



04

철근콘크리트 부재의 내화성능 평가를 위한 기술기준

Criteria for Fire Resistant Performance Evaluation of Reinforced Concrete Members

여인환 In-Hwan Yeo
한국건설기술연구원 연구위원

1. 머리말

건축물에서의 화재안전 확보를 위해서는 초기 발화와 조기소화, 연소 확대 억제, 연기확산 및 피난대책, 방화구획, 내화구조, 인접공간으로의 화재확산 방지 등 화재 전 단계에 걸친 종합적인 검토와 대응을 필요로 한다. 국내의 화재안전규정이 건축법과 소방법으로 양분되어 있어 유기적으로 작동되지 못한다는 오랜 지적은 이제 성능중심 화재안전설계의 대두와 함께 더욱 그 문제 해결의 필요성이 부각되고 있고, 실제 관련 부처간 논의가 이루어진 바도 있다. 본 고에서는 화재 생애 중 플래시 오버(Flash over) 이후와 연관한 철근콘크리트 부재의 내화설계방법과 설계 검증을 위한 성능평가기준 설정 필요성 및 관련 연구동향을 살펴보고자 한다.

내화구조는 기둥, 보, 벽, 바닥, 지붕 등 주요 구조부재와 방화구획부재에 요구되는 안전성능을 만족하는 것으로 특정 화재조건에 대한 부재 자체의 열용량 확보 및 화재확산에 저항할 수 있는 요건을 확보하여야 한다. 건축물의 내화설계법은 보통 사양적 방법과 성능적 방법으로 크게 구분되는데, 선진적 제도운영을 갖추고 있는 국가들에서는 사양적 설계를 기본으로 하면서 건축설계의 유연화와 새로운 재료 및 공법의 수용, 경제성 등을 감안하여 성능적 설계를 적용하거나 보완하는 방식이 일반적이다(그림 1).

국내의 내화구조는 사양구조(법정구조)와 인정구조로 구분된다. 사양구조의 내용은 건축법령에서 직접 명시하고 있으며, 인정구조는 관련 규정에 따라 개별적 내화성능평가에 의해 성능을 검증한 것, 내화구조 표준으로 인정된 것 또는 인정된 성능설계절차에 의해 검증된 것으로 구분된다. 즉, 지금까지 국내에서는 사양구조와 대별되는 개념으로써 인정구조를 성능적 설계로 보는 시각이 일반적이다.

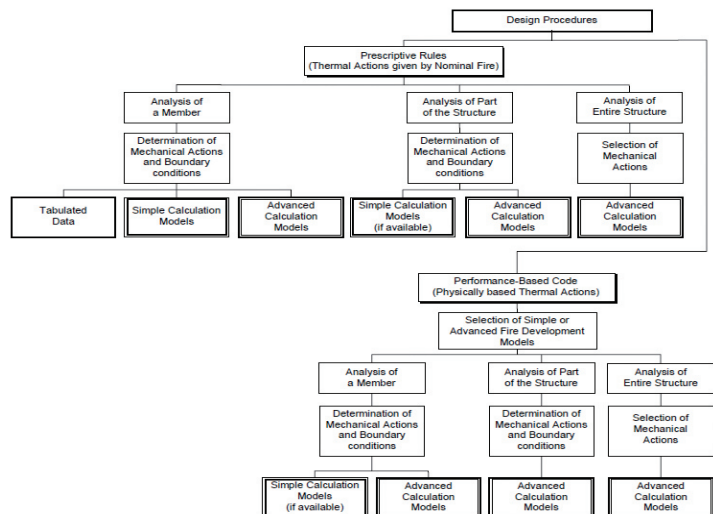


그림 1. 내화설계절차(Eurecode)¹⁾

반면 유럽 및 북미의 경우는 정부 주도의 인정제도 없이 관련 코드에 의한 설계와 전문가, 허가권자의 검토 및 승인에 의하는데 사양적 방법과 성능적 방법의 구분은 화재조건에 가정의 의해 좌우된다. 사양적 방법은 표준화조건에서 다수의 실험결과를 통해 구축된 자료를 활용하거나 비교적 간단한 계산에 의해 부재단위의 내화성능을 판단할 수 있는 방법이며, 성능적 방법은 실제 화재시나리오와 화재모델조건 설정에 이어 구획 공간 조건 및 부재 온도이력으로부터 계산되는 부재 및 구조 시스템의 거동을 보다 복잡한 계산과정에 의해 해석하는 방법이다.

2. 콘크리트부재 내화설계 모델

철근콘크리트구조는 대표적인 전통 구조형식으로써 화재문제에 매우 유리하다고 인식되어 왔다. 하지만 고온에 노출된 콘크리트는 시멘트 경화물과 골재가 각각 다른 팽창·수축을 하고, 콘크리트 내 자유수의 수분팽창으로 내부응력이 점차 증가하여 결국 강도 및 탄성계수 등의 역학적 성질이 저하된다. 콘크리트의 역학적 성능저하는 사용재료의 종류와 배합, 재령 등에 의해 지배되는데, 일반적으로 300°C이후에 강도저하가 일어나며, 500°C를 넘게 되면 50% 이하로 강도가 떨어지게 된다. 화재시의 고열은 콘크리트 표면의 균열과 박리·박락, 폭렬, 철근 노출, 부재의 변형과 파괴를 야기할 수 있으므로 이를 고려한 설계가 필요하다²⁾.

Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules - Structural fire design는 콘크리트구조의 내화설계규정으로써 이 코드에서는 콘크리트 부재의 화재안전설계를 위한 건축적 해결방법을 규정하고 있다¹⁾. 건축 부재의 내화설계를 위해서는 대상 부재에 가해지는 열적 환경조건, 즉 건축물 공간정보, 화재 특성 및 시나리오, 재료의 열물성, 부재크기, 목표시간 등의 설정이 필요하다. 부재 내부의 온도변화와 이로부터 야기되는 열적, 역학적 특성변화의 규명은 내화설계의 핵심이다(그림 2).

성능적 설계법은 건축물의 공간조건, 가연물, 환기 조건, 발화원인 등 여러 조건의 가변성을 반영하므로 특정한 건축물에 대한 세밀한 해석이 가능한 반면, 계산과정이 복잡하고 허용된 범위 내에서 대안적 절차를

채택할 수 있는 여지가 존재하기 때문에 유로코드 등에서는 일반화된 조건의 내화성능 판단 방법으로 표준 화재조건을 가정한 간편계산법을 제시하고 있다. 간편계산법은 콘크리트, 강재 등 주요재료의 고온열 특성 자료를 활용해 고온에 노출된 단위부재의 열응력 저감 해석을 가능케 한다²⁾.

Eurocode 2의 간편계산법은 500°C 등온선법(Isotherm Method)과 존모델법(Zone Method)으로 구분되며, 이 방법들은 화재에 노출된 콘크리트와 철근의 내부 온도변화와 이로 인한 강도 감소 데이터들을 활용한다. 500°C 등온선법에서는 콘크리트 온도가 500°C 이하인 경우 상온시의 강도를 그대로 유지하고, 500°C를 넘으면 강도를 100% 상실하는 것으로 가정하여 콘크리트의 유효단면을 산정한다. 여기에 콘크리트 내부 온도정보와 동일한 기준으로 계수 조정된 철근의 강도로부터 화재피해를 입은 철근콘크리트 부재의 잔존강도를 구한다. 존모델법은 화재노출면에 평행하도록 3개 이상으로 나누어진 동일두께의 콘크리트 단면 중심이 단면 내 평균 온도를 갖는 것으로 가정하여 부재의 잔존 강도를 구하는 방법이다. 이 방법은 작은 단면이거나 세장한 기둥에 적합한 방법이나 표준화조건만 적용이 가능하다. 간편계산법에서 사용하는 부재의 전열특성은 일반 콘크리트와 고강도 콘크리트의 차이를 두지 않고 있으나 고강도 콘크리트의 경우 콘크리트 강도에 따라 별도의 강도감소계수를 부여하여 별도로 평가하는 방식을 제안하고 있다¹⁾.

3. 내화성능평가기준 설정

내화설계 결과의 적합성을 평가하기 위해서는 해석적 방법과 시험적 방법 모두 사용될 수 있는데, 단위 부재



그림 2. Eurocode 2 500°C 등온선법의 가정조건

의 적합성에 대해서는 국제적으로 표준화된 시간-온도 곡선에 부재를 노출시킨 실험시험으로 부재의 내화성을 판단하는 방법이 가장 보편적으로 활용된다. 국내는 구조부재의 내화성능평가에 있어 강재 온도 평가방식으로 주로 운영되어 왔는데, 철골조와 내화피복 합성구조, 고강도콘크리트의 경우 강재 혹은 철근의 평균온도 538℃(1,000°F), 강재의 최고온도 649℃(1,200°F)를 한계온도로 하여 이를 넘지 않도록 규정되어 있다. 무피복 합성구조, 콘크리트구조, 목구조 등에 대해 재하조건에서 평가하는 경우 부재에 가해지는 하중량 산정기준이 없어 상온설계하중을 부여하는데, 이는 과도한 내화설계로 이어지는 불합리성을 내포하고 있어 개선이 필요한 실정이다. 이에 반해 해외에서는 특정 하중을 부여한 조건에서 강재의 한계온도를 평가기준으로 한다. 일례로 Eurocode 3(Design of Steel Structures Part 1-2, Fire)에서는 일반적인 기둥의 경우 축력비를 0.65로 산정하여 이때의 한계 온도를 538℃로 평가한다³⁾.

구조부재의 내화성능평가에 있어 온도검증만으로 된 평가방식은 화재저항성을 결정하는 형상학적 요인이나 재료, 하중량, 화재특성 등을 반영하지 못한다. 특히 콘크리트부재는 강재와 달리 온도에 따른 재료의 열팽창 정도와 화학적 변화가 비균질적으로 발생하기 때문에 온도검증만으로 구조부재의 전체적인 역학적 특성을 판단하는 것은 합리적이지 않다. 전술한 바와 같이 Eurocode 2에서는 화재시 콘크리트 부재의 온도변화에 따라 구조적 유효단면 감소를 예측하는 간편계산법을 제시하고 있으며, 이는 복잡한 계산과정 없이 비교적 합리적인 내화설계를 가능하게 한다.

구조부재의 내화성능평가는 고온에 노출된 부재의 응력 저하를 반영하여 특정 화재조건에서의 하중부담능력을 측정하는 것이며, 그 결과는 단위부재 및 건물 전체의 내화설계를 위한 중요한 자료로 활용된다. 또 내화설계 결과의 유효성 확인을 위한 최종 검증을 위해서도 필요하다. 계수하중설계에 의한 내화설계에 있어서는 하중비(Load ratio)의 개념이 중요하게 적용되는데, 이는 상온에서의 부재 최대 응력에 대한 화재시 설계하중의 비를 일컫는다. 부재의 내화성능평가에도 이를 고려한 적정하중의 설정은 매우 중요하다.

성능설계는 대상 건축물의 특정 화재조건에 대응하는 최적의 설계 대안을 도출하는 것을 목적으로 한다.

하지만 국내의 경우 성능설계의 세부시행절차와 방법이 본격 시행되지 않고 있으며, 주로 부재단위의 내화성능평가에 한정되어 있다. 부재단위의 성능평가를 위해서도 하중비 개념의 적용은 가능하겠지만, 적용 대상 건축물이 특정되어 있지 않고 범용적인 경우는 부재에 허용될 수 있는 상온 대비 화재시 응력비 개념의 활용이 필요하다. 화재응력비는 부재에 요구되는 구조적 성능요건에 따라 축력비나 모멘트비 등을 그 대상으로 할 수 있다(사진 1).

최근 국내에서는 Eurocode 2의 500℃ 등온선법을 활용하여 철근콘크리트 기둥 및 보의 내화설계 및 성능평가를 위한 적정 하중비를 도출하기 위한 연구가 진행되고 있다^{3,4)}. 여기서는 철근콘크리트 부재의 화재시 표준단면을 설정하고 한계하중능력을 평가하여 표준화재조건에서의 화재응력비를 도출함을 목표로 하고 있으며, 해석적 방법과 실험적 방법을 병행하여 다양한 자료의 축적도 중요하게 다루고 있다. 또한 기둥은 순수 축압 축력을 받는 것으로 가정하여 축력비를 대상으로 다루며, 보의 경우 등분포 하중을 받는 단순보의 최대 모멘트비를 주요 대상으로 한다. 연구결과 철근콘크리트 기둥의 경우 ① 표준단면 이상의 동일조건에서는 재하실험이 비재하 실험보다 유리함을 확인하였고, ② 부재의 최소 단면은 300×300 mm로 하되 부재의 세장 정도에 따라 기둥 높이 3,000 mm의 세장비 17을 기준으로 축력비를 구분하고, ③ 기둥의 세장효과를 고려한 적정 축력비는 세장비 17 이하의 경우, 0.5, 세장비 17 초과인 경우 0.45 수준의 설정이 가능하다는 제안이 있었다³⁾. 보 부재의 경우 현재 몇 가지의 단면을 대상으로 열응력



사진 1. 기둥가열로 시험체 설치

해석 및 표준가열시험이 진행 중에 있다. 구조부재의 내화성능평가를 위한 적정 하중비의 설정을 위해서는 많은 경험 자료의 축적이 필요하며, 이를 통해 보다 객관적인 평가기준 설정과 제도화가 가능할 것으로 사료된다(그림 3, 4).

4. 맺음말

구조부재의 내화구조 설계에 있어 사양적 설계와 성능적 설계는 서로 대립하는 관계가 아니며, 상호 보완적 관계에서 보다 안전한 구조물의 구현에 기여하도록 운영되어야 한다. 따라서 어느 한쪽이 절대적인 해결대안이 될 수 없으며, 합리적이고 유연한 기술기준과 제도운영의 모기가 필요하다고 사료된다. 합리적 평가기준의 설정은 단위 부재와 구조물 전체의 최적 설계기준 마련을 위해 중요하게 활용되므로 성능설계의 실용화에 대한 관심이 어느 때보다도 높은 지금에 있어 중요하게 다루어져야 하는 해결과제라 사료된다. 국내 철근콘크리트 부재의 화재거동특성의 파악과 화재응력비의 설정은 향후 건축구조기준 등의 내화설계방법에 직접 활용될 수

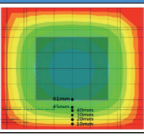
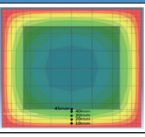
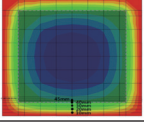
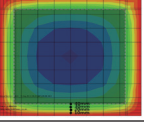
250X250	축력비 (유효단면적비)	깊이 (mm)	온도 (°C)	300X300	축력비 (유효단면적비)	깊이 (mm)	온도 (°C)
	$\frac{25,600}{62,500} = 0.41$	10	930		$\frac{44,100}{90,000} = 0.49$	10	914
		20	782			20	754
		30	667			30	629
		40	578			40	533
		45	541			45	492
350X350	축력비 (유효단면적비)	깊이 (mm)	온도 (°C)	400X400	축력비 (유효단면적비)	깊이 (mm)	온도 (°C)
	$\frac{72,900}{122,500} = 0.59$	10	907		$\frac{102,400}{160,000} = 0.64$	10	903
		20	743			20	735
		30	616			30	604
		40	516			40	502
		45	474			45	460

그림 3. 철근콘크리트 기둥 내부 온도 해석에 따른 유효단면적비 산출

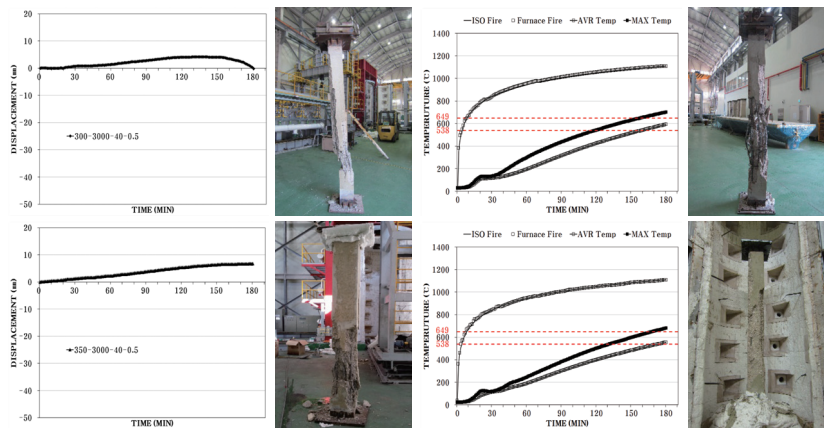


그림 4. 철근콘크리트 기둥 내화시험결과와 예시(350×350단면, 재하/비재하)

있을 것으로 기대된다. 아직 보다 많은 시험과 해석 등을 통한 검증이 필요하며, 향후 벽체 및 슬래브에 대한 연구도 필요할 것으로 사료된다. [4]

담당 편집위원 : 류동우(대진대학교) dwryu@daejin.ac.kr

참고문헌

1. EN 1992-1-2:2004:Design of concrete structures-Part 1-2:General Rules - Structural Fire Design, CEN(European Committee for Standardization).
2. 여인환, 화재피해를 입은 철근콘크리트 기둥의 잔존강도 추정 및 내화성능 요인 분석, 한국방재학회논문집, Vol. 13, No. 6, 2013, 12, pp. 83~89.
3. 황규재, 여인환, 안재홍, 철근콘크리트 기둥의 내화축력비 설정에 관한 연구, 대한건축학회논문집(구조계), Vol. 30, No. 6, 2014. 6, pp. 27~34.
4. In-Hwan Yeo, Bum-Yean Cho, Jae-Hong An, Byung-Youl Min, Fire Resistant Performance Evaluation of Reinforced Concrete Columns Using Axial Load Ratio and Slenderness Ratio, Advanced Materials Research, Vol. 905, 2014, 2, pp. 268~272.



여인환 연구위원은 서울시립대학교 건축공학과에서 표준화재에 노출된 철근콘크리트 기둥의 하중비 설정연구로 박사학위를 취득하였으며, 한국건설기술연구원 화재안전연구센터에 재직 중에 있다. 주요 관심분야는 구조부재의 내화성능설계 및 평가기술, 구조물의 화재피해 진단 및 보수보강기술 등이다. 현재 우리 학회 내화콘크리트 위원회에서 활동하고 있다.

yeo@kict.re.kr