

# 고강도 콘크리트 기둥의 내화설계 가이드라인 <sup>1)</sup>

(Guidelines for fire resistance  
design of high-strength  
concrete column)

공학박사 김 대 회 / 방내화팀 연구원

1. 서언
2. 연구의 중요성
3. 고강도 콘크리트 기둥에 대한 내화성능 연구
4. 화재성능을 지배하는 요소(주요소)
5. 화재성능을 향상시키기 위한 가이드라인
6. 요약

## Abstract

고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 향상시키기 위한 설계지침을 개발하기 위한 연구프로그램의 전체적 결과가 도출되었다. 고강도 콘크리트 기둥과 보통강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 비교하였다. 화재상태에서 고강도 콘크리트 기둥의 구조적 거동에 영향을 미치는 다양한 요소에 대하여 토론하였다. 설계 가이드라인은 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬을 줄이고 내화성능을 향상시키기 위하여 준비하였다.

※ 키워드 : 내화, 고강도 콘크리트, 설계 가이드라인, 철근콘크리트 기둥, 폭렬

## 1. 서언

최근, 건설산업은 고강도콘크리트<sup>2)</sup>의 사용에 많은 관심을 가지고 있다. 이것은 전통적인 보통강도 콘크리트에 비하여 고강도콘크리트가 지닌 고강도와 고내구성과 같은 구조적 성능의 향상이 원인이다. 고강도 콘크리트는 다리, 해안구조물, 사회간접기반시설 등에 널리 사용되어졌으며 건축물의 기둥으로 확대되고 있다. 종종, 고강도 콘크리트 기둥은 건물의 외벽 또는 구조부분에서의 주요 내력부재로 사용되어지며, 이러한 기둥에 대한 적절한 화재안전을 평가하는 것은 건물설계에 있어 안전측면에서 요구되는 중요한 사항중의 하나이다. 화재로 인한 피해를 측정할 때, 화재에 대한 방어의 마지막 단계를 구조적 안정성으로 생각하는 것이 이 요구의 기본개념이다.

일반적으로, 콘크리트 구조부재는(주로 보통강도 콘크리트 기둥) 화재상황에 좋은 성능을 보인

다. 그러나, 연구[1,2,3]<sup>3)</sup>의 결과 고온에서 고강도 콘크리트 기둥과 보통강도콘크리트 기둥의 특성에 차이가 있음을 알았다. 나아가, 고강도 콘크리트 기둥에 대한 연구[4,5,6]에서와 같은 조건의 급격한 가열을 하였을때 나타나는 폭발적인 폭발현상은 관심사가 되었다.

NBCC(National Building Code of Canada)[7]와 같은 빌딩코드는 일반적으로 구조 부재에 대한 내화요구사항을 정하고 있다. 북미에서 콘크리트 구조는 미국의 경우 ACI기준[8]에 의하며, 캐나다는 CSA A23.3-M94기준[9]에 의하여 설계 되어진다. CSA기준의 최신판은 고강도 콘크리트 구조부재의 설계에 있어 세부적인 시방을 담고 있다. 그러나, CSA기준[9]이나 ACI기준[8,10]에는 고강도 콘크리트 구조부재의 내화 설계에 대한 가이드라인은 없다.

연구는 건물에 고강도 콘크리트를 사용하기 위한 내화 설계가이드라인을 발전시키고 기준이나 코드[11,12,13]와 연계하기 위하여 콘크리트 산업과 국제 연구기관이 협력하여 NRCC(National Research Council of Canada)에서 진행 중이다. 이 연구의 주요한 목적은 고강도 콘크리트 기둥의 거동을 이해하고 고강도 콘크리트 기둥의 내화 성능에 영향을 미치는 다양한 요소를 정량화하기 위한 것이다. 이러한 연구들의 결과에 근거한 예비 가이드라인은 고강도콘크리트 기둥의 폭발을 줄이

고 내화성능을 향상시키기 위하여 발전되어져 왔다. 이러한 가이드라인들을 이 글에 나타낸다.

## 2. 연구의 중요성

논문을 살펴보면 고강도콘크리트의 화재성능은 보통강도콘크리트와 다르며 화재시[1,2,6] 좋은 성능을 보이지 못함을 알 수 있다. 나아가, 화재시 콘크리트의 폭발현상은 고강도콘크리트의 낮은 투과성에 원인이 있다. 화재에 노출된 콘크리트의 폭발 현상은 실험실과 실제 화재조건[2,6,11] 모두에서 관찰하였다. 폭발은 화재시 콘크리트의 빠른 단면 손실을 가져오며, 콘크리트의 더 깊은 층을 화재에 노출시켜, 부재 내부와 철근으로의 열전달율을 증가시킨다.

폭발은 이론상으로 가열중 발생하는 증기압력이 원인이다[2,6,11]. 고강도콘크리트는 보통강도콘크리트에 비해 낮은 투과성을 지니고 있어 이와 같은 압력발생에 민감한 것으로 알려져 있다. 화재에 노출된 동안에 발생하는 매우 높은 수증기압력은 고강도 콘크리트의 높은 밀도 때문에 밖으로 배출되지 못하여, 이 압력은 종종 포화수증기압에 도달한다. 300°C에서 압력은 약 8MPa에 이른다. 이와 같은 내부압력은 고강도콘크리트가 지니는 인장강도 약 5MPa[2]를 상회하여 콘크리트가 견디지를 못한다. 고강도콘크리트의 내화성능을 예측하는

역주 1) 출처/Journal of Fire Protection Engineering, 2005년 5월, 저자/V.K.R. Kodur

역주 2) 국내에서 고강도콘크리트는 한국콘크리트학회에서 정한 압축강도 40MPa이상의 콘크리트를 말하며, 미국 ACI에서는 42MPa로 정하고 있다. 일본에서 폭발에 대한 검증을 요구하는 콘크리트의 압축강도는 60MPa로 각국의 강도값은 약간씩 차이가 있으며, 기술개발에 따라 강도기준이 상향조정되고 있음.

역주 3) 본 가이드라인은 프로그램의 결과를 종합 정리한 것으로 [ ]속의 번호는 프로그램내에서 발표된 각각의 연구결과로 본고 끝에 수록한 참고문헌 논문의 번호를 지칭함.

다양한 연구로부터 획득한 데이터를 보면 폭렬은 매우 많은 인자의 영향을 받으며 매우 복잡하다 [1,6,11].

초기의 많은 연구들은 폭렬의 메카니즘을 이해 하는데 중점을 두었으며 고강도 콘크리트의 폭렬 영향인자를 도출하고자 하였다. 이와 같은 연구에 근거하여, 폴리프로필렌섬유를 혼입하거나 또는 콘크리트에 내화피복과 같은 적절한 방법을 통해 폭렬을 최소화 하였다[1,6,11,13].

구조부재의 내화는 결합구조, 사용된 재료, 하중 강도와 화재노출시 자체의 특성에 달려있다. 고강도콘크리트부재의 내화성능은 폭렬의 범위 뿐만 아니라 콘크리트의 강도손실비율에도 영향을 받는다. 나아가, 외부 내화피복보다 고강도콘크리트의 부재의 설계 향상을 통해 요구하는 내화성능을 확보하는 것은 종합적인 구조 시스템에서 경제적인 면과 미관적인 면에서 유리하다.

이전 연구의 관점 중 대부분은 고강도콘크리트의 폭렬저감을 위한 시험에 제한되어 있었다 [2,4,6]. 이와 같은 시험은 소형시험체에 대한 제한적인 연구에 근거를 두고 있다[2,5,14]. 현재 연구의 관점은 고강도콘크리트 기둥의 종합적인 내화성능을 평가하는 것으로 폭렬의 범위 뿐만 아니라 화재시 고강도콘크리트 부재의 종합적인 거동에도 관계된다. 연구를 통해 얻은 데이터는 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬을 저감하고 내화성능을 향상시키기 위한 설계가이드라인을 발전시키는데 사용되었다.

### 3. 고강도 콘크리트 기둥에 대한 내화성능 연구

#### 3.1 실험적 연구

시험 프로그램은 여러개의 실험규모의 철근콘크리트 기둥에 대한 선행적인 내화시험으로 구성하였다. 시험은 기둥의 크기, 콘크리트 강도, 사용골재의 종류, 철근의 설치방법, 섬유보강, 섬유의 종류, 하중의 크기와 편심 등을 다양하게 포함하였다. 연구에서는 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 모두를 고려하였다. 모든 기둥은 3810mm 길이와 CSA 시방에 따라 디자인되었다[9]. 콘크리트의 28일 압축강도는 약 34MPa<sup>4)</sup> (보통강도 콘크리트의 표본)부터 약 110MPa(고강도 콘크리트의 표본)까지 다양하게 하였으며, 대부분 기둥은 80~100MPa의 범위에 포함되었다. 0.91mm 두께의 K타입 열전대를 기둥 단면에서 위치별 콘크리트 온도를 측정하기 위하여 기둥의 중간높이에 설치하였다.

기둥시험은 시험재하를 위하여 특별히 제작된 로에서 수행되었다. 시험로는 화재에 노출되었을 때의 온도, 구조적 하중, 열전달 등의 상태를 재현할 수 있도록 디자인되었다. 내화시험 도중, 기둥은 재하한 상태에서 ASTM E 119-2000[15]에 있는 온도시간곡선에 가능하면 가깝게 가열되도록 제어하였다. 로, 콘크리트와 철근의 온도 뿐만 아니라 수직변형과 비틀림도 기둥이 파괴되기 전까지 기록하였다.

시험 중, 기둥의 폭렬과 균열의 정도를 기록하기 위하여 시각적 관찰을 위한 특별한 배려가 이루어

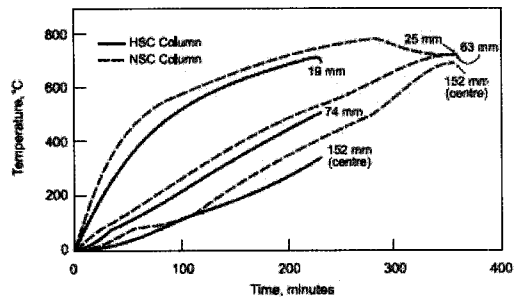
역주 4) 1MPa = 10.2kgf/cm<sup>2</sup>

졌다. 또한, 시험이 완료된 이후에 파괴패턴, 폭렬의 정도와 특성 및 철근(주근과 띠근)의 상태를 분석하기 위한 시험 후 관찰이 이루어졌다. 폭렬의 정도는 기둥마다 다르게 나타났으며 여러 가지 요소에 의존하였다.

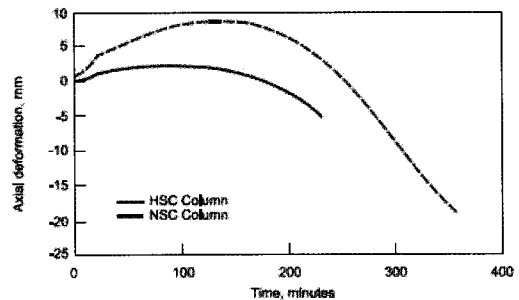
가열로, 콘크리트 철근의 온도, 시험중 기록된 기둥시험체의 수직변형 등 모든 시험결과는 참고 문헌[3,11,12,14]에 나타나 있다. 또한, 균열의 패턴과 폭렬의 정도를 포함하여 관찰된 세부사항은 다양한 논문[3,11,12,14]에 나타냈으며, 이러한 관찰의 일부는 다음의 장에서 다양한 요소의 영향을 정량화하는데 사용되었다. 두 번의 내화시험으로부터 얻어진 대표적인 결과는 다음 장에서 화재상황에서 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트의 성능비교를 나타내기 위하여 제시하였다.

### 3.2 고강도 콘크리트 기둥의 거동

보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 기둥과 관련한 내화시험으로부터 얻은 대표적인 결과는 [그림 1]과 [그림 2]와 같다. 콘크리트 강도를 제외하고, 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트는 유사한 특성을 가지며 하중레벨(등급)로 비교되어진다. 305mm 305mm의 사각형 단면에 길이 3,810mm인 기둥의 28일 압축강도는 보통콘크리트 기둥이 34MPa, 고강도 콘크리트기둥은 83MPa를 나타냈다. 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 기둥의 화재노출시간에 따른 단면온도의 변화를 [그림 1]에서 볼 수 있다. 화재시험 중 측정된 이 온도들은 기둥의 중간높이에서 표면부터 중심부까지의 다양한 깊이에서의 값을 보여주고 있다. [그림 1]에서는 화재에 노출되었을 때 고강도



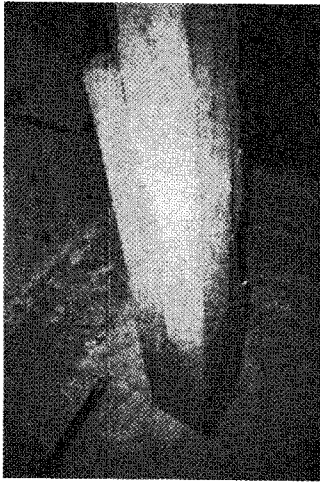
[그림 1] 보통강도와 고강도 콘크리트 기둥의 다양한 깊이별 온도분포



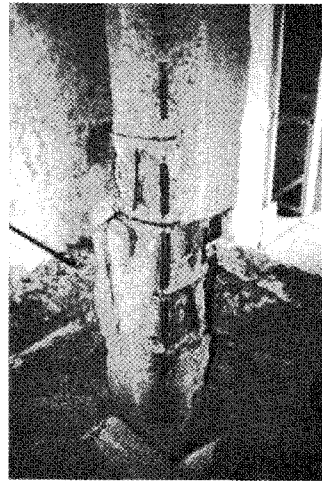
[그림 2] 보통강도와 고강도 콘크리트 기둥의 축방향 변형

콘크리트 기둥의 온도가 보통강도 콘크리트의 온도보다 일반적으로 낮음을 볼 수 있다. 이러한 추이는 두 콘크리트의 열적, 기계적인 차이에 의한 것으로 고강도 콘크리트의 높은 밀실성(낮은 공극)에 의한 것이다. 고강도 콘크리트의 낮은 공극은 콘크리트에 균열의 확대나 폭렬이 발생되기 전까지 온도상승의 비율에 영향을 미친다. 고강도 콘크리트 기둥에서 큰 균열은 대략 3시간 화재노출 이후 발생되었다.

보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 기둥의 시간에 따른 축방향 변형의 추이는 [그림 2]에서 비교하였다. 이 그림에서 고강도 콘크리트 기둥의 거동은 보통강도 콘크리트 기둥과는 다르다는 것을 알 수 있다. 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크



(a) 보통강도 콘크리트 기둥



(b) 고강도 콘크리트 기둥

[그림 3] 내화시험 후 보통강도 콘크리트 기둥과 고강도 콘크리트기둥의 폭렬비교

리트 기둥 모두 철근이 항복하기 전까지 팽창하고 그 후 수축하여 파괴에 이르게 된다. 기둥의 초기의 변형은 주로 콘크리트와 철근의 열적팽창에 기인한다. 고강도 콘크리트 기둥의 경우, 변형량은 보통강도 콘크리트 기둥에 비하여 현저히 작다. 이것은 고강도 콘크리트의 더 낮은 열적팽창과 고강도콘크리트의 높은 밀실성에 의하여 가열 초기에 온도의 상승이 늦기 때문이다. 기둥에서 철근의 온도가 상승함에 따라 점차 항복하게 될 때 기둥은 수축한다.

철근이 항복할 때, 콘크리트가 받는 하중의 비율은 점차 증가한다. 시간이 지남에 따라 콘크리트강도는 저하되며, 종국에는 기둥은 더 이상 하중을 지지하지 못하며 파괴에 이르게 된다. 이 장에서, 기둥의 거동은 콘크리트의 강도에 따라 다르게 나타난다. 보통강도 콘크리트 기둥은 많은 수축을 동반하며 점진적인 연성파괴를 나타낸다. 고강도 콘크리트 기둥에서의 수축은 훨씬 작다. 이것은 고강도 콘크리트가 온도가 올라감에 따라 부서지기 쉬워지

고 인장레벨은 모든 온도 및 하중 레벨에서 보통강도 콘크리트가 받는 것보다 낮기 때문으로 생각된다. 이는 온도의 상승에 따른 고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선에서 하강비율 부분에서 알 수 있다.

화재시험 도중 및 시험 후의 관찰에 근거하여, 고강도 콘크리트 기둥은 화재가 후반부로 진행됨에 따라 파괴에 이르기 전에 모서리에서 폭렬이 발생되었으며 반면, 보통강도 콘크리트 기둥에는 폭렬이 없었다. 폭렬의 결과로 가열 중 콘크리트가 탈락되며, 온도가 상승함에 따라 철근을 포함한 콘크리트의 더 깊은 층이 노출되었다. 고강도 콘크리트 기둥의 띠근은 화재후반부가 진행되는 동안 완전히 불에 노출되었다. 이 폭렬은 고강도 콘크리트의 낮은 투과성[1,11] 때문으로 기존 연구에서 실험실과 실제 화재조건하에서 고강도 콘크리트 구조부재를 대상으로 연구되어졌다[1,2,3]. [그림 3]은 내화시험 후의 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬을 나타낸 것으로, 고강도 콘크리

트 기둥의 폭렬이 보통강도 콘크리트 기둥보다 심하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 고강도 콘크리트 기둥에서 폭렬이 실제보다 심하지 않다는 것에 주목하여야 하며, 이는 폭렬을 최소화하기 위하여 띠철근을 사전에 설치(다음 장에 더 많은 설명 있음)한 것에 기인한다.

이 시험에서, 파괴에 이르는 시간을 기둥의 내화시간으로 정의하였다. 보통강도 콘크리트 기둥의 내화시간은 대략 366분 이었으며 반면, 고강도 콘크리트 기둥은 225분 이었다. 보통강도 콘크리트 기둥에 비하여 고강도 콘크리트 기둥의 내화시간의 감소는 고강도 콘크리트의 빠른 열적, 기계적 성능의 저하에 의한 것이다.

### 3.3 수치해석

실험연구의 주 목적은 건설현장에 즉시 사용할 수 있도록 내화데이터를 일반화하는 것이며, 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 계산하기 위한 일반적인 방법의 개발 및 정보를 제공하는 것이다. 수학적 모델은 고강도 콘크리트 기둥의 화재거동을 예측하기 위해 개발되어졌다[17,18]. 모델의 개발과 관련된 단계는 화재온도와 철근콘크리트 부재의 온도, 변형, 강도의 계산과 연관되어 있다. 단순화된 접근이 화재시 폭렬을 설명하기 위해 사용되어졌다.

모델은 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 결정하기 위한 다양한 인자의 영향을 설명할 수 있으며, 화재로 인해 초기의 재하 전부터 파괴에 이르기까지의 고강도 콘크리트 기둥의 반응을 추적할 수 있다. 모델의 타당성은 모델과 시험데이터의 비교를 통하여 정립되었다[17,18]. 모델은 고강도 콘

크리트 기둥의 내화데이터를 일반화하기 위하여 여러 가지 변수를 바꿔가며 수행되어졌다. 사전에 실시한 변수에 따른 연구결과는 고강도 콘크리트 기둥의 내화와 폭렬의 정도, 콘크리트 강도, 하중량, 철근의 배근, 골재의 종류, 화재의 강도 등을 포함하는 많은 수의 요소를 제시하였다.

## 4. 화재성능을 지배하는 요소(주요소)

NRCC와 세계 각국의 많은 기관 수행한 연구 [1,2,6]로부터 얻은 일반적이거나 폭렬에 관한 고강도 콘크리트의 화재성능을 보여주는 데이터는 복잡하고 많은 수의 인자의 영향을 받은 것이다. 모델예측(화재시험 도중 및 후의 시험데이터와 시각적 관찰)의 분석을 기초로 하여 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능에 영향을 미치는 몇가지 요소에 대하여 아래에 간략히 기술하였다.

### 4.1 콘크리트 강도

많은 수의 내화시험의 결과는 심지어 풀재하상태에서의 고강도 콘크리트 기둥은 높은 내화성능(3시간 또는 그 이상)을 지니고 있음을 보여주었다. 그러나, 보통강도 콘크리트 기둥과 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 비교하면 고강도 콘크리트 기둥이 낮은 내화성능을 지니고 있음이 나타났다[12,13]. 따라서, 고강도 콘크리트 기둥을 같은 형태의 보통강도 콘크리트 기둥과 동등한 내화성능을 지니게 하기 위해서는 CSA-A23.3[9]에서 나타내고 있는 더 많은 양의 철근을 사용하여 구속보장을 하여야 한다. 보통강도 콘크리트 기둥의 폭렬성능은 풀스케일 기둥 재하가열시험으로부터 관

찰된 [그림 3]에서 고강도 콘크리트 기둥과 비교되어진다[13]. 여기서 폭발현상이 고강도 콘크리트 기둥에 있어 매우 심각하다는 것을 볼 수 있다.

반면, 정확한 강도의 범위를 정한다는 것은 어려운 일이나, 유용한 정보에 근거하여, 콘크리트 강도가 70MPa<sup>5)</sup> 보다 높으면 폭발현상이 더 쉽게 발생하여 그 결과 내화성능이 저하될 수 있다.

#### 4.2 콘크리트 함수량

상대습도(R.H.)로 표현되는 함수량은 폭발의 정도에 영향을 미친다. 높은 상대습도는 더 큰 폭발을 나타낸다. 폴스케일 고강도 콘크리트 기둥의 내화시험은 상대습도가 80%를 넘을 때 심각한 폭발이 발생됨을 보여 왔다. 고강도 콘크리트 구조부재가 허용되는 상대습도(75%)이하로 낮아지는 데는 고강도 콘크리트의 낮은 투과성에 의해 보통강도 콘크리트에 비하여 더 많은 시간이 요구되어진다. 특수한 경우의(예를 들면 해변가의 건물) 상대습도는 건물의 수명내내 높은 상태를 유지하며 이와 같은 경우 설계 단계에서의 대책이 있어야 한다.

#### 4.3 콘크리트 밀도

콘크리트 밀도의 영향은 보통밀도(보통무게의 골재사용)와 경량(경량골재사용) 고강도 콘크리트 블록의 내화시험으로 연구되어졌다. 경량골재를 사용하였을 때 더 큰 폭발이 나타났다. 이것은 주로 경량골재가 더 많은 자유수분을 포함하고 있어, 화재시 더 높은 수증기압력을 발생시키기 때

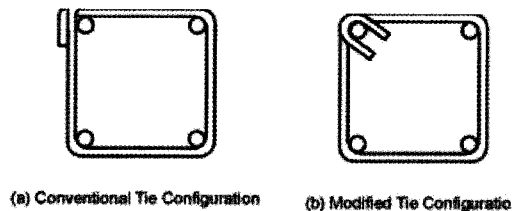
문이다.

#### 4.4 화재 강도

고강도 콘크리트의 폭발은 빠른 가열비율을 가진 심각한 화재 또는 높은 화재강도에서 더 많이 발생하였다. 탄화수소 화재는 이와 같은 이유로 심각한 피해를 남긴다. 고강도 콘크리트가 석유시추 구조물 또는 고속도로 터널과 같이 탄화수소 연료가 사용되는 곳에 시공되었을때 화재발생으로 인해 예측되는 폭발에 대하여 설계시 고려하여야 한다.

#### 4.5 시험체의 크기

논문을 고찰해보면 폭발적인 열적 폭발의 위험은 시험체의 크기에 의해 증가되는 것을 나타냈다. 이것은 시험체의 크기가 구조체를 통해 열과 습기를 전달하는데 직접적인 영향을 미치기 때문이며, 더 큰 구조체 일수록 더 큰 에너지를 저장할 수 있기 때문이다. 그러므로, 폭발문제를 평가함에 있어 시험체의 크기를 정할때는 주의 깊은 고려가 필요하다. 화재시험이 자주 작은 크기의 시험체로 이루어지는데 이때 잘못된 결과를 얻을 수도 있다. 그



[그림 4] 철근콘크리트 기둥에 설치되는 관습적인 결속방법과 수정된 결속방법

역주 5) 고강도콘크리트에서 발생하는 폭발현상을 관리함에 있어 기준이 되는 강도의 범위는 일본의 경우 60MPa로 정하고 있으며, 국내 시험의 결과 50MPa도 일부 화재안전상 문제를 일으킬 수 있는 것으로 보고되고 있어, 각국의 콘크리트용 재료, 제조기술, 배합설계 등에 따라 다양한 기준값이 나올 수 있음.



Conventional Tie Configuration



Modified Tie Configuration

[그림 5] 내화시험 후 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬 비교

리나, (다음장에서 제공하는 것 중의 하나와 같은) 폭렬저감방법이 적용되었을 경우, 큰 부재와 동일하게 폭발적인 폭렬의 위험성은 감소하고 내화성능은 증가하게 된다. 또한, 보통강도 콘크리트 기둥과 같이 고강도 콘크리트 기둥에서도 구조설계에 기초한 동일한 철근의 피복두께가 확보되어야 한다.

#### 4.6 띠철근보강

내화연구로부터 얻은 결과는 철근의 배치와 기둥의 구속이 고강도 콘크리트 기둥의 화재성능에 영향을 미친다는 것을 명확하게 보여주고 있다. 고강도 콘크리트 기둥에서의 개선된 철근 결속법(띠철근을 기둥의 중심방향으로 135° 꺾어서 설치하고 측면 철근의 양을 늘림)과 좁은 간격(보통강도 콘크리트 기둥의 0.75배 간격)의 배근은 더 높은 내화성능을 나타낸다. [그림 4]는 고강도 콘크리트 기둥의 전통적인 철근의 결속방법과 개선된 철근

의 결속방법을 보여주고 있다. cross tie(대각으로 교차하는 철근)의 사용 또한 내화성능을 향상시킨다. 이들 방법은 또한 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬의 정도를 최소화 한다.

[그림 5]는 전통적인 방법과 개선된 방법의 철근 배근을 실시한 기둥 시험체의 사진으로 내화시험 후의 모습이다. 띠철근을 설치한 기둥의 폭렬발생은 띠철근을 설치하지 않은 기둥과 비교하였을 때 상대적으로 작게 나타났다. 전통적으로 90°C로 철근을 결속한 기둥은 파괴에 이르는 동안 많은 비율의 콘크리트 단면 손실이 발생되었다. 135°C로 결속된 기둥은 파괴단면을 하나 또는 두개의 철근 간격에 국부적으로 제한함으로써 전형적인 삼각형 압축 파괴(콘크리트 파괴형상)를 방지한다.

#### 4.7 섬유 보강

연구들을 통해 폴리프로필렌 섬유(이후부터 PP 섬유)가 화재 하에서 고강도 콘크리트 부재의 폭렬



을 감소시킨다는 것을 알았다[5,6,11]. 이중 가장 타당한 이론 중의 하나는 PP섬유가 상대적으로 낮은 온도인 170℃에서 녹아 콘크리트 내부의 수증기 압력을 외부로 방출할 수 있는 통로를 만들어주고 이로 인해 폭발로 인한 작은 폭발을 막아준다는 것이다. 폭발을 방지하기 위한 PP섬유의 투입량은 용적비로 0.1~0.15%<sup>6)</sup>이다[5,13,19]. 강섬유의 첨가는 인장강도를 향상시키고 폭발을 줄여준다[13,19].

#### 4.8 하중 강도와 형태

하중의 형태(종류)와 그 강도는 폭발과 내화에 중요한 영향을 미친다. 기둥의 내화성능은 하중을 감소시킬수록 증가한다. 하중강도가 높아질수록 내화성능은 저하되는데 이는 온도가 올라감에 따른 강도의 저하는 보통강도 콘크리트에 비하여 고강도 콘크리트가 더 크기 때문이다. 재하된 고강도 콘크리트 구조부재는 재하하지 않은 부재보다 더 많은 폭발이 발생한다. 이것은 특히 전통적인 철근 배근을 한 기둥에서 잘 나타나며, 실재하중보다 더 큰 하중을 받게 한다. 이는 재하된 구조부재가 증가에 의한 공기압에 추가적으로 압력을 주기 때문이다. 나아가, 만약 하중이 편심(또는 휨)으로 작용할 때는 이것이 추가적인 인장응력을 발생하여 폭발의 발생은 더 커진다.

#### 4.9 골재의 종류<sup>7)</sup>

일반적으로 사용되는 두가지 골재 중 탄산염골재(주로 석회석)는 실리카질 골재(주로 석영)보다

콘크리트에서 더 높은 내화성능과 폭발 저항성능을 지닌다. 이것은 주로 탄산염 골재가 대체로 높은 열용량(비열)을 가지며, 이것이 폭발을 방지하는데 도움이 되기 때문이다. 이와 같은 비열의 증가는 탄산염 콘크리트에서 돌로마이트의 분해작용에 의한 것이다. 일반적으로 탄산염 골재로 만든 고강도 콘크리트 기둥이 실리카질 골재로 만든 고강도 콘크리트 기둥에 비하여 10%의 내화성능이 우수한 것으로 나타났다[11,12,13].

### 5. 화재성능을 향상시키기 위한 가이드라인

고강도 콘크리트는 많은 장점을 지닌 고성능의 재료이다. 최근 고강도 콘크리트 기둥의 화재시 거동과 폭발 및 내화성능에 영향을 미치는 인자의 정량화에 대한 중요한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 오늘날까지 고강도 콘크리트 구조부재의 내화설계를 위한 코드나 기준에 대한 특별한 가이드라인이 없다.

적절한 방법을 채용함으로써 콘크리트의 강도가 110MPa에 이르더라도 고강도 콘크리트의 폭발을 줄일 수 있으며 내화성능을 향상시킬 수 있다. NRCC와 다른 곳[4,5,6]들에서 수행된 이와 같은 세부적인 연구에 근거한 다음의 예비 가이드라인은 화재성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

- 구조부재의 크기는 내화성능에 영향을 미치며 현재 기준들은 보통강도 콘크리트 기둥에 대한 최소한의 단면크기를 규정하여 제시하고 있다.

역주 6) PP섬유의 혼입량은 콘크리트의 압축강도에 따라 달라지며, 혼입되는 PP섬유의 형태도 단섬유, 장섬유, 원형단면, 까치발형, 분말형 등 다양한 연구가 이루어져 있음.

역주 7) 국내 콘크리트용 골재의 대부분은 상대적으로 낮은 온도에서 분해되는 화강암 골재를 사용하고 있어, 화재안전 측면에서 매우 불리하며, 이에 따른 대책 마련이 요구됨.

고강도 콘크리트 기둥의 내화성능등급을 만족하기 위한 권고되는 최소한의 크기는(사각형 또는 원형 모두) 다음과 같다.

1시간	12인치
1.5시간	14인치
2시간	16인치
3시간 또는 이상	20인치

이와 같은 크기는 보통강도 콘크리트 기둥에 비하여 상대적으로 높은 값이다.

- 내화성능과 폭렬의 발생 정도는 기둥에 채용되는 철근의 배근방법에 영향을 받는다. 띠철근(철근이 기둥 중심을 향해 135° 굽혀서 설치 되었을 때)의 설치 폭렬을 감소시키는데 도움이 되고 내화성능의 향상시킨다. cross tie의 설치 또한 내화성능을 향상시킨다.
- 용적대비 0.1~0.15%의 폴리프로필렌 섬유 첨가는 배합은 폭렬을 감소시킨다.
- 강섬유를 첨가는 인장강도를 향상시키고 폭렬을 감소시킨다.
- 실리카질 골재를 대신한 탄산염 골재의 사용은 폭렬을 줄이고 내화성능을 향상시킨다.
- 고강도 콘크리트의 폭렬은 빠른 가열비율이나 높은 화재강도와 같은 화재특성에 의해 더욱 심하게 발생된다. 석유 시추구조물이나 고속도로 터널과 같이 탄화수소 연료를 사용하는 시설물에 고강도 콘크리트를 사용할 때 설계시 폭렬의 발생에 대한 것을 고려하여야 한다. 약 0.1~0.15% 폴리프로필렌 섬유 첨가는 폭렬현상을 많이 줄여준다.
- 철근에 대한 피복두께는 구조적인 고려를 한 기

준에 근거하여 충분하게 설치하도록 한다.

## 6. 요약

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 많은 장점을 지닌 고성능재료이다. 그러나, 보통강도 콘크리트에 비교하여 폭렬현상의 발생과 낮은 내화성능을 지니고 있다. 골재의 종류, 콘크리트 강도, 콘크리트 밀도, 하중강도, 화재강도와 철근의 배근방법은 고강도 콘크리트 기둥의 화재성능(폭렬과 내화성능)에 영향을 미친다. 섬유 보강이나 개선된 철근배근법 등의 사용과 같은 설계지침을 채택함으로써 고강도 콘크리트 부재의 폭렬은 상당부분 감소시킬 수 있으며 내화성능도 개선될 수 있다. 폴리프로필렌 섬유는 탄화수소 화재하에서의 고강도 콘크리트 폭렬을 감소시키는데 더욱 효과적이다. **FILK**

## [참고문헌]

1. Phan, L.T. "Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, pp. 105, 1996.
2. Diederichs, U.; Jumppanen, U.M., Schneider, U. "High Temperature Properties and Spalling Behaviour of HSC", Proceedings of 4th Weimar Workshop on HPC, HAB Weimar, Germany, pp. 219-235, 1995.

3. Kodur, V.R., Sultan, M.A. "Structural behaviour of high strength concrete columns exposed to fire" Proceedings: International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Vol. 4, 217-232, Sherbrooke, Quebec, 1998.
4. Danielsen, Ulf. "Marine Concrete Structures Exposed to Hydrocarbon Fires", Report, SINTEF The Norwegian Fire Research Institute, pp. 56-76, 1997.
5. Bilodeau, A., Malhotra, V.M. and Hoff, G.C. "Hydrocarbon Fire Resistance of High Strength Normal Weight and Light Weight Concrete Incorporating Polypropylene Fibres", International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke, QC, pp. 271-296, 1998.
6. Hertz K.D. "Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete", Fire Safety Journal 38 (2003) pp 103-116
7. National Research Council of Canada, National Building Code of Canada, Ottawa, ON, 1995.
8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete" (ACI 318-95), American Concrete Institute, Detroit, 1995.
9. Canadian Standards Association, Code for the Design of Concrete Structures for Buildings. CAN3-A23.3-M94, Rexdale, ON, 1994.
10. ACI Committee 216, "Standard Method for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies", American Concrete Institute, Detroit, 1997.
11. Kodur, V.K.R. "Spalling in HSC Exposed to Fire: Concerns, Causes, Critical parameters and Cures", Proceedings, ASCE Structures Congress, Philadelphia, PA, 2000.
12. Kodur, V.K.R. and McGrath, R., "Performance of High Strength Concrete Columns Under Severe Fire Conditions". Proceedings Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Vancouver, BC, Canada, pp. 254-268, 2001.
13. Kodur V.K.R.; Cheng F.P.; Wang T.C. "Effect of strength and fiber reinforcement on the fire resistance of high strength concrete columns", ASCE Journal of Structural Engineering, 129(2), pp. 253-259, 2003.
14. Ali, F.A., Nadjai, A., Glackin, P., Silcock, G., "Structural performance of high strength concrete columns in fire"; Proceedings of the Seventh International Association of Fire Safety Science Symposium (Worcester, MA., U.S.A.), pp. 1001-1012, 2002.
15. American Society for Testing and

Materials, Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials, ASTM E119-00, Philadelphia, PA, 2000.

16. Kodur, V.R.; McGrath, R.C. "Fire endurance of high strength concrete columns" Fire Technology Special Issue, Vol. 39: No. 1, 2003
17. Kodur, V.R.; Wang, T.C.; Cheng, F.P.; Sultan, M.A. "A Model for evaluating the fire resistance of high performance concrete columns" Proceedings of the Seventh International Association of Fire Safety Science Symposium (Worcester, MA, U.S.A.), pp. 1013-10124, 2002.
18. Kodur, V. R.; Wang T.C.; Cheng, F.P. "Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns", Cement and Concrete Composites Journal, 26, pp. 141-153, 2004.
19. Kodur, V.R. "Fibre-Reinforced Concrete for Enhancing the Structural Fire Resistance of Columns" Fibre- Structural Applications of Fibre-Reinforced Concrete, ACI SP-182, pp. 215-234, 1999.

