

특집

|| 화재와 콘크리트 ||

콘크리트 구조물의 내화설계

- Design of Fire-Resistance in RC Structure Buildings -



김화중*

1. 머리말

콘크리트가 화재에 노출될 경우 가열에 의한 재료의 노화 및 열팽창에 의한 열응력의 발생에 따라 주요구조부인 기둥 및 보에 큰 손상이 생기게 되어 그 내력은 크게 저하하게 된다. 철근 콘크리트 구조물의 화재 상황을 조사해 보면 <그림 1>과 같이 열응력에 의한 기둥의 전단파괴, 보의 휨파괴 및 부재의 폭열 등이 보여진다.

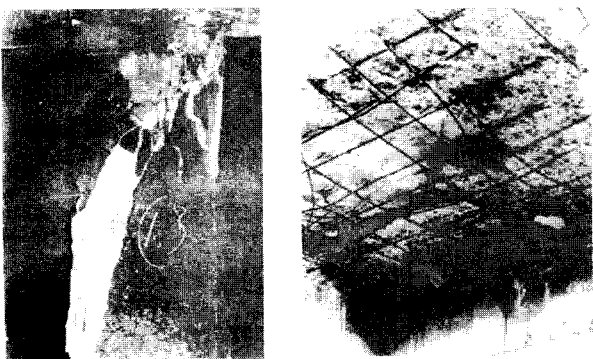


그림 1. 화재에 의한 주요구조부의 피해

살펴보고자 한다.

국내의 경우 내화구조 기준을 건축물의 용도, 규모와 층수에 따라 내화시간을 설정하고 설정된 내화시간에 적합한 부재를 적용할 수 있도록 내화구조 범위 및 실험방법을 제안한 바 있지만, <그림 2>와 같이 단지 법규에서 정한 기술적 기준에 따른 사양적 내화설계법의 적용수준에 머물러 있기 때문에 신기술·신재료에 따른 대형의 특수 건축물에 대한 내화설계가 합리적이고 과학적으로 이루어지지 못하고 있다.

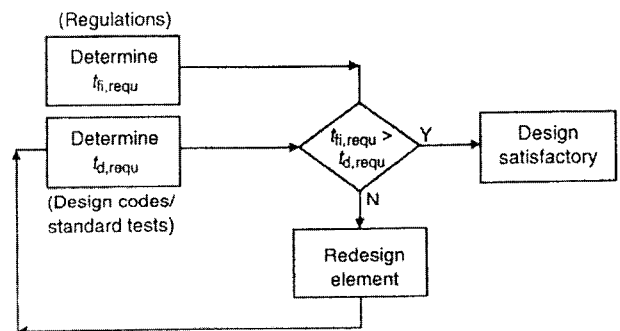


그림 2. 구조 부재의 내화결정의 사양적 접근

최근 미국 뉴욕의 WTC 건물 붕괴 사건을 계기로 철골에 비해 내화성이 우수한 콘크리트 구조물에 있어서 현재 선진 외국에서 수행되고 있는 성능중심의 내화설계법에 관하여 소개하고 고

또한 국내 내화기술 수준을 선진국과 비교한 <표 1>을 살펴보면 국내의 내화관련 예측, 평가, 관리 능력 및 관련 기술적·제도적 기준 정비 등에 있어서 선진 외국의 기술력의 40~50% 정도에 머물고 있어 기술력 격차 심화에 따른 국가적 경쟁력 손실이 예상된다.

* 정회원, 경북대학교 건축공학과 교수

표 1. 국내 내화 기술수준 비교

구분	국내	선진국	비고
실험시설	40%	100%	미국-NIST 영국-BRE 일본-건축연구소
인력	60 ~ 70%		
기술적 기준	40%		
제도적 기준	40%		
기술개발 투자비	30%		

2. 고온시 콘크리트의 재료물성치

일반적으로 콘크리트의 내화성을 확보하기 위한 주된 변수는 부재의 최소 크기의 규정과 철근의 최소 피복이다.

최소 크기는 벽이나 슬래브의 경우에 규정되어 있고, 비노출면에서의 단열한계 140°C를 넘지 않아야 한다.

최소 피복은 철근의 온도를 유지하는 것이다. 보에서 인장근이나 슬래브나 보나 벽에서의 수직압축철근, 일반적으로 500 ~ 550°C 정도로 고려되는 콘크리트에서 요구되는 열적 물성치는 혼합비, 골재의 종류, 콘크리트가 함유하는 수분의 양, 콘크리트의 재령에 따라 복잡한 상황에 있다.

2.1 밀도

콘크리트가 열을 받게 되면 자유수와 결합수의 증발에 의해 자중감소가 생길 것이다. 이 손실은 일반적으로 밀도에서의 부가적 변화를 초래하기에는 충분치 못하여 따라서 대개 초기값으로 사용하고 있다.

2.2 비열

<그림 3>은 다양한 콘크리트의 비열값을 보여준다. 여기서 골재의 타입은 결과값이 부수적인 영향을 나타내고 있다.

ENV 1994-1-2에서 보통중량 콘크리트의 비열에 대한 식을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$c_c = 900 + 80\left(\frac{\theta_c}{120}\right) - 4\left(\frac{\theta_c}{120}\right)^2 \quad (1)$$

여기서, c_c : 콘크리트의 비열(kJ/kg°C)

θ_c : 콘크리트의 온도(°C)

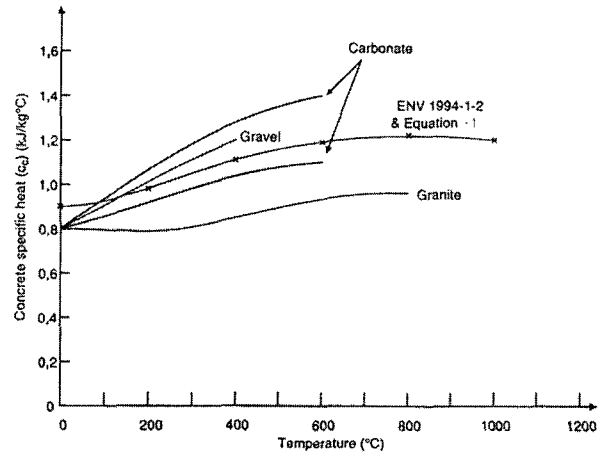


그림 3. 온도에 따른 콘크리트의 비열 변화 (Schneider, 1986a)

식(1)은 또한 <그림 3>에 플로팅되어 있다.

경량 콘크리트의 경우에는 상수값 870 J/kg°C를 유지하고 있다.(ENV 1994-1-2)

2.3 열전도율

<그림 4>는 여러 콘크리트의 열전도율값을 나타낸 것이다 (Schneider, 1986a). 보통중량 골재 콘크리트가 경량 콘크리트에 대한 값을 가진 밴드 아래에 떨어질 것으로 예측된다. ENV 1994-1-2는 규석골재 보통중량 콘크리트의 열전도율값에 대한 방정식을 나타낸다.

허용가능한 값은 1.6W/m°C의 상수이다.

$$\lambda_c = 2.0 - 0.24\left(\frac{\theta_c}{120}\right) + 0.012\left(\frac{\theta_c}{120}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, λ_c : 콘크리트의 열전도율(W/m°C)

콘크리트 Eurocode의 초기안에서 석회질 골재 콘크리트에 대하여 다음의 관계식을 제시하고 있다.

$$\lambda_c = 1.6 - 0.16\left(\frac{\theta_c}{120}\right) + 0.008\left(\frac{\theta_c}{120}\right)^2 \quad (3)$$

표 2. 콘크리트 부재의 내화성에 미치는 부가 피복의 영향

부가피복(Additional Protection)	등가치
Mortar / gypsum board	0.6×CT*
Lightweight plaster	t _{fi, req} < 2hr : 1.0×CT
Sprayed lightweight insulation	t _{fi, req} > 2hr : 2.0×CT
Vermiculite slabs	t _{fi, req} < 2hr : 1.0×CT
	t _{fi, req} > 2hr : 1.5×CT

* 콘크리트 두께(CT)는 주어진 부가 단열재로 대신할 수 있는 콘크리트 피복의 등가두께를 말한다. 예를 들면 모르타르 15 mm는 콘크리트 피복 25 mm의 등가값(15/0.6)을 대처하는 것이다. 이는 부가피복 최대 두께에 따르며 25 mm를 넘을 수 없다.

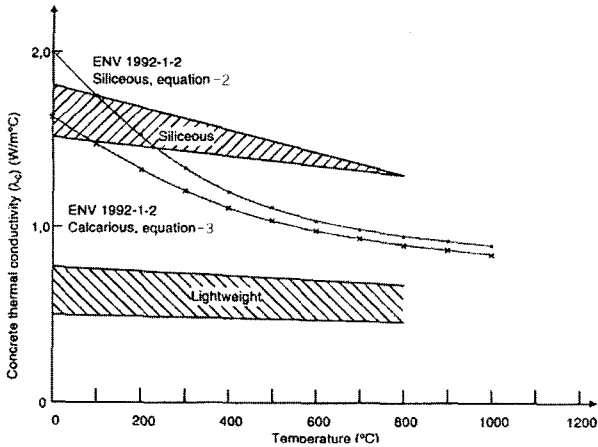


그림 4. 온도에 따른 콘크리트의 열전도율 변화 (Schneider, 1986a)

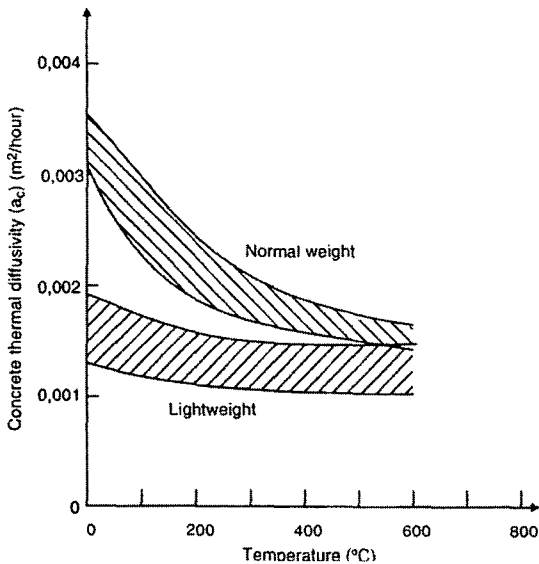


그림 5. 온도에 따른 콘크리트의 열확산율 변화 (1986a, Schneider)

경량 콘크리트에 대해서는 ENV 1994-1-2에서 다음 관계식을 제시한다.

$$20 \leq \theta_c \leq 800^\circ\text{C} : \lambda_c = 1.0 - \left(\frac{\theta_c}{1600}\right)$$

$$\theta_c > 800^\circ\text{C} : \lambda_c = 0.5 \quad (4)$$

2.4 열확산율

〈그림 5〉에서 플로팅된 결과로부터 보통중량 콘크리트와 경량 콘크리트 사이의 뚜렷한 밴드결과를 확인할 수 있다.

〈그림 6〉과 〈그림 7〉은 고온 작용에 의한 콘크리트의 역학적 성질의 변화를 단적으로 나타내기 위하여 보통 및 고강도 콘크리트의 열간에서의 응력-변형도 곡선을 나타내었다.

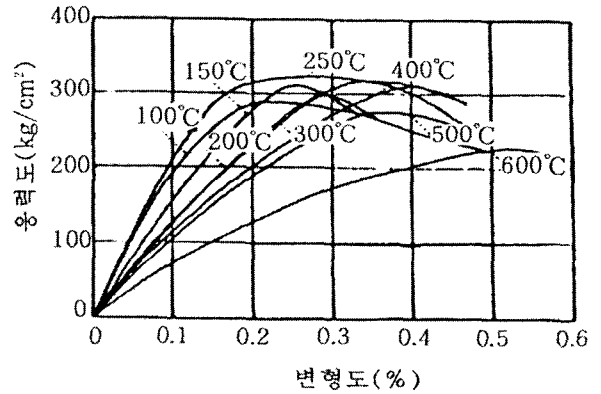


그림 6. 보통강도 콘크리트의 응력도-변형도 관계

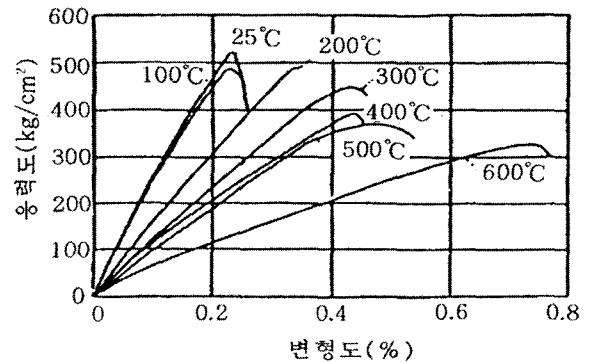


그림 7. 고강도 콘크리트의 응력도-변형도 관계

3. 성능적 내화설계법

3.1 성능적 내화설계법의 개요

성능적 내화설계법은 신재료 및 신공법의 적용에 있어서 가장 합리적이고 객관적인 방법으로 알려져 있지만 기술적 수준이 높고, 내화설계 단계별로 요구되는 평가항목이 많기 때문에 상당히 까다로운 내화설계법이다. 이러한 내화설계법은 일본(신내화설계법)과 스웨덴 강구조 협회에서 적용하고 있다.

성능적 내화기준은 영국, 뉴질랜드, 스웨덴, 호주 등에서 채택하고 있고 미국 및 캐나다에서도 점차 채택하는 실정이다.

성능접근법의 장점으로서의 설계시의 유연성, 리노베이션의 기회증가, 동등 혹은 그 이상의 안전성 확보, 그리고 시공시 비용 절감을 도모할 수 있다.

빌딩 시뮬레이션에서의 화재 시험을 보면 전체 프레임에서의 구조 부재의 거동은 법규를 평가하는 데 사용하는 표준화재시험에서의 단일 부재의 거동과는 뚜렷하게 차이를 보이고 있으므로 내화설계법은 표준화재시험 온도곡선과 같이 가상의 화재 상태를 설정하여 평가하는 방법에서 벗어나 실제로 발생하는 화재성상을 대상으로 하기 때문에 정확한 구조 부재의 내화성능 평가가 가능하다.

〈그림 9〉의 그래프는 표준화재곡선과 창의 면적을 변수로 한

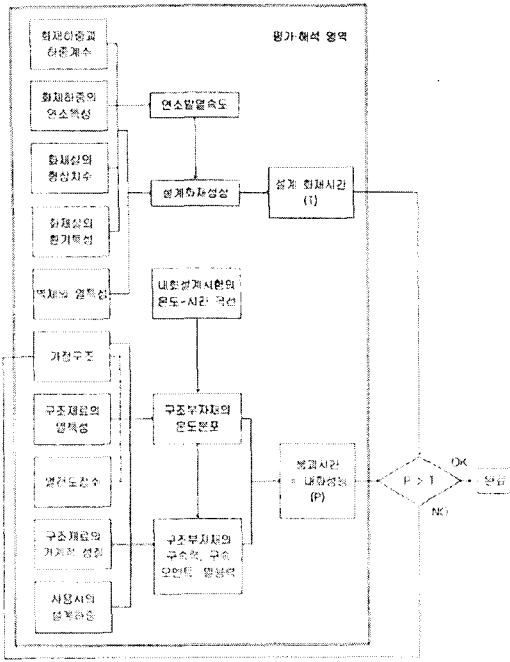


그림 8. 내화설계법

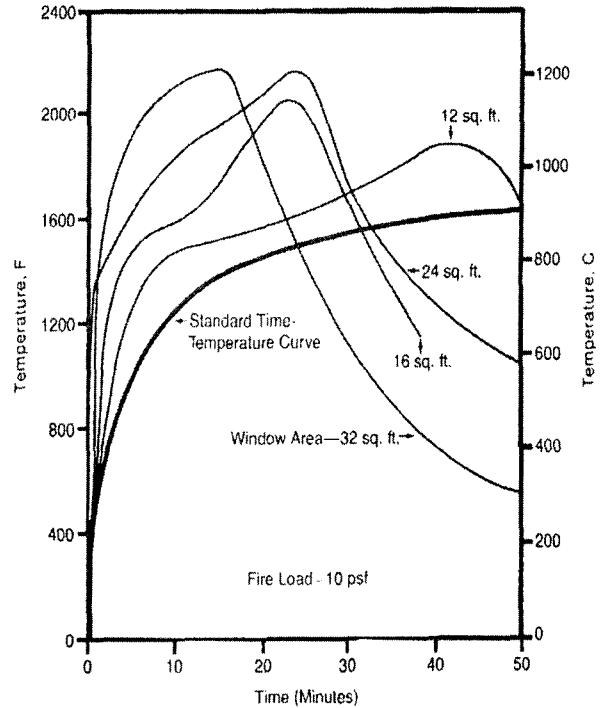


그림 9. 자연환기시 창의 면적이 화재성상에 미치는 영향

실화재 곡선과의 차이를 보이고 있다. 그 차이점은 명백하게 나타난다. 실화재의 지속시간과 화재심도는 표준화재테스트 곡선과는 다르게 나타나는데, 특히, 실화재 성상에서는 쇠퇴기가 보이는 반면, 표준화재곡선은 계속 증가하는 모양이다. 이 그래프는 창문의 크기, 또는 화재구획실의 환기 조건에 대한 함수로서 최대 화재온도값을 나타내고 있다.

그렇지만 표준화재온도곡선에서는 이러한 사항은 고려할 수 없다. 그러므로 내화설계법은 건축물의 내화성능시간 설정을 위하여 다음과 같은 조건들로 구성된 화재성상을 이용하여 내화성능 시간을 결정하게 된다.

- ① 실내의 가연물의 종류 및 양
- ② 실내의 가연물의 형상 및 성상
- ③ 실내의 가연물의 분포상황
- ④ 화재실의 규모 및 형상
- ⑤ 실내에 공급되는 공기량 (개구부의 크기와 형상)
- ⑥ 화재실을 구성하는 구성 부재재의 열적 성질

다음 단계는 이렇게 설정된 내화성능 시간에 맞는 적정 부재의 선택이다.

내화설계법에서는 적정 부재의 선택을 위하여 구조재료의 열특성, 열전도 정수, 구조재료의 기계적 성질, 사용시의 설계하중 등을 평가하여 설정되게 된다.

3.2 내화성능 검증법

내화성능 검증법은 종래에 건물의 주요구조부를 내화구조로 한 것에 더하여 건물 내부의 실용도나 형상 등에 대응하여 화재성상

을 예측하고 그 화재에 대한 부재의 내화성능이 확실한 것을 내화구조부로 적합하다고 성능규정화되어지는 것을 말한다.

내화성능 검증법에 의한 설계작업량은 결코 적지는 않지만 내화 건축물의 주요구조부에 다양한 재료를 사용할 수 있는 등 설계자가 가지게 되는 장점은 매우 크다고 할 수 있다.

내화성능 검증법에 있어서 산정순서의 요점으로는 우선 화재실(단일실 혹은 동시 연소를 상징하는 복수실)을 설정하고 각 실마다 화재계속시간을 산정한다.

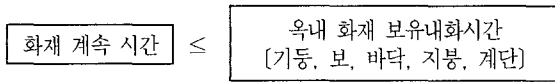
그런 후에 화재실에 면한 주요구조부에 대하여 각각의 주 구조부에 요구되는 내화성능(비손상성·차열성·차염성)이 유지 가능한 한계시간, 즉 보유내화시간을 부재단위에 산정한다.

주요구조부의 보유내화시간이 화재계속시간 이상이 되면 성능이 만족되는 것으로 판단되어 이러한 검증을 건축물을 구성하는 전부의 주요구조부에 대하여 행한다.

4. 콘크리트 구조물의 내화설계

내화설계란 일반적으로 화재시에 있어서 건물의 연소화재방지 및 도피방지를 하는 것으로 피난안전성은 말할 것도 없이 소방수의 소화·구조활동에 있어서의 안전성, 건물의 붕괴를 억제하는 것을 목적으로 이를 달성하기 위해 필요한 화재시의 성능, 즉 어느 일정한 비손상성, 차열성, 차염성을 건축 구조 부재에 구비시키기 위한 설계를 말한다. 구체적으로는 <그림 12>에서와 같이 바닥이나 벽 등의 구획 구성 부재에 의해 화재의 확대를 방지하는 설계(방화구획설계) 및 기둥이나 보 등의 기구 부재에 필요한

• 옥내 화재 (옥내에서 발생이 예측되는 화재)



• 옥외 화재 (건물의 주위에서 발생이 예측되는 화재)

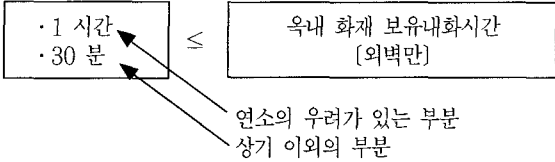


그림 10. 내화성능검증법의 기본 개념

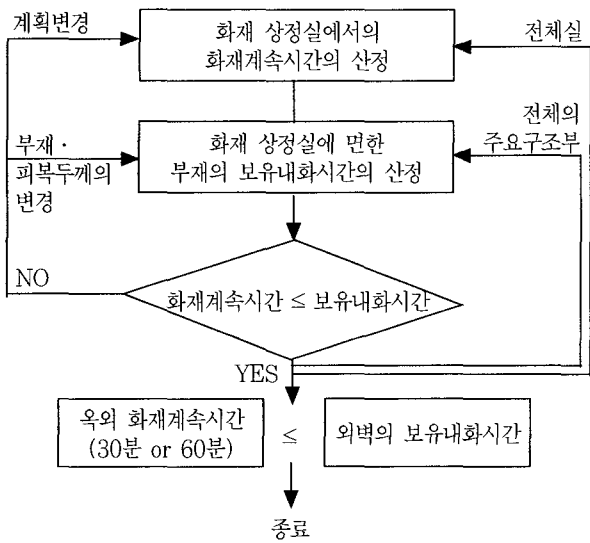


그림 11. 내화성능검증법의 전체플로우

구조내력의 확보(구조내화설계)의 2종류로 크게 나눌 수 있다.

4.1 내화설계에 있어서 상정화재

내화 건축물에 있어서 화재는 구획화재라 부르고, <그림 13> 과 같은 화재진전이 이루어진다.

화재 초기에는 혼연상태가 생기고 어느 정도 온도가 상승하여 신선공기의 유입이 이루어지면 화염이 나오고 연소가 일어나 화

재성장기가 된다.

그 후 연소가 지속되어 그 영역을 확대하여 가면 어느 한도를 넘은 시점에서 가연물이 일제히 연소하여 플래쉬오버에 도달한다.

플래쉬오버 이후를 성기화재라 하고 내화설계를 행함에 있어서는 이 성기화재가 관심의 대상이 된다.

성기화재시의 화재의 강약(화재실온도의 고저 및 화재지속시간의 장단)은 연소에 의한 발생열량, 실(구획)의 형상(크기 등), 개구의 크기의 인과관계에 따라 결정된다.

따라서 내화설계를 행함에 있어서는 각 부재(벽, 바닥, 기둥, 보)의 구조 역학적인 어프로치는 물론이고 화재를 설계(계획·의장적인 관점에서 구획 및 개구부의 설계)하는 것도 가능하고 양자로부터 접근할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 방화구획 내화설계

내화설계라 하면 주로 기둥 및 보 등의 가구 부재의 설계를 이미지화하는 것이 많다고 생각되지만 건물 내에서의 화재를 어느 범위로 한정시키는 것은 재실자의 피난안전, 소방수의 구조·소방활동에 있어 안전성을 확보면에서 매우 중요함과 동시에 가구 부재전체가 동시에 화재(열입력)를 입는 것을 미연에 방지하고자 하는 의미에서 매우 중요하다.

벽, 바닥 등의 구획 부재에 대해서는 가열에 의해 화염이 통과하는 균열을 생기지 않을 것(차열성), 실내면에 대해서는 가열에 의해 이면온도(비화재측 표면의 온도)가 가연물 연소온도(면의 평균온도 160 °C, 최고온도 200 °C)를 넘지 않도록(차열성) 하는 것이 필요하다.

4.3 구조내화설계

가구 부재(구조종별)에 따라 다종다양하지만, 강구조, 철근 콘크리트조, 목조가 일반적이다. 이러한 부재의 화재시의 거동은 각각의 구조종별마다 특유하다. 그러나 어떤 구조 부재이건 온도 상승(또는 연소)에 의한 기계적 성질의 열화를 방지하는 것이 내화성능을 확보하는 최선의 대책이며 철근 콘크리트조에서는 충분한 피복두께를 확보하는 것이 중요하다.

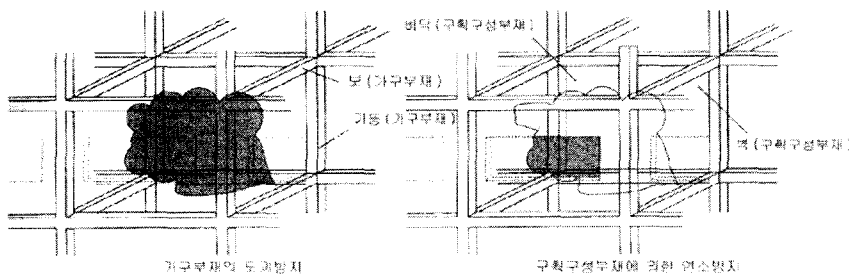


그림 12. 내화설계 이미지

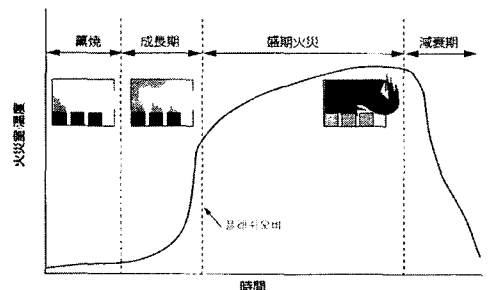


그림 13. 전형적인 실에서의 구획화재진전

표 4. 각 구조형식의 보유내화시간의 산정식

구조종류	부위	기둥	보	바닥	벽	지붕	계단
RC조		●	●	●	●	●	
철골조	피복	●	●				
	무피복	●	●	○	○	○	○
목조		●	●				
인정내화구조		○	○				

● : 상세한 산정식에 의해 계산

○ : 인정 내화시간의 대체식에 의해 계산

4.4 철근 콘크리트조의 보유내화시간

보유내화시간이란 내화성능(비손상성, 차열성, 차염성)이 확보 되는 한계의 가열시간이고, 옥내 화재 및 옥외 화재를 대상으로 산정된다.

주요구조부의 보유 내화시간에 대하여는 일본의 경우 平成12년 건교부고시 1433호에 기둥·보·벽·바닥·지붕·계단 등의 부위마다에 산정식이 규정되어 있다.

현재 고시에 정의되어 있는 산정식은 철골조·RC조와 일부의 목조에 한정되어 있고 그 외 일반 구조형식에 대하여는 내화구조로써 인정된 시간에 화재온도 상승계수 a 에 대응한 보정을 행하여 보유 내화시간을 산정한다.

각 구조형식에 대한 보유 내화시간의 산정방법을 <표 4>에 보인다. 즉, 내화성능 검증법에 있어서는 부재단위에 보유 내화시간을 검증하는 것을 제시하고 있다. 이는 단일 부재의 붕괴가 반드시 가구의 붕괴를 의미하는 것이 아니라면 화재시에서의 응력의 재배분 등을 가미한 검증에는 보다 고도의 전문성을 필요로 함에 있다.

철근 콘크리트조의 실내 화재 보유내화시간 산정식은

- 보통 콘크리트 또는 1종경량 콘크리트를 사용한 경우
- 하중지지 부재에 대해서는 상온시의 설계기준강도가 60 Nf/mm^2 이하인 경우
- 철근에 대한 피복두께가 3cm(바닥에 있어서는 2cm) 이상인 경우

를 적용대상으로 하여 규정하고 있다.

실내 화재 보유내화시간의 산정순서는 철골조와 같이 먼저 화재성상(화재지속시간 t_f , 화재온도상승계수 a)을 파악하는 것에서 시작한다. 부위에 따라 요구되는 성능은 다르지만 하중지지부재(비손상성)에 대해서는 열열화깊이 d (이 이상 단면이 결손되면 작용하중이 지지할 수 없게 되는 한계의 열화역의 깊이)를 산정하고 열열화 깊이에서의 콘크리트의 온도가 500°C 가 되는 한계의 가열시간을 산출한다. 또한 구획부재(차열성)에 관해서는 이면온도가 가연물 연소온도가 되는 한계의 시간을 산출한다. 비손

상성과 차열성(또는 차염성)이 요구되는 부재에 대해서는 양자 중 짧은 쪽이 실내화재 보유내화시간이 된다. 각 부재의 실내보유내화시간의 산정식은 아래식이 기본이 된다.

$$t_{fr} = \min \left[\max \left\{ \frac{16722(cd)^2}{a^{3/2} \left(\log_e \frac{0.673}{(cd)^{1/3}} \right)^2} \left(\frac{480}{a} \right)^6, \frac{118.4c_p D^2}{a^{3/2}} \right\} \right] \quad (5)$$

위 식에서 좌항이 비손상성, 우항이 차열성(또는 차염성)에 관한 산정식이고 요구되는 성능에 대해 사용하게 된다. 즉, 열열화깊이 d 는 각 부재에 대해 산정식이 정해져 있고, 하중조건 등에 의해 산출된다.

① 비손상성의 개념

기둥, 보 등의 하중지지 부재는 어떤 부재이든 많거나 적거나 화재에 의한 화열을 받으면 그 강도(내력)는 서서히 저하한다.

철근 콘크리트조에서는 피복부분의 콘크리트의 균열, 탈락에 의한 철근의 온도상승, 또한 가열에 의한 콘크리트 자체의 내력 저하로 유효부재단면이 감소한다.

따라서 내화성능 검증법에서는 단위 부재에서 화재시에 작용하는 응력 이하로 내력이 저하하지 않는 한계의 가열시간을 산출하여 이를 옥내 화재 보유내화시간으로 한다.

즉, 부재내력의 최소값이 작용하중에 의한 발생 응력과 거의 일치하는 가열시간이 보유내화 시간에 상당한다.

② 차열성의 개념

벽, 바닥 등의 구획 구성부재는 화재에 의한 화열을 받는 경우 그 이면온도가 과다하게 상승하면 부재이면에 접근하여 놓여져 있는 가연물을 착화시킬 가능성도 있다.

따라서 구획구성 부재에 대해서는 화재가 완료한 후에도 오랫동안 상승함을 감안하여 그 최대값이 가연물 연소속도에 도달하지 않는 최대의 가열시간을 (차열성의) 옥내 화재 보유내화시간이라 정의한다.

③ 차염성의 개념

외벽, 지붕 등의 건물 외피에는 차염성이 요구되지만 화염이 완료한 후에도 내면으로 화염을 통과하는 균열이나 극간이 생기지 않음이 요건이고, 이 한계시간이(차염성의) 옥내 화재 보유내화시간으로 정의된다.

5. 맺음말

최근 미국 뉴욕의 WTC 빌딩 붕괴와 관련하여 철골에 비해

표 5. 주요구조부에 필요한 성능

대상화재	필요한 성능	주요구조부의 부분						
		외벽	간막이벽	기둥	보	바닥	계단	지붕
옥내화재	비손상성	○*	○*	○	○	○	○	○
	차열성	○						○
	차열성		○			○		
옥외화재	비손상성	○*						
	차열성	○						

○ : 필요, ○* : 내력벽만 필요

내화성이 우수한 콘크리트 구조물에 있어서의 내화설계법 및 성능적 내화 검증법을 고찰해 보았다.

콘크리트의 내화설계에 대해서는 아직까지 철골과 같은 내화기준이 마련되어 있지 않은 실정이다.

따라서 주로 화재시에 있어서 건물의 연소화재방지 및 도피방지를 하는 것으로 피난안전성은 말할 것도 없이 소방수의 소화·구조활동에 있어서의 안전성, 건물의 붕괴를 억제하는 것을 목적으로 이를 달성하기 위해 필요한 화재시의 성능, 즉 어느 일정의 비손상성, 차열성, 차열성을 건축 구조 부재에 구비시키기 위한 설계를 중심으로 행해져야 한다.

이를 위해서 국내의 경우 영국, 뉴질랜드, 스웨덴, 호주, 일본 등에서 채택하고 있는 성능위주의 내화 검증법을 통하여 각 건물

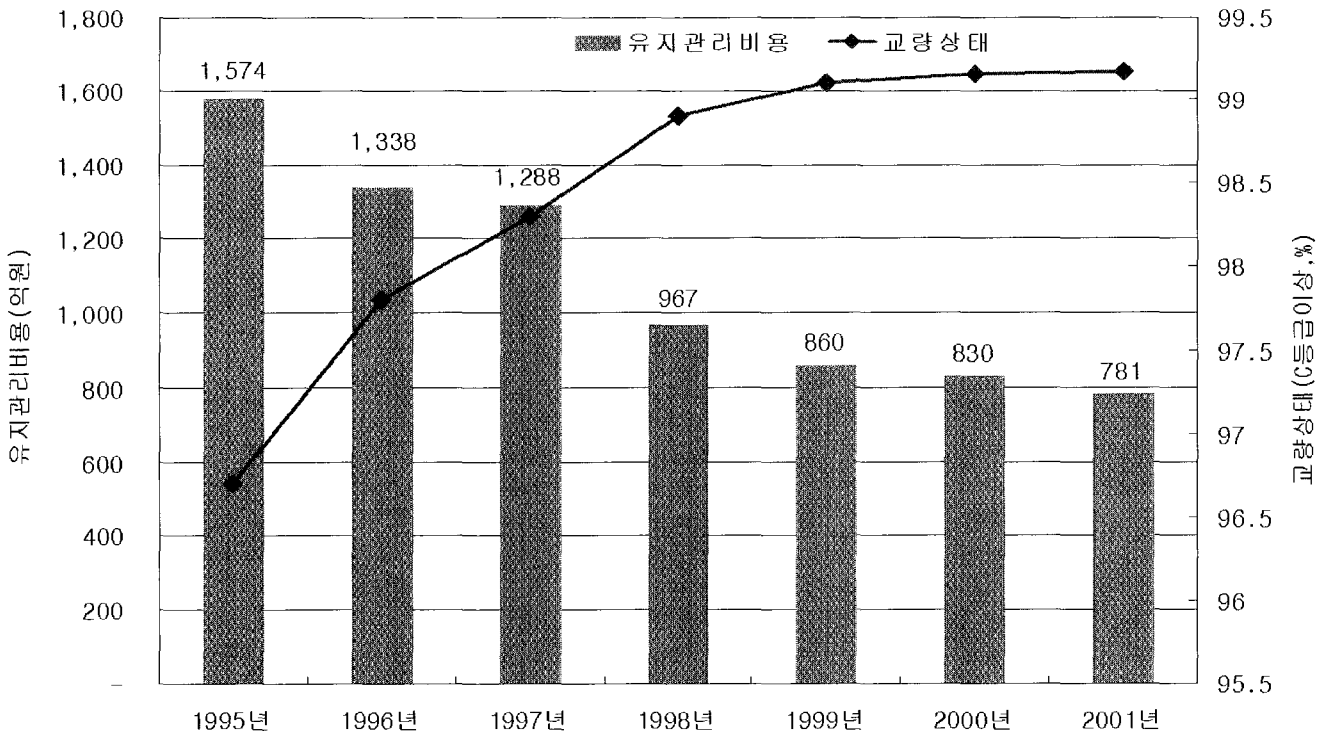
특성을 고려한 설계시의 유연성, 시공시 비용 절감, 리노베이션의 기회 증가 및 이에 따른 동등 혹은 그 이상의 안전성을 도모할 수 있으므로 국내에서도 이러한 부분에 대한 점진적 도입이 요구된다.

이와 함께 각종 구조물의 화재시 역학적 거동을 명확하게 규명하고 이를 성능적 내화기준 및 법규에 도입하기 위해서는 공인성을 갖춘 시험기관의 활성화를 통한 연구와 함께 산학연 연계가 구축되어야 할 것이다. □

참고문헌

1. "性能による防火設計", 建築技術, 2001.11.
2. John A. Purkiss, "Fire safety Engineering Design of Structures", 1996, pp.89~92.
3. 金和中, "高温度における コンクリートの力學的舉動に關する實驗的研究", 東京工業大學校 博士學位論文, 1988.3.
4. "Performance based design for fire resistance", modern steel construction, 2000.12.
5. "The future of fire engineering", modern steel construction, 1998.7
6. 건설교통부, "내화구조기준 개정연구(II)", 2000.3.
7. "改正建築基準法," 建築知識(法令解説)シリーズ①, 2001.9.

일반국도상 교량의 상태 및 유지관리 비용



주 : 교량상태는 C등급(보통인 상태)이상인 교량의 개소수를 전체 교량수에 대하여 백분율로 나타낸 것임.

(자료 : 건설교통부 도로국 도로구조물과)