

구조적 측면에서 본 내화성능설계

The Performance Based Fire Resistant Design from
Structural View Point

강지연 Jiyeon Kang
SH공사 도시연구소 책임연구원

김희선 Heesun Kim
이화여자대학교 건축공학과 교수

신영수 Yeongsu Shin
이화여자대학교 건축공학과 교수

1. 머리말

올해 들어 장성 요양병원 화재, 고양 버스터미널 화재 등 건축물에서 발생한 화재사고들을 통해 건설 분야에서 재해방지의 중요성과 필요성이 대두되었다. 특히, 초고층건물은 화재시 인명대피와 탈출에 걸림돌이 많고 외부 소방력에 의한 화재진압이 거의 불가능하기 때문에 건물의 내화성능확보가 중요하다. 또한 초고층 건물은 고강도 콘크리트를 사용하기 때문에 고강도 콘크리트의 폭발현상을 고려한 내화성능확보가 필수적이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 우리나라에서는 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 제3조에서 건물의 용도별 높이, 면적에 따라 적용 부재별로 소요내화시간을 법규로 규정하고, 건축법규에서 내화구조로 정한 구조나 건설교통부 고시에 의하여 인정된 내화구조를 설계하도록 하고 있다. 그러나 건물의 층수, 규모가 커지고 용도가 복잡해짐에 따라 기존 방식의 내화설계를 적용할 경우 건물의 화재하중이나 공간 조건 등을 고려할 수 없어 구조적으로 불안정하거나 비경제적인 내화설계가 될 가능성이 있다.

미국, 영국, 스웨덴, 일본 등의 선진국에서는 화재로 인한 재난을 종합적으로 평가하고, 화재로부터 보다 더 안전한 시스템을 구축하기 위해 다양한 연구를 수행해 왔다. 특히 신기술·신공법이 적용되는 대규모, 특수 건물에 대해서는 화재의 피해를 최소화하고 경제성을 확보하기 위해 성능적 내화설계를 도입하여 적용하고 있다. 성능적 내화설계는 건축물의 형태와 특성을 고려하여 실내 가연물의 종류와 양, 화재실의 규모, 화재하중 등을 산정하고, 이를 근거로 재료의 열적특성, 구조재료의 물리적 성질 등에 적절한 건축물의 내화성능시간을 정하여 실제 설계시 반영하는 설계방법이다. 그러나 국내의 경우 성능설계에 대한 법적 근거만 제시되었을 뿐 현재까지 세부운영지침 및 기술적 기반이 여전히 미흡한 실정이다. 이에 국내외 화재관련 연구현황을 살펴보고, 내화성능설계기준에 대해 다루어 보고자 한다.

2. 부재별 내화성능 시방기준 적용의 한계

국내에서는 구조부재에 대한 가열실험을 통해 건축물의 내화성능을 인정하도록 규정하고 있다. 그러나 가열로에서 수행되는 부재별 실험결과를 바탕으로 건물의 내화성능을 평가하게 되면 부재 크기의 한계, 지지점 조건의 단순화, 실제 화재와 상이한 가열조건 등으로 인해 실제 구조물의 내화성능을 과소평가하는 경향이 있는

것이 사실이다.

내화성능을 평가할 때 사용하는 표준가열곡선 (ISO 834)만 보더라도 시간에 따라 온도가 증가하는 형태이나 실제 화재는 화재발생장소에 있는 가연물이 연소됨에 따라 최대온도에 도달한 이후 온도가 급격히 감소하는 형태를 가진다.

고강도 콘크리트 부재를 표준가열곡선에 따라 가열실험한 경우 초기가열속도가 빠른 시간-온도 곡선을 적용하여 실험했을 때가 약 12~20% 폭렬이 더 발생한 실험결과^{3,4)}를 보더라도 가열조건에 따른 내화성능을 고려할 필요가 있다. 또한 압축강도 50 MPa를 갖는 고강도 콘크리트의 단면크기를 달리하여 제작한 기둥부재의 화재실험에서 단면이 클수록 폭렬이 많이 발생하였으며, 내부온도의 증가도 단면이 큰 실험체에서 더 높게 나타났다. 뿐만 아니라 철근비가 높은 콘크리트 부재일수록 폭렬로 인한 단면 손실율과 내부온도가 높게 나타나고, 같은 철근비를 가지는 철근콘크리트 기둥일지라도 작은 지름을 갖는 주근을 여러 개 배치한 기둥이 큰 지름의 주근을 적게 배치한 기둥보다 내부 온도가 높게 나타나는 것으로 실험결과 밝혀졌다³⁾.

구조물의 지지조건에 의해서도 내화성능의 차이가 발생하는데, <그림 1>에서 볼 수 있듯이 동일한 조건에서 한쪽면을 구속한 벽은 벽의 양 끝단을 편접합했을 경우보다 동일한 처짐에 도달하는 화재시간이 3배 이상 크다는 연구결과가 있었다.

이렇듯 화재성상, 철근비, 철근의 배치, 콘크리트

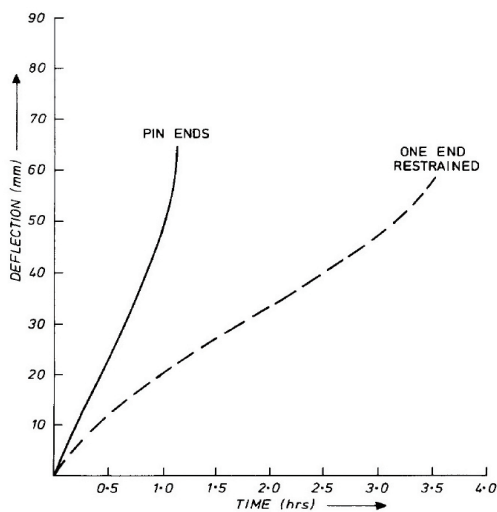


그림 1. 화재시 단부 고정방식에 따른 벽체의 처짐⁶⁾

강도, 부재 단면 크기, 지지점 조건 등 다양한 환경에 따라 내화성능이 달라질 수 있어 경제적이고 안전한 내화설계를 위해서는 실제 화재상황과 구조부재들의 조건을 고려해야함을 알 수 있다.

3. 구조물의 내화성능 설계

3.1 실규모 화재실험과 내화성능설계

성능적 내화설계는 건물의 형태 및 구조가 복잡, 특수하고 신재료·신공법이 적용된 건물에 적합한 설계법으로 설계 작업이 복잡하나 건물의 화재하중이나 공간조건 등을 고려할 수 있어 합리적이고 경제적인 내화설계가 가능하다. 설계방법은 설계화재성상 예측 및 계산을 통해 설계화재 시간(T)을 산정하고 부재의 온도상승의 예측 및 계산을 통하여 붕괴시간(보유내화성능시간)을 산정하여 설계화재 시간이 붕괴시간(보유내화성능시간)보다 작게 되도록 설계하는 방법이다.

성능적 내화설계가 상용화되고 있는 일본의 시미즈(Shimizu) 건설에서 건물의 설계 전에 내화시방코드(Prescriptive Code)와 내화성능코드(Performance Based Code)에 의해 내화성능시간을 <그림 2>와 같이 계산하고 비교한 사례가 있다. 단순히 건축물의 용도 규모와 층수에 따라 부재의 내화성능시간을 설정하는 시방기반코드에 의해 내화성능시간을 계산한 결과 건물 전체에 요구되는 내화성능은 최대 3시간으로 산정되었다. 그러나 내화성능코드를 적용하였을 때에는 건물이 90분 동안 내화성능을 보유하도록 설계하여도 시방기반코드와

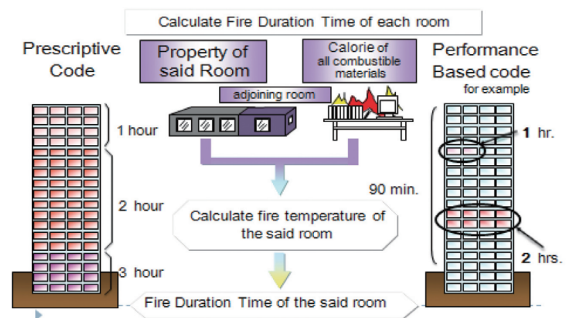


그림 2. 성능기반코드에 의한 내화시간 계산(시미즈 건설)

동일한 내화성능을 가진다는 결과가 도출되었다. 이러한 사례는 실제 건물에 내화성능코드를 적용하여 설계하는 것이 경제적인 수 있다는 것을 보여주는 단적인 사례이다.

이 밖에도 실제 크기의 구조물에 대해 다양한 화재실험을 수행하며, 축적된 데이터를 바탕으로 수치 모델을 개발하여 내화성능설계에 이용하는 사례가 유럽을 중심으로 여러기관에서 발표되고 있다. 다만, 아직까지 실물 화재실험과 실제 건물의 화재실험에 대한 연구는 대부분 철골구조 또는 합성구조의 건물을 그 대상으로 하고 있는데, 이는 철골부재의 내화피복 수치에 따라 전체 건물에서 나타나는 부재의 내화성능을 비교판단하기 용이하기 때문이라고 보여 진다. 철골 구조물을 기반으로 하는 건물을 상대로 수행한 대규모 화재실험의 사례는 1990년대에 수행되었던 영국의 Cardington 실험을 대표적으로 꼽을 수 있다. 이 프로젝트에서는 <그림 3>에

나타낸 바와 같이 철골 보, 기둥과 콘크리트 슬래브 시스템으로 구성된 8층 규모의 합성 구조물을 제작하고 5.48 kN/m²의 바닥하중을 가력하면서 다양한 형태의 화재실험을 수행하여 시간에 따른 구조물의 온도분포와 처짐을 측정하였다. 수행된 실험은 <표 1>과 같다.

이처럼 전체 건물을 대상으로 하는 실규모 화재실험결과에서 단독부재를 대상으로 하는 화재실험결과와 비교하면, 단독부재보다 실규모 건축물의 구조부재가 훨씬 우수한 내화성능을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 실제 건축물에서 구조부재들이 하중의 재분배 과정을 거치는 것과 비교하여 단독부재는 하중이 재분배 되지 않고 가열로에 단순지지 되어 있어 만족스러운 성능을 나타내지 못하기 때문인 것으로 유추된다.

3.2 철근콘크리트 구조물의 내화성능설계

철근 콘크리트 구조물의 성능기반 내화설계와 관련하여 해외에서는 유럽, 뉴질랜드, 호주가 성능기반 내화설계법을 실제로 적용하고 있으며, 일본 역시 내화성능검증법 등을 통해 성능기반 내화설계법을 실행에 옮기고 있다. 국내에서도 철근콘크리트 구조물의 내화 성능 설계를 도입하기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 우리나라 실정에 맞는 성능기반 내화구조 설계기준을 도입하기 위해서는 다양한 연구와 노력이 필요할 것으로 보여 진다.

먼저, 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동 해석에 기초한 내화 성능설계법은 우리나라에 적합한 화재특성과 화재하중, 화재성상, 부재의 온도, 열응

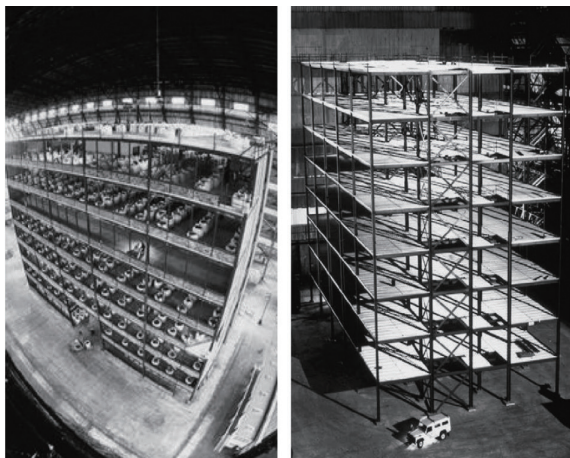



그림 3. Cardington 8층 구조물의 내화실험(1996)

표 1. Cardington 구조물의 6가지 화재실험 개요

구분	실험내용	화재면적 (m ²)	화재 형태	화재하중 (kW/m ²)	강재의 최고온도 (°C)	최고처짐 (mm)	비고
1	보부재 Test	24	가스	-	894	232	중앙 8m 부분은 내화피복하지 않음
2	건물의 세로방향 전체 보-기둥 프레임	53	가스	-	850	280	내부기둥 상부 200mm는 내화피복하지 않음
3	코너 부근의 1bay 기둥	76	목재	45	954	428	외곽보는 내화 피복함
4	코너 부근의 1bay 기둥	54	목재	40	903	269	외곽보는 내화피복하지 않음
5	바닥면적의 40%	340	목재	46	691	557	-
6	사무실 전체 실험	136	사무용품, 목재	46	1,150	641	-

력 해석과 같은 내용들에 근거해야 한다. 이를 위해서는 고온에 노출된 철근과 콘크리트의 단기적 재료 물성치(탄성계수, 응력-변형관계, 강도 등) 그리고 크리프 변형과 같은 장기거동 특성을 예측할 수 있는 수치식과 함께 화재 성상을 산정하기 위해서는 가연물 조건이나 공간 조건 등에 기초하여 화재온도를 산출할 수 있는 적절한 식을 마련하여야 한다. 또한, 화재하중 산정에 있어서 뉴질랜드/호주(AS/NZS 1170 : 2002)나 미국(NFPA 5000 : 2012)에서 제안하는 바와 같이 고정하중과 적재하중 이외에도 화재시 열팽창으로 생기는 구조적 작용에 대한 하중을 고려할 필요가 있다. 고온에 의한 부재의 거동은 열전달을 고려한 열평형 방정식으로부터 예측될 수 있으므로 유한요소법을 이용하여 부재 온도와 거동을 예측하기 위한 재료특성, 구조 해석 방법 등에 대한 규정도 필요하다. 이상에서 우리나라에 적합한 내화성능 설계기준은 먼저 언급한 여러 가지 재료적·구조적 조건과 해석방법을 고려하여 마련되어야 할 것이다.

4. 맺음말

수년간 국내 여러 연구기관과 전문가들이 구조부재에 대해 화재실험을 수행한 결과를 바탕으로 내화성능설계 기준에 대한 필요성을 강조하여 왔다. 미국, 호주/뉴질랜드, 유럽, 일본과 같은 사례를 살펴보다도 실제 규모의 구조물 또는 건물을 대상으로 실험을 수행한 경험을 참고하여 내화성능설계 기준을 확립하고 이를 실무에 적용하고 있어 국내 실정에 맞는 기준의 마련 및 보급이 시급하다고 할 수 있다. 보다 안정적이고 실용적인 내화성능설계 기준을 마련하기 위해서는 국외 사례 및 기준을 참고하되 그 동안 국내에서 발생한 다양한 형태의 화재사고와 수년간 축적된 화재실험 결과를 분석하여 적용가능성을 검토하는 절차가 필요하다. 또한, 실제 규모 구조물 또는 건축물을 대상으로 실험할 수 있는 국내 실험 장비 및 시설이 확충된다면 국내 내화성능설계 기준의 확립과 검증이 보다 잘 이루어질 수 있다. 

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

참고문헌

1. 강성덕, 김명한, 김상대, 고층 건축물의 내화설계, 한국강구조학회지, Vol. 20, No. 1, 2008, pp. 42 ~ 47.
2. 김선희, 민정기, 최성모, 강구조물 내화설계의 현황 및 제언, 한국강구조학회지, Vol. 24, No. 6, 2012, pp. 21 ~ 26.
3. 김희선, 박지은, 문지영, 신영수, 권영진, 철근비와 콘크리트강도에 따른 고강도 콘크리트 기둥의 열적거동 파악, 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol. 22, No. 2, 2010, pp. 257 ~ 258.
4. 박지은, 이민섭, 최은규, 신영수, 권영진, 화재성상 및 단면크기에 따른 고강도 콘크리트 부재의 폭렬 특성, 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol. 21, No. 2, 2009, pp. 33 ~ 34.
5. 최은규, 박지은, 이민섭, 신영수, 권영진, 화재성상 및 단면크기에 따른 고강도 콘크리트 부재의 온도분포, 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol. 21, No. 2, 2009, pp. 9 ~ 10.
6. A. J. O'Meagher, I. D. Bennetts, "Modelling of Concrete Walls in Fire", *Fire Safety Journal*, Vol. 17, Issue 4, 1991, pp. 315 ~ 335.
7. Samantha Foster, Magdalena Chladna, Christina Hsieh, Ian Burgess, Roger Plank, "Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire", *Fire Safety Journal*, Vol. 42, Issue 3, 2007, pp. 183 ~ 199.



강지연 책임연구원은 이화여자대학교 건축공학과에서 박사수료를 하고, 2007년부터 현재까지 SH공사 도시연구소에서 재직하고 있다. 장수명주택, 리모델링 분야 관련 연구와 신기술, 신공법 개발 등 실용화기술에 관심을 갖고 주력하고 있다.
jy kang@-sh.co.kr



김희선 교수는 2009년 미국 Georgia Institute of Technology에서 토목공학으로 Ph.D.를 취득한 후 2010년부터 이화여자대학교 건축공학과에서 조교수로 재직 중이다. 화재시 구조물의 거동변화 분석, 건축물의 재난대응 및 예방, PCM 혼합 콘크리트의 거동특성에 관한 연구 등을 수행하고 있다.
hskim3@ewha.ac.kr



신영수 교수는 서울대학교 건축학과에서 박사학위 취득 후 1995년부터 이화여자대학교 건축공학과 교수로 근무하고 있으며, 우리학회 부회장을 역임한 바 있다. 주요 연구 분야는 콘크리트 구조물의 내화성능, 소규모 건축물의 내진성능 및 보수보강공법이며, 주요 저서로는 「소규모 건축물 구조지침 및 해설」, 「콘크리트 표준시방서 및 해설」 등이 있다.
shinys@ewha.ac.kr