

# 고강도콘크리트 부재의 내화성능에 관한 연구

이 유 식 || 건축구조부 부장

## 글 순 서

1. 서 론
2. 각국의 콘크리트 관련 내화구조기준
3. 고강도 콘크리트의 내화성능
  - 3.1 폭렬현상과 대책
  - 3.2 공시체 내화성능 실험
  - 3.3 기둥부재 내화성능 실험
4. 결 론

## 1. 서 론

건축재료 중 콘크리트는 내화성능이 우수한 재료로 인정받고 있으며, 건축법에서 정하고 있는 법정내화구조에서도 철근콘크리트 구조는 부재의 두께만 만족할 경우 내화구조로 인정되고 있다.

그러나, 이와 같은 내화구조기준은 지나치게 단순하여 다양한 콘크리트의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있어 철근콘크리트 구조물의 내화성능 확보여부를 의심케 하고 있다.

최근 고층·대형건축물의 건축에 고강도콘크리트 사용이 증가하고 있으나, 고강도콘크리트의 내부조직 치밀화에 따른 폭렬현상에 대한 대책이나 규제 없이 현장에서 그대로 사용되고 있어 고강도콘크리트 구조물의 내화성능저하가 예상되므로 이에 대한 대책마련이 시급한 실정이다.

따라서, 본 고에서는 각국에서 정하고 있는 콘크리트 관련 내화구조기준을 비교하고, 고강도콘크리트의 폭렬현상 및 대책에 대한 이론적 고찰과 실험을 통하여 콘크리트 관련 내화구조기준의 모순점을 지적하고 그 개선대책의 필요성을 제기하고자 한다.

## 2. 각국의 콘크리트 관련 내화구조기준

국내의 콘크리트 내화구조기준은 부위에

다른 부재의 크기만을 정하고 있는 반면, 선진외국의 경우 부재의 크기, 골재의 종류, 피복두께, 콘크리트의 강도 등 다양한 요소를 포함하고 있어, 최근 기술개발에 따른 다양한 콘크리트에 대한 내화성능확보가 용이하게 되어 있다.

국내와 선진각국의 콘크리트 관련 내화구조 기준은 다음과 같다.

## 2.1 우리나라

콘크리트 관련 내화구조 기준은 표 1과 같이 벽, 기둥, 바닥의 경우 일정 두께 이상이면 내화구조로 인정하고 있으며, 그 이외의 부위에서는 철근콘크리트조 이면 모두 내화구조로 인정하고 있다.

내화성능면에서는 구조별 성능구분 없이 모두 3시간 내화등급을 지닌 것으로 간주하고 있는 것이다.

〈 표 1 〉 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙

부 위		구조 (철근콘크리트 구조 관련)
벽	외벽중비내력벽	철근콘크리트조로서 두께가 7cm 이상인 것
	기 타	철근콘크리트조로서 두께가 10cm 이상인 것
기 둥		기둥의 경우에는 그 작은 지름이 25센티미터 이상인 것으로서 철근콘크리트조
바 닷		철근콘크리트조로서 두께가 10센티미터 이상인 것
보		철근콘크리트조
지 붕		철근콘크리트조
계 단		철근콘크리트조

## 2.2 일본

사용되는 부위와 콘크리트의 부재크기 등에 따라 표 2와 같이 내화구조로 인정하고 있

〈 표 2 〉 건설성 고시 제 1399호

부 위		내 화 시 간	구 조
벽	내 력	2시간	철근콘크리트조로서 두께가 10cm 이상의 것
	간막이	1시간	철근콘크리트조로서 두께가 7cm 이상의 것
	비내력 간막이	1시간	철근콘크리트조로서 두께가 7cm 이상의 것
	내 력 외 벽	2시간	철근콘크리트조로서 두께가 10cm 이상의 것
기 둥		1시간	철근콘크리트조로서 두께가 7cm 이상의 것
		2시간	소경이 25cm 이상인 철근콘크리트조
		3시간	소경이 40cm 이상인 철근콘크리트조
바 닷		1시간	철근콘크리트조
		2시간	철근콘크리트조로서 두께가 10cm 이상의 것
보		1시간	철근콘크리트조로서 두께가 7cm 이상의 것
		1시간	철근콘크리트조
		2시간	철근콘크리트조
	3시간	철근콘크리트조	
지 붕		30분	철근콘크리트조
계 단		30분	철근콘크리트조

으며, 성능등급은 30분에서 3시간까지 세분화하여 분류하고 있다.

또한, 성능기준을 도입하여 콘크리트의 압축강도가 60MPa 이상일 경우, 심의위원회의 심의를 거쳐 화재에 대한 안전성이 확보되어야 시공이 가능하다.

### 2.3 미국

기둥, 보, 트러스에 대하여는 표 3과 같이 기본적인 부재의 크기를 12인치(약 30cm)이

상으로 규정하고, 콘크리트 제작에 사용된 골재의 종류를 대분류로 하여 각 내화성능등급에 따라 피복두께를 정하고 있으며, 벽체의 경우는 표 4와 같이 콘크리트의 종류에 따라 각 내화성능등급별 부재의 두께를 정하고 있다.

이것은 콘크리트의 고온시 특성에 많은 영향을 미치는 골재의 종류와 피복두께 및 세분화된 단면크기를 고려하여 내화성능등급을 정함으로써 우리나라의 ‘철근콘크리트조’ 및 일정두께에 의한 규정보다 내화성능확보가 원활하게 되어 있다.

〈 표 3 〉 콘크리트조 내화구조기준(IBC)

부 재	사 양	최소피복두께(inch)			
		4시간	3시간	2시간	1시간
기둥/보/트러스	탄산염, 경량 및 모래-경량골재 콘크리트, 부재 12인치 이상, 사각 또는 원형	1½	1½	1½	1½
	규산질골재 콘크리트, 부재 12인치 이상, 사각 또는 원형	2	1½	1½	1½
연결부	탄산염, 경량 및 모래-경량골재 콘크리트	1¼	1¼	1¼	¾
	규산질골재 콘크리트	¾	½		¾
바닥/지붕	탄산염, 경량 및 모래-경량골재 콘크리트	1	1	¾	¾
	규산질골재 콘크리트	¾	1	1	¾

〈 표 4 〉 콘크리트조 벽체 내화구조기준(IBC)

부 재	사 양	단면두께(inch)			
		4시간	3시간	2시간	1시간
벽 체	규산질골재 콘크리트	7.0	6.2	5.0	3.5
	탄산염골재 콘크리트	6.6	5.7	4.6	3.2
	모래-경량 콘크리트	5.4	4.6	3.8	2.7
	경량 콘크리트	5.1	4.4	3.6	2.5

### 2.4 캐나다

미국과 같이 콘크리트의 종류와 피복두께에 따라 내화성능등급을 정하고 있으며, 표 5와 같이 미국보다 좀더 세분화된 콘크리트의 종류를 사용하고 있어 많은 연구결과가 반영

된 것임을 알 수 있다.

또한, 콘크리트의 폭렬에 대하여 민간연구기관인 NRC에서 ‘고강도콘크리트 기둥의 내화설계 가이드라인’을 제시하여 고강도콘크리트 사용에 따른 내화성능확보 방안을 제시하고 있다.

〈 표 5 〉 내화구조에 사용되는 콘크리트의 종류(NBC)

구 분		내 용
S		화강암, 규암, 규토질의 굵은 골재로 이루어진 콘크리트 또는 30% 이상의 규질암, 규암, 부식돌을 포함하는 콘크리트
N		석탄 슬래그, 부순 벽돌, 고로 슬래그, 석회암, 사암의 굵은 골재로 이루어진 콘크리트 또는 30% 미만의 규질암, 규암, 부식돌을 포함하는 콘크리트
L	L <sub>1</sub>	모든 골재가 팽창 혈함으로 이루어진 콘크리트
	L <sub>2</sub>	모든 골재가 팽창 슬래그, 팽창점토, 경석으로 이루어진 콘크리트
	L40S	잔골재가 모래나 저밀도의 골재로 이루어진 콘크리트로서 모래가 전체 골재 용적의 40%를 초과하지 않는 콘크리트
	L <sub>1</sub> 20S L <sub>2</sub> 20S	잔골재가 모래나 저밀도의 골재로 이루어진 콘크리트로서 모래가 전체 골재 용적의 20%를 초과하지 않는 콘크리트

### 3. 고강도 콘크리트의 내화성능

#### 3.1 폭렬현상과 대책

고강도콘크리트의 내화성능은 폭렬현상의 발생에 따라 영향을 받으며, 기존에 알려진 폭렬현상에 대한 자료를 정리하면 다음과 같다.

##### 1) 폭렬의 정의

폭렬(爆裂, Spalling)이란 화재시 급격한 가열에 따라 부재 표면의 콘크리트가 탈락하거나 박리하는 현상으로 고강도콘크리트 사용에 따른 내화성능의 저하는 주로 폭렬현상에 기인한다.

폭렬현상은 화재시 콘크리트 내부의 수증기 압력이 증가하여 발생하는 것으로 콘크리트 표면의 박리 및 탈락현상이 발생하여 단면 감소와 철근의 노출 등으로 콘크리트 구조물의 내력저하가 나타나는 현상이다.

#### 2) 폭렬의 형태

폭렬의 형태는 내화성능에 큰 영향을 미치지 않는 골재에 의한 폭렬, 구조적인 문제를 일으키는 폭발성 폭렬, 화재시간이 길어짐에 따라 나타나는 콘크리트 표층의 박락으로 구분된다.

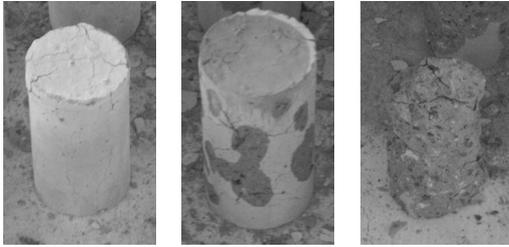
##### ① 골재의 폭렬

고온시에 물리적 혹은 화학적 변화에 의해서 골재가 파열, 분쇄되는 현상이다. 보통 콘크리트에 있어서 골재의 폭렬은 일반적으로 부재의 표면에 국한되며 부재의 내화성능에는 영향을 주지 않는다.

##### ② 폭발성 폭렬

폭발성 폭렬은 화재발생 후 30분이내에 돌연 발생하는 것으로 부재의 내화성능에 큰 영향을 준다. 폭발성 폭렬의 발생에 대하여는 다음과 같은 원인을 들 수 있다.

- 고온시에 콘크리트 내부수증기의 발산에 따라서 발생하는 인장응력
- 화재시에 보통 발생하는 열응력으로써의 압축응력과 갑자기 발생하는 표면균열폭발성 폭렬은 위험한 현상으로써, 부재의 크기, 배근상태 등에 따라서 달라질 수 있다. 특히, 부재의 파괴는 T형 혹은 I형 보의 얇은 웹부분에서 흔히 일어난다. 폭발성 폭렬은 얇은 부재 및 단면내의 압축력이 큰 부분에서 현저하게 발생한다.



보통강도콘크리트      표면박리형 폭렬      폭발형 폭렬

〈 그림 1 〉 콘크리트 공시체의 폭렬 유형

### ③ 콘크리트 층의 박락

긴 화재시간 후에 콘크리트 층이 벗겨지는 것으로 화재시의 응력에 의한 피로, 균열로 인하여 증대된 변형에 의해서 발생한다. 화재 시에는 다음과 같은 응력이 생기게 된다.

- 단면내의 불균일한 온도분포와 이에 따른 불균일한 팽창에 의한 열응력
- 콘크리트와 철근의 팽창이 동일하지 않기 때문에 생기는 구속응력

이들의 응력에 의해 콘크리트에 균열이 발생하고 콘크리트 층이 벗겨지게 된다.

### 3) 폭렬에 대한 대책

각국에서 보고된 폭렬에 대한 대책을 간략히 정리하면 다음과 같다.

- 경량골재보다 보통골재를 사용한다.
- 폴리프로필렌섬유를 첨가한다.
- 강섬유를 사용하여 인장강도를 증진시킨다.
- 철근의 간격을 가깝게 하고 수평, 수직 배근을 실시한다.
- 콘크리트의 표면 부착력 증가를 위한 와이어메쉬, 메탈라스 등을 설치한다.
- 콘크리트 부재 표면부에 충분한 피복을 한다.
- 콘크리트의 강도가 일정강도를 넘어갈

때 폭렬을 방지하기 위한 적절한 사전주의를 한다.

- 부재내의 상대습도를 낮출 수 있도록 충분한 양생을 한다.
- 부재크기를 크게 하며, 가열면적을 줄이기 위한 단면설계가 이루어지고, 모서리 부 등의 처리에 주의한다.

## 3.2 공시체 내화성능 실험

고강도콘크리트의 폭렬현상 발생에 대하여 재료적 특성을 확인하기 위하여 공시체 실험을 실시하고 그 내용을 소개한다.

### 1) 실험인자 및 방법

고강도콘크리트의 폭렬현상에 주로 영향을 미치는 재료적 요인은 압축강도, 내부수분량을 들 수 있으며, 현재까지 알려진 폭렬성능개선을 위한 가장 효과적인 방법은 섬유 혼입이다.

따라서, 고강도콘크리트의 압축강도, 섬유 혼입 및 수분함유량에 의한 폭렬현상을 관찰하기 위해 다음의 인자를 대상으로 KS F 2257-1(건축 구조 부재의 내화 시험 방법 - 일반 요구 사항)에서 제시하고 있는 표준온도가열곡선에 의해 30분 가열시험을 실시하였다.

〈 표 6 〉 실험인자

요인	압축강도 (MPa)	섬유혼입	양생방법	시험체 규격
인자	30	무혼입 혼 입	수중양생	Φ 100×200 150×150×300
	50		기중양생	
	80			
수준	3	2	2	1

※ 압축강도 및 양생방법에 따른 공시체는 원주형 공시체이며, 섬유혼입은 각주형 공시체를 사용하였음.

## 2) 실험결과

콘크리트의 압축강도에 따른 영향은 표 7과 같이 고강도화 될 수록 폭발현상이 결렬해짐을 알 수 있으며, 양생방법 중 수분함유량이 작은 기중양생에 비하여 수중양생의 경우 폭발현상이 더 심하게 발생됨을 알 수 있었다.

이와 같은 폭발현상을 방지하기 위하여 섬유혼입을 하고 실험한 결과 30, 50, 80MPa의 모든 강도에서 폭발현상이 발생하지 않음을 보여주어 섬유혼입이 콘크리트의 재료적 측면에서 적절한 폭발방지 대책의 일환임을 알 수 있다.

### 3.3 기둥부재 내화성능실험

고강도콘크리트의 폭발현상에 대하여 구

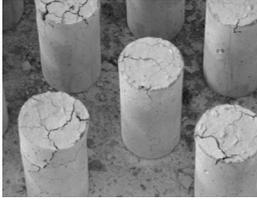
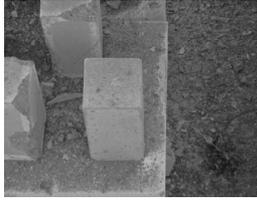
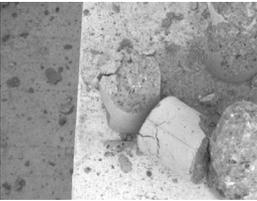
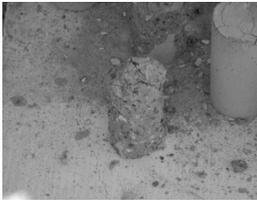
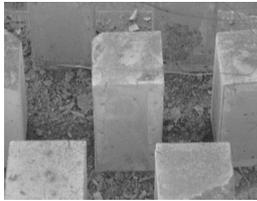
조적 안전성을 확인하기 위하여 기둥부재실험을 실시하고 그 내용을 소개한다.

#### 1) 실험인자 및 방법

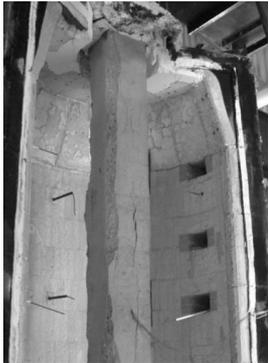
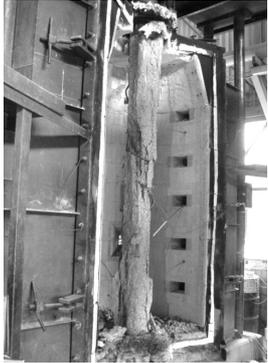
공시체에 대한 실험은 단순히 재료적인 접근에서 고강도콘크리트의 특성을 평가할 수 있는 반면, 기둥부재의 경우 실재 건축물에서의 재하조건과 같은 방법에 의해 실험을 실시하므로 구조적 안전성을 평가할 수 있는 지표가 된다.

따라서, 공시체 실험시 적용된 압축강도 30, 50, 80MPa의 콘크리트를 이용한 철근콘크리트 기둥에 대하여 KS F 2257-1 및 KS F 2257-7(건축 구조 부재의 내화 시험 방법 - 기둥의 성능 조건)에 의한 재하실험방법에 의하여 실험을 실시하였다.

〈 표 7 〉 공시체 실험결과(폭발상태)

압축강도	구 분	섬유 무혼입		섬유혼입
		기중양생	수중양생	
30MPa				
50MPa				
80MPa				

〈 표 8 〉 기둥부재실험 결과(파괴 형상)

양생 압축강도	시험 후	파괴부위 상세1	파괴부위 상세2
30MPa			
50MPa			
80MPa			

## 2) 실험결과

철근콘크리트 기둥의 내화시험결과, 콘크리트의 강도가 높아짐에 따라 표 8과 같이 표면의 박리현상이 심해져 단면손실이 커짐을 확인할 수 있었다.

30MPa 일반강도콘크리트 기둥부재는 폭

렬이 없어 파괴현상이 나타나지 않았으며, 50MPa, 80MPa 고강도콘크리트 기둥부재는 콘크리트 폭렬현상으로 인하여 콘크리트의 단면이 손실되고, 띠근의 절단부위 발생 및 주근의 내력저하현상으로 인한 파괴현상을 나타내었다.

따라서, 고강도콘크리트는 폭렬로 인한 단면손실을 방지하기 위한 섬유혼입과 띠근의 간격을 좁게 하여 기존의 방법보다 강한 결속 방법을 취하는 등의 내화성능 개선 대책이 필요하다.

#### 4. 결 론

최근까지 화재로부터 안전한 구조로 인식되어온 철근콘크리트구조가 고강도콘크리트를 사용함에 따라 폭렬의 발생가능성이 높아져 더 이상 화재로부터 안전한 구조가 아님이 증명되었다.

그러나 국내에서는 콘크리트 폭렬에 대한 인식이 낮고 이에 대한 검토, 기술제안, 지침 등의 안전장치가 없는 상태에서 고층·대형 건축물에 고강도콘크리트를 사용하고 있어 화재노출시 건축물의 내화성능저하로 인한 붕괴위험을 안고 있다고 할 수 있다.

따라서, 고강도콘크리트의 화재안정성을 확보하기 위하여는 기초단계에 머물러 있는 국내 콘크리트 폭렬현상에 대한 문제점을 인식하고, 정확한 성능파악을 위한 고강도콘크리트 구조부재의 내화성능실험과 폭렬방지 기법에 대한 개발연구가 이루어져야 하며, 이를 바탕으로 향후 콘크리트 관련 내화구조기준이 개선되어 고강도콘크리트를 사용한 건축물의 화재안전성을 확보할 필요가 있다.

#### 〈참고문헌〉

- 배정렬외 4인, 메탈라스로 횡구속된 고성능 콘크리트의 화재시 폭열방지성능에 관한 기초적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제22권 제1호, 2003. 4. 27.
- 윤재진, 화재시의 콘크리트 폭렬현상과 대책, 대한건축학회지, 1993. 1.
- Ulrich Schneider, Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1982.
- V.K.R. Kodur, Fire Performance of High-strength Concrete Structural Members, Institute for Research in Construction, 1999. 12.
- Y. Anderberg, Spalling Phenomena of HPC and OC, NIST Special Publication 919, 1997.
- 井上明人, 高强度コンクリートの耐火性に關する實驗(水セメント比, 養生方法, 含水率分布及び内部組織と爆裂に關する考察), 建材實驗情報, 2000. 11. **FILK**