학에서 주로 사용되는 내화설계와 내화성능의 개념을 알아보고 국내 내화설계의 확립을 위한 구조물(또는 부재) 내화성능의 평가 방법을 모색하고자 한다.

## 2. 강구조 내화성능 평가기법

구조물에 요구되는 내화성능은 각 나라마다 약간의 차이는 있으나, 공통적인 개념은 화재시(Standard fire test)에 구조물이 단열(Insulation) 및 보전(Integrity)성능과 안정성(Load carrying capacity)을 변위와 변형속도의 제한값(failure) 이내에서 보유하는 것이다. 이 장에서는 설계에서 사용되는 주요 내화평가(assessment of fire resistance) 기법과 관련 개념을 영국의 강구조 내화설계 기준(BS5950 Part8)에 수록되어있는 내용을 중심으로 설명하였다.

2.1 극한 온도법(Limiting temperature method)

구조재료가 고온에서 강도와 강성을 점차 상실하여 부재가 사용하중을 더 이상 지지할수 없게되면 파괴에 도달한다. 이때 강재 단면의 분포온도중 최고값을 극한온도라하고 재하하중 크기와 상태에 따라 다르므로, 실험데이터를 기반으로 table 1과 같이 도표로 제시하고 있다. 이 값을 화재시의 설계온도와 비교하여 내화재의 사용유무 또는 피복재의 두께 산정 기준으로 활용 한다.

Table 1. Limiting temperatures for the design of hot finished members

Description of member	Limiting temperature(°C) at a load ratio* of:						
	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Members in compression, for a slenderness $\lambda$ : $\leq 70$ $> 70$ but $\leq 180$	510	540	580	615	655	710	800
	460	510	545	590	635	635	635
Non-composite members in bending supporting concrete slabs or composite slabs: unprotected members, or protected members complying with item a) or b)** other protected members	590	620	650	680	725	780	880
	540	585	625	655	700	745	800
Members in tension : all cases	460	510	545	590	635	690	770

\* Load ratio : ratio of load applied at fire limit state to the load carrying capacity according to the design method

\*\* Strain levels : a) composite members in bending which are unprotected or protected with fire protection materials which have demonstrated their ability to remain intact at this level of strain: 2.0%; b) non-composite members in bending which are unprotected or protected with fire protection materials which have demonstrated their ability to remain intact at this level of strain: 1.5%;

2.2 모멘트 내력법(Moment capacity method)

부재의 요구되는 내화시간에 대한 단면의 모멘트 내력(plastic moment capacity)을 계산하는 방법으로, 강재의 노출정도와 부위를 구분하여 시간별로 산정한 온도분포(표)를 적용하여 구하는데, 단면력은 Fig. 1과 같이 응력의 분포가 온도증가에 영향을 받게된다. 여기서 피복두께의 산정 등은 단면 형상계수(Section Factor, The perimeter of the steel exposed to flames( $H_p$ )/The cross sectional area of the section( $A$ ))를 사용한다.

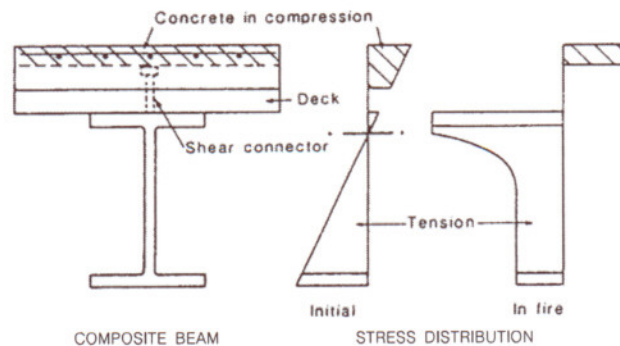


Fig. 1. Stress distribution in composite beam in fire



### 2.3 구조 모델(Structural modeling)

구조내화 해석 및 설계 조건에서 모델의 선정은 부재 단위의 설계에서 sub-frame 해석과 전체 구조의 해석까지 목적에 타당한 대상에 대하여 수행할 수 있다. 이는 단순 지지 조건부터 고정 지지 조건까지의 부재단위의 경계조건(restrained conditions)의 영향과 분석 대상 모델이 속한 화재 영향하의 구획외부의 연속된 타 영역에서의 영향성 분석을 가능하게 하며, 설계 화재 강도 또한 표준화재 뿐만 아니라 parametric 화재를 선정할 수 있음으로 실제 상황에 대한 모사를 정확히 수행하여 다양한 전략적 조건에서 안전성을 확보를 검토 할 수 있게 한다. sub-frame과 전체 구조의 해석에서는 화재 조건에서 구조물에 발달하는 열용력을 내재하여 분석 할 수 있으므로, 부분적으로 발생하는 구조물의 불안전 변형 및 역학적 변화에 대한 평가 가능성을 포함하고 있다.

## 3. 구조물 화재거동 평가기법

구조물에 대한 화재 시험은 막대한 비용이 소요 되는 특성으로 인하여 반복적인 수행에 어려움이 상존한다. 그러므로 표준화재 조건에서의 구조물의 시험에 대한 신뢰할만한 분석을 경제적이고 반복적인 수치해석 방법을 사용하여 분석하기 위해 오랜 기간에 걸쳐서 다양한 연구들이 수행 되어 왔다. 이 장에서는 구조물 거동에 관한 실험과 해석적 연구 현황을 검토하였다.

### 3.1 실험적 연구

구조물의 화재거동 연구는 주로 북미 (NRCC, NFL, NIST), 유럽 (BRE, SNTRI) 그리고 일본 (BRI)의 여러 연구소가 주도하고 있으며, 각 대학들이 세분화된 연구를 수행하는 방식으로 진행되고 있다. 연구 대상으로는 강재기둥, 합성 기둥, 강재 보, 합성 보, 슬래브, 접합부, 3D 프레임, 그리고 실물 대형 화재 실험 등으로 구성 되어 있다.

합성보의 내화 거동연구는 국부 좌굴, 인장 파괴, LTB, 콘크리트 슬래브와 연동 거동, 단면 내 비선형적 온도 분포, 지지 조건의 영향 등으로 보다 복잡한 거동의 형상을 보이고 있다. 인장 파괴에 대한 체계적인 연구는 영국의 British Steel에서 수행되어 왔으나, 국부좌굴과 LTB에 관련된 연구는 아직도 매우 부족한 상황이다. 특히 비선형 응력 조건과 온도 조건에서의 거동에 관한 연구는 추가적으로 요구 되고 있다. 합성보의 거동에 대해서는 British Steel과 Steel Construction Institute에서 단순지지 조건의 내화 거동과 다양한 형상의 슬래브의 영향 및 피복 조건의 영향에 대한 연구가 수행 되었으며, Zhao & Kruppa는 shear connector의 고온에서 load-slip, 관련 국부 파괴 형상 관계와 연속보의 부 모멘트 상황에서의 국부 좌굴 형상에 관한 연구 성과를 제공하였다. 추가적으로 연구가 필요한 부분은 지지 조건을 제한한 상태에서의 거동 파악에 관한 부분이다.

### 3.2 해석적 연구

초기의 연구들은 표준화재조건에서 구조물 부재 단위의 극한 재하 능력의 분석이 중요 관심사가 되고 있다. 이러한 연구들은 표준화재시간과 주어진 재하 조건에서의 부재의 처짐과 변형을 분석하였고, 이를 토대로 구조물의 거동에 대한 해석을 시도하였다. 이러한 해석방법은 부재 단위의 small deflection과 한 지역에서의 기본적인 휨 거동을 분석하는 영역 정도의 화재에 대한 영향으로 국한 되었다. 그러나, 90년대 초반부터는 어떠한 화재조건에서 구조물의 전체적인 거동을 파악하고 구조물 요소간의 상호작용으로 인한 추가적인 거동 향상 효과를 인식하게 되었으며, 이를 설명하기 위하여 지난 10여 년간의 연구가 집중 되었다. 이는 수치 해석 방법뿐만 아니라, 구조물의 전체적인 거동의 적절한 모델링(구조의 설계조건, 하중조건, 화재에 대한 노출 조건 및 지지 조건 등을 고려)에도 중요한 요소가 되었다.

수치 해석 기법이 설계 단계에 도입되기 위한 신뢰성을 확보하기 위해서는 제안된 모델 거동

의 실험을 통한 확보와 수치해석 방법의 분석에 대한 충분한 비교 검토가 반드시 필요하다. 이는 화재 조건에서 주로 수행 되고 있는 부재 위주의 실험 방법을 통하여 확보 된 검증은 국부적인 거동에 대해서는 응용이 가능하나, 전체적인 거동에 관한 분석에는 한계가 있다. 이의 극복을 위하여 영국에서는 Cardington의 7차 실물화재 실험을 실시하였고, 다양한 해석용 소프트웨어를 사용하여 전체 구조물의 거동에 대한 검증을 통하여 한 단계 발전한 설계 방법을 제시 하였다.

한편 화재의 영향을 받는 구조물은 각 부재에서 높은 비선형적인 온도의 분포를 나타내므로 온도에 대한 재료의 비선형적인 하중-변형을 관계에 영향을 주어 단순 해석에 어려움을 주고 있다. 구조물의 내화 설계에 있어서 그 방법적인 단계는 열전도 FE 해석과 이를 기본으로 한 구조물의 거동에 대한 FE 해석으로 나누어진다. 현재 사용 가능한 대다수의 소프트웨어들은 이 두 가지 부분이 연동되어 있지 않고 독립적으로 나뉘어져 있어 시간이 많이 소요된다. 또한, 열전도 해석은 구조물에 사용되는 재료뿐만 아니라 다양한 내화 피복에 대해서도 고려가 필요하므로 해석을 수행할 경우 그 사용상의 한계를 정확히 인식해야 한다. 구조해석용 FE 해석은 전문가용 프로그램이므로 일반적으로 사용하기에는 어려움이 존재하여 각별한 주의가 필요하다.

#### 4. 고찰 및 향후과제

구조물의 성능기반 내화설계는 정확히 제시된 목표 성능기준을 다양한 설계방법으로 만족시키는 것이 그 기법의 근간을 구성하고 있으나, 현재 국내 설계에서는 구조물의 거동기준 및 내화피복의 성능기준이 적절하게 제안되어 있지 못한 실정이다. 본 연구에서 구조물 내화성능의 평가요소와 화재조건실험 및 수치해석을 통한 내력평가와 거동 분석 연구를 고찰하였다. 향후 이러한 연구 결과를 축적하여 내화설계의 종합적 설계지침에 활용 할 수 있는 다양한 설계기술이 계속 제안되어야 할것이다.

\* 감사의 글 이 연구는 한국건설기술연구원의 지원(07기본)으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Choi, SK, Burgess IW, Plank RJ. (2007), "Behaviour of lightweight composite trusses in fire - a case study", Steel and Composite Structures An International Journal(P105-118)
2. BS5950. Part 8: Code of practice for the fire resistant design, British Standards Institution; 2003.
3. ENV 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steelstructures. Part 1.2: General rules: Structural design for fire. Brussels: CEN; 1993.
4. John A. Purkiss. (1996), "Fire Safety Engineering Design of Structures", Butterworth Heinemann