

특별강연

콘크리트 구조물의 화재안전성에 관한 최신 연구현황 및 발전방향

송 훈

<전북대 공업기술연구센터>

1. 화재와 건축물

건축물의 고층화 및 거대화에 따라 잠재적 화재 위험도의 예측 및 대규모 복합시설에 대한 방화·방재 대책의 시스템화는 필요 불가결한 요구조건이며 구조물의 성능설계를 베이스로 하는 안정성 확보 대책이 요구된다. 또한, 건축물의 고층화 및 거대화에 따라 고강도 콘크리트에 관한 많은 연구 및 실험이 이루어져 설계기준강도 80MPa급의 고강도 콘크리트를 적용한 건축물이 등장하였고, 외국의 경우는 100MPa급의 콘크리트를 적용한 건축물도 점점 소개되고 있는 추세이다. 선진 각국의 경우, 1980년대부터 철근콘크리트 건축물의 경량화·고층화 기술에 대한 종합 연구개발 프로젝트가 진행되고 있으며, 국내에서도 고층 건축물의 선진기술에 관한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 고강도 콘크리트는

고층 철근콘크리트 건축물이나 프리스트레스 콘크리트의 건조물 등에 주로 이용되며, 초고층 건축물에서의 사용량은 점차 증가하는 추세에 있어 근일에 100MPa이상의 초고강도 영역에서도 실용화가 진전될 것으로 예측되고 있다. 이와 더불어, 콘크리트의 고강도화에 따른 많은 문제점이 노출되었으며, 특히, 화재에 의한 고온 수열로 발생하는 콘크리트의 성능저하는 해결해야 할 시급한 문제점으로 지적되고 있다. 화재에 의해 콘크리트 부재는 시멘트 수화물의 탈수 및 변화, 시멘트 경화체 및 골재의 열팽창에 의해 표층부로부터 철근에 이르는 큰 균열 및 들뜸, 폼아웃, 폭발 등의 성능저하 현상이 발생하게 된다. 이러한 성능저하 현상의 메카니즘에 관한 많은 보고가 있지만 해명해야하는 점이 적지 않은 것이 현실 실정이다. 화재시의 내화성능은 콘크리트의 종류에 관계없이 500℃이상의 고온에서는 급격



<사진 1> 화재에 의한 콘크리트 구조물의 피해⁽¹⁾

<표 1> 화재에 의한 콘크리트 구조물의 열화⁽¹³⁾

	균열	폭렬		
		박락	팝아웃	폭발성 폭렬
형상		박락	비산	
폭렬형태		일시형		연속형
발생시기	화재 전기간	화재 전기간	화재초기	화재초기 · 화재전기간
피해장소	가열면 전체	엷지 등	· 표면 일부분 · 골재부분	· 가열면 일부 · 가열면 전체
주요원인	화재시의 온도상승, 부재의 압축응력			
	· 시멘트 경화체의 화학적 변화 · 열팽창· 수축	· 표면이 중력에 의해 박락 · 철근의 과밀	· 열응력 · 골재자체의 폭렬	· 수증기압 · 열응력
피해대상	콘크리트 전반			
			경량, 고강도	고강도 경량, 고강도

히 저하하는 경향을 보이며, 이러한 성능저하는 화재조건이나 경과시간 등의 많은 요인에 의해 좌우된다. 특히, 콘크리트 부재의 폭렬은 표층부의 피복을 탈락시켜 철근의 온도상승을 유발하므로 소정의 피복두께를 유지하면 내화구조로서 인정되었던 내화성을 기대할 수 없어 확연한 차이를 보이게 된다. 또한, 사용량이 증가하고 있는 고강도 콘크리트나 경량콘크리트는 경향성이 확연하여 폭렬로 인한 단면결손으로 철근이 화염에 노출될 가능성 높기 때문에 이에 대한 대책이 시급하다.

2. 성기화재와 콘크리트 구조물

2.1 화재성상과 플래시오버

콘크리트 건축물의 화재성상은 구획조건이나 가열물의 연소특성에 의해 대략 결정된다. 즉, 구획이나 개구부의 크기, 구획을 구성하는 벽, 바닥, 천정의 재질과 가연물의 양과 표면적 등은 화재의 성상을 좌우한다. 일반적으로 화재는 화원에 근접한 가연물에 순차적으로 연소가 확대되어 내장재의 조건에 따라 폭발적인 연소의 확대 및 플래시오버를 유발한다. 플래시오버가 발생하면 화재의 성장과정은 초기화재, 성장기, 성

기화재, 감퇴기 등의 순을 거친다. 플래시오버는 실내 환경이 급격하게 변화하는 광의적 의미와 국부적인 연소가 전 가연물의 표면에 확대하는 현상, 급격히 온도가 상승하는 현상 등의 일반적 의미를 포함한다. 플래시오버 현상의 발생원인으로는 착화물의 수납 가연물이 연소하기 쉬우면 간단히 2차 착화가 발생하여 화재가 초기에 확대된다. 재료의 연소 용이성은 열이 전달되는 성질을 나타내는 열전도율, 밀도, 비열, 표면방사율 및 재료의 형상, 두께, 놓여진 형태와 재료의 열분해잠열과 재료의 양 및 표면적이 문제가 된다. 플래시오버 발생시간은 착화원의 위치와 면적, 가연물의 높이와 밀도 내장재료의 특성에 영향을 받는다.

2.2 성기화재와 콘크리트 구조물

플래시오버 후의 실내전면이 연소되는 상태를 성기화재라 하며 실내의 온도는 약 1000℃에 달하게 된다. 또한, 연소부분이 전체적으로 확대되어 소화도 어려우며, 산소농도가 급격하게 감소하고 일산화탄소, 이산화탄소 농도는 상승한다. 이러한 성기화재 성상에 영향을 미치는 주요 요인으로는 구획내의 화재하중, 화재실의 크기와 형태 및 화재실을 구성하는 부재의 열적성질 등

을 들 수 있다. 콘크리트 구조물은 내화구조이며, 화재에 대해 비손상성, 차열성, 차염성 등의 소요 성능이 요구되지만 성기화재 시간이 길어지면 구조물은 영향을 받게 되며 화재에 의해 변색 및 균열, 박락, 폼아웃, 폭발 등의 단면결손 및 처짐이나 변형이 발생하게 된다. 특히, 폭발에 의한 단면결손은 내부온도를 급격히 상승시켜 철근의 항복강도를 저하시키는 등의 내화상의 중대한 영향을 미친다. 콘크리트 부재의 폭발에 관한 정의 및 범위는 자중에 의한 박락으로부터 표층부가 비산하는 폭발성 폭발 등 여러 관점으로 분류된다.

3. 화재에 대한 콘크리트 재료의 성상

3.1 화학적 변화

고온하에 대한 콘크리트의 화학적 변화는 물의 탈수와 이에 동반하는 미세구조의 변화이다. 골재의 변화는 광물의 결정구조의 변화 및 탈수, 가스의 방출 등에 있다. 시멘트 경화체의 변화는 30~600°C에서의 자유수 및 시멘트 수화물의 탈수, 600~700°C에서의 C-S-H상의 분해, 1100~1200°C에서의 용해 등으로 대별되며 융점은 기본적으로 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 양에 의존한다. 골재의 변화로서 규암질 골재 등에 많이 포함되어 있는 석영의 570°C에서의 변태, 석회암의 주성분인 탄산칼슘의 600~700°C에서의 분해, 현무암의 팽창 등을 들 수 있다. 화재를 받은 콘크리트는 열에 의해 수산화칼슘이 열분해 되어 중성화하며 그 깊이는 화재온도와 밀접한 관련을 지닌다. 이에 따라 화재시의 수열온도 추정에도 중성화 깊이나 공극률의 변화 등을 통하여 추정하기도 한다.

3.2 물리적 변화

① 밀도변화

밀도변화는 콘크리트의 종류, 골재, 혼합 조건 등에 의해 다르며, 20~150°C 범위에서의 함수상

태와 밀접한 관계를 지니며 양생조건에 의해서도 크게 영향을 받는다. 보통콘크리트는 상온에서 2.0~2.5g/cm³, 경량콘크리트는 통상 1.4~2.5g/cm³ 정도이며, 온도가 상승할수록 저하하는 경향을 보이는 것이 일반적이다. 또한, 밀도변화는 물의 증발 및 탈수반응에 의해 크게 발생하므로 100°C 전후에서의 물의 증발에 의한 밀도감소는 현저하게 나타난다. 밀도변화는 골재의 열적 성질에도 영향을 받아 열팽창 및 화학적 변화에 의해 급격히 변화한다. 혼합조건에 따른 영향은 물시멘트비 및 단위수량이 클수록, 양생기간이 길수록 밀도변화는 크다^{(7),(12),(13)}.

② 열전도율

열전도율은 콘크리트를 구성하는 각 재료의 열전도율에 의해 결정되며, 함수율, 골재의 종류, 시멘트의 종류, 온도 및 공극률 등의 영향을 받는다. 특히, 콘크리트를 구성하는 골재의 종류에 의해 크게 영향을 받아 다공체인 경량콘크리트의 경우 보통콘크리트와 비교하여 작은 열전도율을 보인다. 열전도율은 함수량에도 크게 의존하여 수분손실에 의한 저하가 크며 고온역에서는 감소폭은 상온 보다는 작아진다. 또한, 콘크리트의 종류에 따라 다르며 일반적으로 상온에서 1.0~1.5W/m·K정도이다. 온도의 상승에 의해 열전도율은 작아져 700~800°C 범위에서는 상온에서의 50%정도가 된다^{(7),(12),(13)}.

③ 비열

비열은 상온에서 0.8~1.0kJ/kg·K정도이며, 온도가 상승할수록 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 고온하의 콘크리트의 비열은 물의 증발, 탈수반응, 탈탄산 반응에서 유발되는 잠열의 영향이 크다. 또한, 함수상태에 따라 200°C 이하에서 물의 증발에 의한 영향이 크게 나타난다. 고온하의 콘크리트의 비열 데이터는 측정이 곤란한 점을 들어 많지 않은 것이 현실적이다^{(7),(12),(13)}.

<표 2> 시멘트 경화체 및 골재의 온도에 의한 영향^{(1),(2),(13),(14)}

온도범위	변태반응 및 분해반응	온도에 의한 영향
30~200℃	물리적으로 결합한 물의 증발	<ul style="list-style-type: none"> · 비교적 큰 공극로부터 수분의 증발은 100℃이하의 온도에서부터 시작. · 공극의 크기에 따라 증발온도는 다르게 나타남.
30~300℃	겔의 붕괴 (경화 시멘트 페이스트의 탈수의 제1단계)	<ul style="list-style-type: none"> · C-S-H계 수화물: C-S-H <p>시멘트 경화체의 주성분, 물성에 미치는 영향이 큼. 결정도가 낮은 겔상으로 100~130℃에서 탈수하지만, 수화물의 화학조성은 일정하지 않기 때문에 개개의 형태를 명확히 구분하기는 어려움.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 에트링가이트: $C_3A_3CSH_{32}$ <p>100℃이하 및 100℃, 160~180℃정도에서 큰 피크를 보이며, 250~270℃에서 작은 피크를 보이며 단계적으로 탈수.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 모노설페이트: C_3ACSH_{12} <p>50~150℃ 및 200℃, 300℃에서 3단계로 탈수하여, C_4A_3S와 CaO로 변화.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 알루미늄이온계 수화물: C_3AH_6 <p>270~330℃에서 물이 탈수하여 550℃부근에서 남은 물이 탈수하여 $C_{12}A_7$와 CaO로 변화.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 이수석고: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ <p>탈수에 의해 약 130℃에서 반수석고, 약 160℃에서 무수석고로 변화. $CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 + H_2O$</p> <ul style="list-style-type: none"> · 수산화칼슘: $Ca(OH)_2$ <p>450~550℃에서 $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$</p>
120~600℃	화학 흡착수의 방출	
570℃	석영의 변태	<ul style="list-style-type: none"> · 주로 규암질 골재 등에 포함되어 있는 석영의 변태. $\alpha \rightarrow \beta SiO_2$
600~700℃	C-S-H상의 분해	<ul style="list-style-type: none"> · βC_2S의 생성.
600~900℃	탄산칼슘의 분해	<ul style="list-style-type: none"> · 석회암질 골재의 주성분인 탄산칼슘의 분해. SiO_2의 함유량이 많을수록 분해온도는 저하함. $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
1100~1200℃	콘크리트의 용해	<ul style="list-style-type: none"> · 경화 시멘트페이스트의 융점은 약 1200℃이며, 화학조성에 의해 1200℃ 보다 낮아짐. · 골재의 융점은 현무암이 1060℃, 규암이 1700℃이상.

④ 열확산율

열확산율은 비열, 밀도, 열전도율로 되는 물성치로 콘크리트의 열전도 현상에 대한 주요한 물성치로 100℃부근의 물의 증발, 탈수반응, 탈탄산반응 등을 포함하며 고온시의 온도거동을 포함한다. 열확산율은 상온에서 $0.2 \sim 0.7 \text{mm}^2/\text{s}$ 정도

이며 온도의 상승에 따라 감소하는 것이 일반적이지만 경량골재를 사용한 경우 증가하기도 한다. 열확산율은 콘크리트를 구성하는 재료의 열적 성질에 의존하기 때문에 구성 재료의 성질로부터 결정되며 콘크리트의 종류나 혼합조건, 구성 재료인 골재, 함수율 등에 크게 좌우된다^{(7),(12),(13)}.

⑤ 열팽창 및 열팽창계수

콘크리트의 열팽창은 고온거동 응력해석의 중요한 변수이며 이에 따라 다수의 연구 보고가 있다. 열팽창은 골재의 성질에 영향을 받으며, 콘크리트를 구성하는 재료의 각 성분의 영향을 받기 때문에 비교적 낮은 온도영역에서도 비선형이다. 또한, 낮은 온도에서도 함수율 및 혼합조건의 영향을 받는다. 시멘트 페이스트는 고온에서 수축하는 경향을 보이지만 모르타르 및 콘크리트는 골재의 팽창이 지배적으로 작용하여 팽창하게 된다^{(7),(12),(13)}.

3.3 역학적 성상

① 압축강도 및 탄성계수

고온하의 압축강도는 골재의 종류, 혼합조건, 가열조건 등에 의해 차가 발생하며, 온도 상승에 따라 압축강도 및 탄성계수 잔존율은 크게 저하한다. 고온하의 압축강도는 일반적으로 500℃에서 50%, 800℃에서 10%정도이다. 시멘트의 종류에는 큰 차를 보이지 않으며, 물시멘트비가 작을수록, 강도저하가 크게 발생한다. 탄성계수 및 탄성계수 잔존율은 온도의 상승에 의해 압축강도의 감소보다 직선적으로 감소한다. 콘크리트는 수열에 의해 시멘트 페이스트의 수축과 골재의 팽창 및 화학적 변화에 의해 균열이 발생하며 이러한 균열은 탄성계수를 저하시키는 주요인이다^{(7),(12),(13)}.

② 응력-변형 및 과도 변형

응력-변형은 온도의 증가에 따라 압축변형도 크게 된다. 응력-변형은 골재 및 가열조건 등에 의해 차가 발생하며 전술의 압축강도 및 탄성계수에 영향을 미치는 요인과 동일한 변수를 지닌다.

또한, 콘크리트의 압축강도, 실용범위의 물시멘트비에 관해서는 유사한 경향을 보인다. 외부하중이 작용한 상태에서 콘크리트가 가열되는 비정상 상태에서 발생하는 전체변형은 탄소성변

형, 크리프변형, 과도변형 및 열팽창 등으로 구분되며, 전체변형 및 크리프변형 및 과도변형에 영향을 미치는 요인으로는 시멘트-골재비, 골재의 종류, 함수율 등을 들 수 있다^{(7),(12),(13)}.

4. 콘크리트 부재의 폭발

4.1 폭발 연구에의 어프로치

구조부재의 내화성능의 관점에서 폭발은 부재 내부의 온도상승을 유발하는 중요한 문제이므로 여러 관점에서 폭발 현상의 해결과 메카니즘 파악을 위한 많은 연구가 진행되었다. 폭발 연구는 콘크리트 종류나 혼합조건, 가열조건, 구조부재의 형상과 크기, 외력하중과 프리스트레스 등의 여러 조건에서 접근하여, 화재에 의한 실내의 급격한 온도상승, 콘크리트의 함수조건, 부재에 작용하는 압축력, 사용된 골재의 열적성질, 온도구배에 의한 비정상 열응력과 수증기압 등과 밀접한 관련을 가진다는 연구결과를 얻었다. 콘크리트 부재에 발생하는 폭발을 모델화하여 해석적 예측이 가능한 모델은 보고 되지 않았지만 근래에 화재폭선에 의한 비정상 상태의 실험결과들이 일부 보고 되어 대략의 폭발 경향성을 파악할 수 있게 되었다. 폭발은 구조부재의 압축영역에서 발생하는 것이 일반적이며 부재에 작용하는 외력이나 프리스트레스, 부재가 받는 수열온도의 정도에 따라 다르게 나타난다. 또한, 콘크리트의 종류나 배합조건에 의해서도 다른 결과를 보인다. 일반적으로 고강도콘크리트나 경량콘크리트 혹은 연소속도가 빨라 화재실의 온도가 급격하게 상승하는 경우 폭발 발생의 가능성이 높다. 또한, 콘크리트의 함수상태는 폭발을 유발하는 중요한 인자이며, 조직이 밀실하고 함수율이 높은 경우 우선적이며 특정 조건을 만족하는 경우에 한해서 선택적으로 발생하게 된다.

콘크리트 부재의 폭발을 유발하는 메카니즘에 관한 보고는 열응력설과 수증기압설 등의 관점에서 검토되었으며 개개의 작용으로는 설명하기 어려운 점이 많아 현재는 열응력설과 수증기압설의 복합작용에 의한 설이 설득력을 얻고 있다. 하지만, 열응력 및 수증기압의 복합작용은 양방

<표 3> 고강도 콘크리트의 내화성능에 관한 연구내용⁽¹⁵⁾

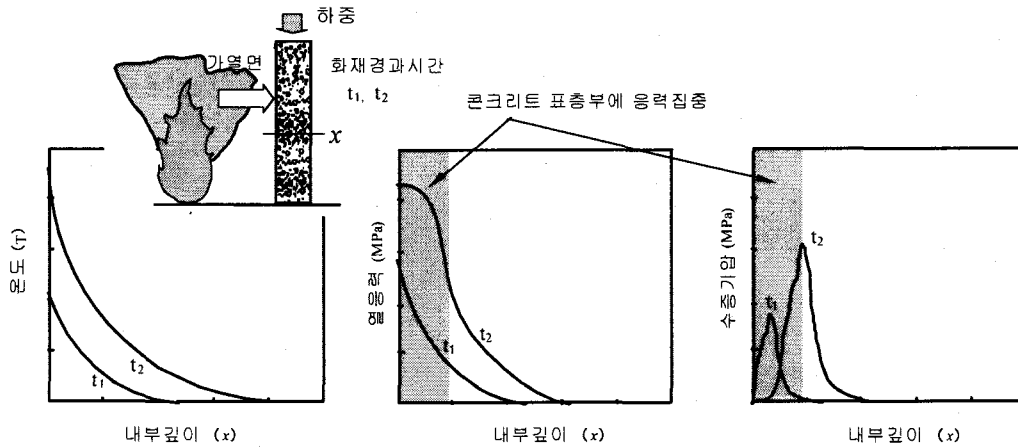
국 가	연 구 내 용	국 가	연 구 내 용
스웨덴	<ul style="list-style-type: none"> · 가열속도, 재하량, 혼화재료에 따른 파열 경향 · HSC의 파열에 대한 폴리프로필렌 섬유유의 영향 · 온도에 따른 열성능의 분석기법 · 재료의 특성과 구성비 · HSC 시험체의 시뮬레이션 분석 · 내화실험한 HSC 기둥의 시뮬레이션 분석 · HPC 보, 슬라브, 기둥의 내화설계법 	이탈리아	<ul style="list-style-type: none"> · 규산질계 HSC의 내화성능 · 부싯돌(flint)을 이용한 HSC의 내화특성 · 마이크로 콘크리트($f_c=170\sim 200\text{MPa}$)의 내화성능 · 대기온도와 500°C까지의 응력변형도, 압축, 인장강도, 인성지수 · 가열 온도에 따른 HSC의 파괴, 길이변화, 구조물의 구조역학적 거동
독일	<ul style="list-style-type: none"> · HSC($90\sim 100\text{MPa}$)의 역학적·열적특성 · UHSC(150MPa이상)의 역학적·열적특성 · 파괴지수, 역학적 거동 · 전산화처리작업 	캐나다	<ul style="list-style-type: none"> · Full scale의 HSC 기둥 내화설계 · 기둥의 단면크기, 형상, 띠철근의 간격, 양단지지조건 · 강섬유와 PP 섬유를 이용한 HSC의 내화특성 · 규산질계 골재와 탄산염 골재를 사용
미국	<ul style="list-style-type: none"> · HSC($69\sim 148\text{MPa}$)의 가열온도에 따른 투기성, 건조율, 흡수율, 강도저하, 인성변화, 파괴 에너지, 물의 거동, 공극압 · 탄산염 및 규산염 골재를 사용한 HSC의 내화특성 · 가열 온도에 따른 열전도, 열확산, 증량변화 · 보통콘크리트와 HSC의 내화특성비교 · 칼슘 알루미늄이트레 콘크리트의 폭렬 시뮬레이션 · 열처리, 콘크리트의 배합비, 화학적 혼화제와 고분자 섬유를 사용한 투기성의 변화 	일본	<ul style="list-style-type: none"> · 무폭렬 콘크리트에 관한 연구 · 폴리프로필렌섬유를 혼입한 HSC의 내화특성 · 고온에서의 수증기의 이동 및 형성과정 분석 · 고강도 콘크리트의 내화 특성 연구 · 고강도 콘크리트의 폭렬에 관한 실험적 연구 및 폭렬 특성 분석 · 폭렬에 대한 메카니즘 분석 · 고강도 콘크리트의 내화성능 검정법의 적용 연구 · 콘크리트 구조물에 대한 종합적 화재 안전성 검토
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> · 모델링에 의한 HSC의 파괴거동 · HSC의 고온에서의 특성 · 화재 피해 평가와 보수 보강법 · 고온에서 콘크리트의 모델화와 물리적 메카니즘 	노르웨이	<ul style="list-style-type: none"> · 탄산수소 화염에 의한 해안콘크리트의 내화특성 · 고강도 LWA 콘크리트의 내화특성

이 균등하게 작용하는 것이 아니라 주어진 조건에 의해 열응력 또는 수증기압이 우선적으로 작용하여 폭렬에 영향을 미친다. 또한, 폭발성 폭렬이 발견되는 가열초기는 열응력과 수증기압이 동시에 작용한 결과로서 나타나며, 수증기압에 의한 가능성이 우선적으로 고려된다. 열응력 및 수증기압은 급격한 온도상승이 발생하는 가열초기에 콘크리트의 표층부에 한정하여 동시에 변화를 보인다. 이러한 변화는 5~10분간 표층부에 응력의 변화 및 집중이 보이게 되며, 열응력은 수증기압보다 장시간에 걸쳐 콘크리트 부재에 영향을 미친다.

4.3 폭렬 현상에 대한 대책

콘크리트의 폭렬 방지책은 압축강도, 흡수율,

가열속도의 제어 등을 통한 열응력 및 수증기압의 유발요인을 제거해야 하지만 압축강도는 건축물의 용도와 목적에 의해 설계기준강도가 결정되므로 콘크리트 표층부에 존재하는 함수량이나 가열속도를 적절한 대책을 통한 제어방법이 효율적이다. 효과적인 폭렬대책으로 화재시의 열을 차단하여 표층부의 온도상승을 저감시키는 방법이나 내화도를 높여 폭렬을 저감하는 방법을 들 수 있다. 또한, 섬유유 혼입을 통한 제어 방법도 일부 제시되고 있으며 간편하게 내화성능을 향상시킬 수 있다. 급격한 온도상승 및 화재지속 시간을 단축하기 위한 대책으로 실내에 존재하는 가연물의 저감 및 난연화 방안도 마련되어야 한다. 또한, 콘크리트 부재의 내화성능 향상을 위한 내화설계의 적용 및 결과에 따라 적절한 피복두께도 산정되어야 할 것이다. 일부

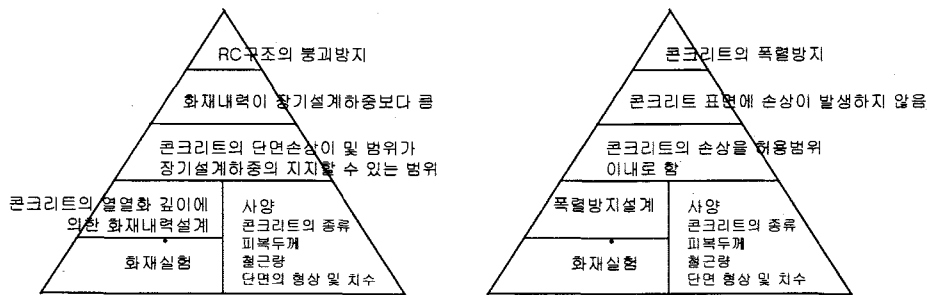


<그림 1> 온도상승에 따른 열응력 및 수증기압의 변화

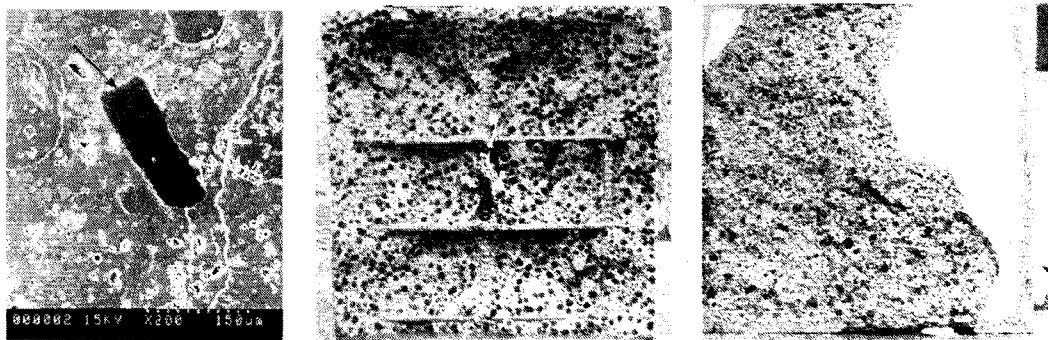
의 선진 각국에서 적용되고 있는 건물의 중요도에 상응하는 화재안전성 확보나 내화물 등을 이용한 내화도 향상도 고려해야 할 사항중의 하나이다.

5. 콘크리트 부재의 화재 안전성에 관한 연구과제

선진 각국은 이미 1990년대 후반기에 사양설



<그림 2> 성능설계에 의한 폭열방지 대책



<사진 2> 합성섬유를 이용한 콘크리트의 내화성능 비교

화재내화실험		폭렬 메카니즘 규명			내화재료의 개발
시험체레벨	실부재레벨	재료열물성시험	열응력실험	수증기압설	
공시체에 의한 데이터 축적	내부온도에 의한 내화성능검토 내화성능에 대한 정량적 평가 관련 실험	일부의 제한된 열물성치 본간시험이 대부분 차지	부재에 대한 온도 의존적 파괴 발생 하중 마이크로 모델의 적용 재료의 열물성치의 고려	행의 확산에 의한 수증기압의 형성	내화피복 내화도료 고내화성 콘크리트의 개발
	↓ 부재의 종국 파괴까지 내화성능이 필요한 요소	↓ 열간열물성치의 데이터 축적이 필요 실부재에 적용 가능한 열물성치의 데이터 확보	↓ 부재의 열화 및 열응력 고려 재계면의 열응력 분포 과도한 온도 상승 적용	↓ 마이크로 모델의 적용 콘크리트 내부의 온도 고려 수분의 이동 및 수증기압의 형성 수증기압과 폭렬의 연관적 메커니즘의 규명	↓ 무폭렬 콘크리트의 개발

<그림 3> 화재 안전성에 관한 연구과제

계에서 새로이 성능설계 개념을 도입하는 등 콘크리트 구조물의 내화안전 설계 및 요구 조건 등을 명기하였으며 내화설계의 다양성을 제시하였다. 이에 따라 기본적 조건 등에 대한 제시는 일정 정도 확립하였지만 성능설계의 적용에는 화재외력과 화재내력의 이론을 기본으로 실험하여 검증하는 등 정식화에 대한 필요성도 요구되고 있다. 화재시의 콘크리트 부재의 내화성능은 1970년대부터의 연구 테마이며 이에 관한 많은 연구가 보고 되었으며, 재료과학 및 계측기술의 진보에 의한 신기능성 재료의 개발과 분석능력의 증대 등 일약의 진보를 보였다. 최근에는 100MPa급의 고층 건축물이 소개되고 있어 콘크리트의 고강도화에 따른 부재의 폭렬에 의한 단면결손 현상의 규명과 이에 대한 대책의 마련이 시급한 연구과제로 대두되고 있다. 전술한 폭렬에 대한 메카니즘을 명확히 규명을 위해서는 시물레이션 정도를 메조에서 마이크로 모델의 영역까지 확장할 필요가 있다. 또한, 열응력 및 수증기압에 의한 콘크리트 내부의 응력변화와 동시에 발생하는 균열에 의한 응력완화, 콘크리트 내부 결함 및 공극에 의한 열응력 및 수증기압의 완화에 대한 역할을 고려한 모델의 개발도 필요하다. 이와 더불어, 폭렬의 범위 및 열열화 깊이가 화재내력에 미치는 영향에 관한 모델의 정식화도 요구된다. 콘크리트는 구성재료, 구성

비, 부재의 구조인자에 의해 복잡하게 변화되므로 여러 조건에 대해 일반성을 지니며 상응되는 모델의 개발도 필요하다.

건축 구조물의 내화설계 및 화재안전에 관한 향후의 연구과제로는 구성 재료의 고온 물성치에 관한 데이터의 축적 및 비정상 가열을 받은 콘크리트의 표층부의 응력변화에 관한 시험 데이터의 축적, 재료의 고온시의 강도 정식화 및 종국내력과 관계 파악 및 보유내화 성능에 관한 검증법 개발 등의 연구가 필요하다고 사료된다.

< 참고 문헌 >

1. 火災と建築, 共立出版, 日本火災學會, 2002
2. 火災便覽第3版, 共立出版, 日本火災學會, 1997
3. 新版建築防火, 堀内三朗, 朝倉書店, 1994
4. 建築物の総合防火設計法, 第2卷出火擴大防止設計法, 編集 (財) 國土開發技術研究センター, (財) 日本建築センター, 1989
5. 鋼構造耐火設計指針, 日本建築學會, 1999

6. セメントの常識, セメント協會, 1998
7. Ulrich Schneider ; Behavior of Concrete at High Temperatures, Berlin, 1982
8. 火災とコンクリート, シンポジウム資料, 日本建築學會, 2001
9. コンクリート構造物の火災安全性研究委員會報告書, 日本コンクリート工學協會, 2002
10. Wei-Ming Lin, Microstructures of Fire-Damaged Concrete, ACI Materials Journals, May-June, p.199, 1996
11. 構造部材の火災診断および補修・補強方法, シンポジウム資料, 日本建築學會, 2002
12. Zdenek P. Bazant, Maurice F. Kaplan ; Concrete at High Temperatures : Material Properties and Mathematical Models, Prentice Hall, 1996
13. 森 實, 建築材料の火災時における高温性状に関する研究, 博士學位論文, 東京大學, 1975
14. 송 훈, 화재시의 고강도 콘크리트의 내화성능에 관한 연구, 박사학위논문, 동경대학, 2003
15. 화재와 콘크리트, 콘크리트학회지 특집기사, 한국콘크리트학회, 2002