

단층 강구조 건물의 구조내화설계

Structural Fire Engineering Design of Single-Storey Steel Buildings



민 정 기*
Min, Jeong-Ki

1. 개 요

근래 들어 화재로 인한 단층 강구조물의 붕괴는 점차 증가하고 있으며, 이로 인한 인적 및 물적 피해는 매년 증가하고 있다. 국내에서 공장과 같은 산업시설에 대한 내화설계는 구조설계자의 합리적인 판단 없이 건축물의 용도별 층수 및 최고 높이에 따른 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」의 별표 1의 “내화구조의 성능기준”(국토교통부령 제193호)에 따라 이루어지고 있다. 이와 같은 설계방법은 구조적인 내화성능보다 고온에서 견딜 수 있는 재료 각각의 열특성에 의존하는 경향이 있어 화재 발생 시 구조물의 붕괴 가능성을 예측하기 어려워 소방관의 진입이 용이하지 않으며 화재진압에 상당한 시간을 필요로 하게 된다.

반면에 유럽을 중심으로 한 선진국에서는 대형 철강회사를 중심으로 성능에 기반한 내화설계를 도

입하여 강구조물을 사용하고자하는 엔지니어, 건축설계자 및 시공자를 대상으로 다양한 설계 매뉴얼을 개발하여 보급하고 있다.

따라서 본 기사에서는 국내에서도 적용 가능한 구조내화설계의 기본개념 및 단층 강구조 건물의 일반적인 내화설계 절차를 중심으로 기술하였다. 이를 바탕으로 단층 강구조 건물의 구조내화설계에 대한 이해와 구조실무자들이 구조내화설계를 적용하는데 도움을 주고자 한다.

2. 단층 강구조 건물의 화재 위험

2.1 화재안전의 목적

대부분의 화재안전 기준의 주목적은 생명(건물 재실자와 소방관), 환경 및 어느 정도의 재산(건물 내용물과 건물) 보호를 보장하는 것이다. 능동과 수동 방화시스템의 조합을 포함한 많은 방법들을 통하여 그 목적은 다음과 같다.

* 정회원·한국건설생활환경시험연구원, 공학박사

- 건물에서의 화재위험 통제에 의한 화재발생의 감소 및 방지
- 건물 재실자의 피난을 위한 안전한 탈출 경로의 제공
- 화재구획으로부터 건물의 다른 부분과 주변 건물로의 화재확산 방지
- 필요하다면, 재실자를 탈출시키고 소방관이 남아있는 재실자를 구조하기에 충분한 시간동안 건물이 구조적으로 안정한 상태로 남아있는 것을 보장

2.2 화재 위험 분석

공장, 창고 혹은 상업용 건물에서 사용되는 대공간 건축물은 오늘날 보통 강구조물 형태로 구성된다. 창고로 사용되는 건물에 있어서 적재물 배치와 적재된 재료의 연소성은 화재가 빨리 발달할 수 있게 하고 건물의 구조적인 붕괴 이전에 충분히 오랫동안 재실자를 위협에 빠트릴 수 있다. 결과적으로 건축물은 재실자보다 더 오랫동안 견뎌야 하며 구조물의 붕괴는 화재구역으로부터 사람들이 피난하는데 추가적인 위협이 되지 않아야 한다.

소방활동에 있어서 소방관은 빠른 화재성장으로 인해 건물 내부로 진입하지 않고 보통 외부에서 진압활동을 수행하게 된다. 그로부터 건물붕괴에 대한 소방관의 위협요소는 0으로 된다. 그러나 구조물의 전체적인 안정성과 내화벽의 안정성은 어떤 연쇄붕괴를 피하기 위해서 정확하게 고려될 필요가 있다. 단층건물은 구조물의 가열된 부분이 국부파괴가 인접한 화재 영향을 받지 않은 부분의 파괴를 이끌 때 연쇄붕괴를 겪게 된다.

3. 현행 화재기준의 주요 요구사항

3.1 구조 부재의 내화

내화는 건물 부재가 그 기능의 손실 없이 화재 노출에 견딜 수 있는 시간으로 표현된다. 보통 건물 부재는 세 가지 성능기준을 사용해서 구분된다.

- 하중지지력(load bearing capacity) : 구조적인 안정성의 손실 없이 화재에 저항하기 위한 하중지지 부재의 능력
- 차염성(integrity) : 한쪽 면이 화재에 노출될 때 화염과 뜨거운 가스의 관통을 방지하는 구획부재의 능력
- 차열성(insulation) : 한쪽 면이 화재에 노출될 때 화재에 노출되지 않은 면의 온도(일반적으로 평균 140℃)를 제한하기 위한 구획부재의 능력

사양적인 화재기준에서 건물부재에 필요한 내화성은 건물 부재가 표준화재를 받는 동안 기능을 만족할 수 있는 최소한의 시간으로 표현된다.

3.2 구획화와 건물 분리

건물의 바닥면적이 허용 가능한 최대 구획 크기를 초과할 때, 단층 건물은 내화벽(fire wall)에 의해 분리된 구획으로 구분되어야 한다. 구획화(compartmentation)는 화재발생 초기에 연소가 가능한 가연물을 제한함으로써 건물 내에서의 빠른 화재확산을 방지한다. 재산 손실의 측면에서 구획화의 효과는 화재 성장의 기회를 크게 줄임으로써 직접적인 피해는 화재가 시작되는 곳의 구획에서의 내용물로 한정한다는 것이다.

주변 건축물로의 화재확산 또한 방지되어야 할 필요가 있다. 이것은 전통적으로 충분한 분리 거리 혹은 적절한 내화성을 가진 외관 요소(facade element)를 통해 얻을 수 있다.

3.3 화재진압

스프링클러는 국가 화재 기준에 의해 필요할 수도 있다. 화재성장의 감소에 대한 스프링클러의 분명한 효과와 더불어 스프링클러의 사용은 구조물에 요구 내화성능을 감소시킬 수도 있다. 이것은 또한 더 큰 화재구획 크기에도 사용 가능하다.

<Table 1> Field of application of different design methods

접근법	도구	열하중	열 모델링	구조 모델링	
사양적인 접근법 (표준화재설계)	화재시험으로부터 미리 제작된 데이터 (제조사로부터의 데이터) EN 1994-1-2로부터의 표를 이용한 데이터	표준 ISO 곡선 EN 1991-1-2	X		
	유로코드에 주어진 간략화된 계산 모델		EN 1994-1-2, § 4.2	강제 EN 1993-1-2 § 4.2.5	강제 EN 1993-1-2 § 4.2.3 § 4.2.4
	고급 계산 모델		합성 EN 1994-1-2 § 4.3	강제와 합성	
			FEA* or FDA*	FEA*	
성능기반 접근법 (자연화재설계)	간략화된 계산 모델	완전한 화염에 휩싸인 화재 (파라메트릭 화재, 표준 ISO 곡선***) 국부화재	강제 EN 1993-1-2 § 4.2.5	강제 EN 1993-1-2 § 4.2.3 § 4.2.4 완전한 화염에 휩싸인 화재에 기초한 특정 기준 § 5.4	
			고급 계산 모델	존 모델 필드 모델	강제와 합성

*FEA : 유한요소해석 **FDA : 유한차분해석

*** 단층 건물의 붕괴는 보통 건물구조(전체 구조물의 일부분이나 전체 구조물)가 화재 시에 완전하게 화염에 휩싸일 때 일어난다. 그러한 화재 상황에서 가스 온도의 상승은 건물구조의 파괴모드에 심각한 영향을 끼치지 않기 때문에, 표준화재곡선에 기초한 열하중을 나타내는 성능기반 접근법은 단층 건물의 화재 거동을 조사하기에 적절하다. 이 접근법은 비연속 붕괴와 건물구조의 내부로의 파괴를 설명하기 위해 사용될 수 있다.

3.4 연기제어 시스템

국가화재기준은 연기제어 시스템이 연기흡입과 연기로 인한 피해 위험을 최소화함으로써 피난을 용이하게 하고 어느 정도 소방관이 화재를 더 잘 볼 수 있게 해서 화재를 좀 더 빠르고 효율적으로 진압할 수 있도록 하기 위해서 공공건물, 창고건물과 산업용 건물에 적용된다. 연기제어 시스템은 화재구역으로부터 연기를 제거하고, 건물로부터 사람들이 좀 더 안전하게 피난할 수 있는 시간을 제공하면서 구획에 대해서 연기의 움직임이 둔해지는 시간이 증가하는 지붕 아래 뜨거운 가스의 확산을 제한하는데 도움을 준다. 이것은 (기계적이거나 자연적인) 연기배출시스템과 (특정 구역에서 연기를 포함하는) 스크린의 조합으로 얻어질 수 있다.

3.5 화재감지와 화재경보기

어떤 화재의 발생을 감지하고 화재 발생에 대해서 건물 재실자와 소방서에 알리기 위해서 적절한 조치들이 필요하다. 모든 출구가 보이는 작은 단층 건물에서 화재는 재실자에 의해 빠르게 감지되고 '불이야'와 같은 외침으로 충분할 수 있다. 더 큰 단층 건물에서 배터리가 충전된 경보기나 로터리 벨과 같은 단순한 음향기로 충분하다. 산업용 건물에서 주변소음은 경보기가 재실자에 의해 들릴 수 있도록 보장하는 것이 고려되어야 한다.

3.6 피난시설

안전한 피난을 위해서 적절한 비상출구의 수와 폭과 통로의 적절한 길이, 폭과 높이와 피난 접근성

과 같은 적절한 피난 방법이 요구된다. 일반적으로 작은 단층 건물에서 피난경로는 건물 밖의 안전한 위치로 직접 이끈다. 그러한 피난방법은 보통 어떤 특별한 조치를 필요로 하지 않는다. 탈출거리가 길고 단일 피난경로를 사용할 수 없는 화재가 발생될 수 있는 더 큰 건물에서는 대체 피난방법이 필요할 수 있다. 또한, 장애인에 대한 고려도 있어야 한다.

4. 적절한 화재공학 해법에 대한 지침

4.1 다양한 설계방법에 대한 적용 분야

〈Table 1〉은 표준화재에 기초한 사양적인 요구사항에 따른 설계 혹은 성능기반 내화설계를 고려할 수 있는 가능한 내화설계방법의 적용 분야를 나타낸다.

4.2 최적설계 접근법의 선택

설계 접근법의 선택은 건물의 종류(창고 건물, 산업용 건물, 상업용 건물 등), 국가화재기준에 명시된 요구사항과 사양적인 기준에 대한 대안으로서 성능기반접근법을 적용하는 것을 규제기관이 허용하는지 안하는지에 따라 달라진다.

내화설계 접근법의 선택에 대한 몇 가지 제안사항은 다음과 같다.

요구사항의 다양성과 함께 가장 중요한 첫 번째 단계는 다음사항에 답하는 것이다:

- 내화등급이 있다면, 필요한 내화등급은 무엇인가?
- 성능기반 접근법을 수행하는 것이 가능한가?

(표준화재설계와 관련하여) 사양적인 접근법이 사용될 때

- 구조부재에 대해서 낮은 내화등급(15분 혹은 30분)이 요구되는 곳에 간략화된 계산모델(simplified calculation models)을 사용하는 것은 적절할 수 있다.

- 고급계산모델(advanced calculation models)은 구조부재가 단순계산모델에 의해 다루어질 수 없는 곳에 사용되어야 한다. 또한 고급계산모델은 철골부재에 대한 내화피복의 두께를 줄이는 높은 내화등급(60분 이상)이 요구되는 곳에 강구조물의 몇 가지 경제적인 이득과 함께 제공될 수 있다.

성능기반 접근법이 규제기관에 의해 허용되고 구조적인 안정성이 요구되는 곳에서

- 성능기반 접근법은 구조물이 특별하고 전통적인 사양적인 방법에 의해 잘 다루어질 수 없는 곳에 가장 경제적인 이득을 줄 수 있다.
- 국부적인 내화피복은 건물 재실자와 소방관에 대한 적절한 생명안전을 확보하기 위해서 실제 화재에서 전체 구조물의 전체 거동을 고려해서 요구될 수 있다.

국가화재기준은 심각한 화재 위험(높은 화재하중)을 가진 단층 건물에 대해 성능기반 접근법의 사용을 필요로 할 수 있다.

능동적인 화재방호 조치(스프링클러의 설치, 화재감지기, 화재경보기, 배연시스템)과 수동적인 화재방호 조치(구획화, 피난 시설 등)는 보통 국가화재기준의 요구사항에 따라 건물에 적용된다.

5. 단층 건물의 구체적인 설계규칙

많은 유럽 국가의 국가화재기준은 최근에 높은 화재위험(높은 화재하중)을 가진 단층 창고나 산업용 건물에 대해서 표준적인 사양 요구사항에 대한 대안으로서 구조거동에 관한 구체적인 안전 요구사항들을 도입하는 것으로 변화하고 있다. 창고와 산업용 건물의 구조 거동과 관련한 다음의 기준(하중 지지 구조, 외관요소, 지붕과 내화벽)은 건물 재실자와 소방관에게 적절한 생명안전을 보장하기 위해 만족되어야 한다.

- 건물 구획의 한 부분에서 화재가 일어나는 경우에 (외관요소를 포함하는) 건물의 구조물은 건물 바깥을 향해 붕괴하지 않아야 한다.
- 건물 구획의 한 부분에서 화재가 일어나는 경우에 화재가 발생한 구획의 국부파괴는 주변 구획의 붕괴를 이끌지 않아야 한다.

강구조 창고 건물과 산업용 건물의 설계를 돕기 위해서 몇 가지 단순 설계방법은 사용될 수 있다. 이러한 설계법은 설계자가 화재 상황에서 이러한 강구조 건물의 거동이 위의 기준을 만족한다는 것을 쉽게 증명하는 것을 가능하게 한다.

- 구조물의 가열된 부분의 붕괴에 의해 유발된 힘을 평가하는 것을 가능하게 한다. 이러한 힘들은 화재 동안 상온으로 남아있는 골조 일부분의 안정성 검토에 대해 부가적인 수평 하중으로 사용되어야 한다.
- 화재에 의해 영향을 받은 구획의 단부에서 발달된 최대 수평 변위를 제공하는 것을 가능하게 한다. 이러한 변형은 화재 상황에서 구조물의 이동이 내화벽이나 건물 외관의 안정성에 반대로 영향을 미치지 않는 것을 보장하기 위해 사용된다. 이 검증에 사용된 설계방법은 (경량 콘크리트, 철근 콘크리트, 중공 블록, 단열재를 포함한 강판, 석보보드, 벽돌 등과 같은) 벽의 종류와 강골조의 접합부에 따라 달라진다.

6. 유로코드를 이용한 실무 내화설계

6.1 화재해석

화재 모델링의 주요 목적은 (다음 단계인 구조부재의 온도를 결정하기 위하여) 구조부재에 대한 화재 발달의 시뮬레이션과 열하중(가스 온도, 열속)의 예측이다.

비록 일반적인 실무는 표준화재곡선에 의한 화재로 나타내지만, 구조내화설계는 화재 구획에 좀 더

현실적인 조건을 제공하는 설계화재에 기초할 수 있다. 이 방법에서 화재 심각도(fire severity)에 중요한 역할을 하는 화재하중의 강도, 열방출률과 개구부 계수와 같은 변수들은 고려된다. 더불어, 관련 있는 실제적인 설계화재 시나리오의 인식은 내화설계의 중요한 요소이다. 건물화재의 해석에 사용되는 설계화재 시나리오는 모든 가능한 화재시나리오로부터 추론되어야 한다. 대부분의 건물에서 가능한 화재 시나리오의 수는 무한하며 적절하게 선택될 필요가 있다. 단지 '신뢰할만한 최악의 경우' 시나리오는 연구될 필요가 있다. 설계화재 시나리오가 선택될 때, 수많은 화재 모델은 화재 심각도를 평가하고 그에 상응하는 열하중을 계산하는 것이 가능하다.

서로 다른 수준의 화재모델은 화재발달의 여러 가지 단계와 관련이 있다. 화재가 시작될 때, 화재 구획 내에서 국부적으로 작용하고 화재하중의 구획 특성에 따라 국부적으로 작용하거나 전체 구획으로 일반화 된다. 작은 구획이거나 구획의 크기와 관련해서 작은 개구부를 가진 구획의 경우에, 완전하게 휩싸인 화재가 발달한다.

세 가지 수준의 모델링은 <Table 2>에서 보여지는 것과 같이 국부적이고 완전하게 일반화된 화재들 다를 묘사하는 것은 가능하다.

<Table 2> Levels of fire models

모델의 수준	국부 화재	일반화된 화재
간략 모델	Hasemi model Heskestad model	파라메트릭 화재
존 모델	2 zone model	1-zone model
필드 모델	CFD	CFD

간략화된 모델은 일반적으로 전통적인 가정에 기초한 실험 모델이다. 존 모델은 화재를 제어하는 주요 변수를 고려하지만 적용 영역을 제한하는 간략화된 가정을 소개한다. 그러한 모델들은 단순히 쉽게 정의된 구획 구조에 사용될 수 있다. 필드 모델

은 좀 더 정확하지만 일반적인 설계도로 사용하기에는 다소 복잡하고, 복잡한 구조이거나 높고 비정형 천장을 가진 구획에서 사용될 수 있다.

6.2 열전달 해석

일단 열하중이 계산되면, 구조부재에 대한 열전달은 계산되어야 한다. 사용될 열모델은 인정된 원칙과 열전달 이론의 가정에 기초해야 한다.

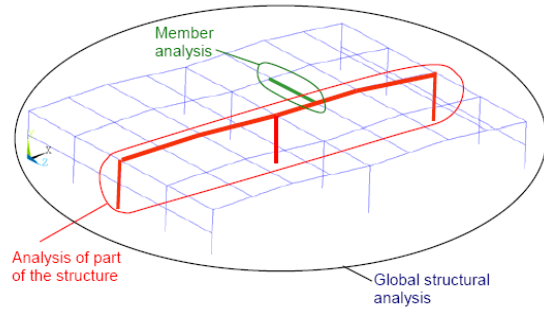
서로 다른 모델링은 가정과 필요에 따라 사용될 수 있다. 열모델에서 주로 철골부재에 대해서 단면에 걸쳐서 균일한 온도의 평가를 얻을 수 있는 해석적인 기준이 있다. 또한, (단면과 길이 방향을 통해) 구조부재에 이차원 혹은 삼차원 온도분포의 결정을 가능하게 하는 유한요소법 혹은 유한차분법에 기초한 고급계산방법이 있다. 고급모델은 내화설계에서 어떤 종류의 구조부재 해석에 대해서 적용할 수 있다.

6.3 구조 해석

구조부재에 대해서 이전에 얻어진 온도분포와 화재의 경우에 역학적인 작용 하중의 조합으로부터 구조 거동은 다음 세 가지 가능한 접근법 중의 한가지로 평가될 수 있다(Fig. 1).

- 부재해석: 구조물 각각의 부재는 다른 부재들로부터 완전하게 분리하여 평가된다. 다른 부재와 함께 접합부 조건은 적절한 경계조건에 의해 대체된다.
- 부분구조물의 해석: 부분구조물은 구조물의 다른 부분과 함께 연결을 반영해서 적절한 경계조건을 사용해서 평가를 직접적으로 고려한다.
- 전체구조물 해석: 전체구조물이 평가에 사용된다.

부재해석은 특히 간략화된 계산 방법과 함께 사용하는 것이 용이해서 대부분 표준화조건 하에서 사용된다. 전체구조물 혹은 부분구조물의 해석은



〈Fig. 1〉 Different design approaches for mechanical response of structures in fire

최소 몇 가지 구조부재와 함께 고려해서 구조부재들 사이의 상호작용 효과는 직접적으로 다루어 질 것이다. 이 방법에서 가열된 부분(화재구획 내부의 약해진 부분)으로부터 차가운 부분(화재구획 밖의 더 강한 부분)으로의 하중 재분배는 정확한 방법으로 고려될 수 있어서 전체해석은 화재조건 하에서 구조물의 전체 거동의 더 나은 이해를 제공한다.

유로코드에 따르면, 세 가지 종류의 설계방법은 위에서 설명된 서로 다른 설계 접근법에서 화재 상황 하에서 구조물의 역학적인 거동을 평가하기 위해 사용될 수 있다. 내화설계는 아래의 방법에 의해서 수행될 수 있다.

- EN 1994-1-2에 주어진 미리 정의된 표를 이용한 데이터에 기초한 간단 계산법: 이 방법은 단지 강재와 콘크리트 합성 구조물에 적용한다. 유로코드에 명시된 표는 명목상의 화재곡선에 따른 가열과 정의된 하중 수준에 대해서 어떤 내화시간 동안에 슬래브, 보와 기둥과 같은 구조물의 기본 형태에 대해서 수치해석 모델과 실험에 의해 평가되었다. 그 표는 사용하기 쉽고 안전하지만 단지 제한된 범위의 단면형태를 포함한다.
- 단순계산모델: 이 형태의 설계방법은 두 가지 서로 다른 과(family)로 나뉠 수 있다. 첫 번째는 강재 구조부재 해석에 폭넓게 적용되는 임

계 온도법(critical temperature method)이다. 두 번째는 강재와 합성 구조부재 해석 둘 다에 대해 개발된 단순 역학모델(강도 영역에서 검증)의 사용이다. 모델들은 표준구조부재(슬래브, 보와 기둥)에 대해 개발되었다.

- 고급계산모델: 이러한 종류의 설계법은 모든 종류의 구조물에 적용될 수 있고 일반적으로 유한 요소법이나 유한차분법에 기초한다. 그것들은 현실적인 구조물 해석을 제공해야 한다. 일반적으로 그 해석의 결과는 전체 화재 기간 동안에 구조물의 변형에 관해서 얻어진다.

7. 맺음말

1990년대 중반부터 유럽을 중심으로 활발하게 연구되기 시작한 구조내화설계법은 실험 및 해석적 연구와 실무에 적용될 수 있는 다양한 기준 및 매뉴얼을 개발함으로써 구조기술자에 의해 다양하게 활용되고 있다. 국내에도 엔지니어링 기술의 발달과 함께 화재로 인한 건물의 거동을 어느 정도 예측함으로써 인적 물적 피해를 줄이고 건설비용의 감소에 효과적인 성능에 기반한 구조내화설계법에 대한 관심도 증가할 것으로 보인다.

하지만, 건축 구조물에 영향을 줄 수 있는 화재 시나리오 및 화재하중에 대한 이해능력이 요구되고 법적인 토대를 마련하기 위한 노력이 필요한 상황이다. 이에 본 기사에서는 단층 강구조 건물로 한정하여 구조내화설계에 필요한 기본 개념과 절차에 대해 기술하였으며, 이를 통하여 구조내화설계에 대한 이해의 폭을 넓히고자 하였다.

References

1. 국가법령정보센터(<http://www.law.go.kr>)
2. Buchanan, A. H., Structural Design for Fire Safety, Wiley, Chichester, UK, 2001.
3. Buchanan, A. H., "The Challenges of Predicting Structural Performance in Fires", Ninth

International Symposium for Fire Safety Science, vol. 9, Karlsruhe, 2008.

4. ENV 1993-1-2, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General rules: Structural Design for Fire, Brussels: CEN; 2005.
5. ENV 1994-1-2, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2: General rules: Structural Design for Fire, Brussels: CEN; 2005.
6. Design Manuals, Steel Building in Europe (Part 7: Fire Engineering). <http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/4-Library/4-SBE/EN/SSB07_Fire_Engineering.pdf>