

# 대한건축학회의 구조내화설계 가이드라인에 관한 연구

## A Study on the Fire Resistance Design Guidelines for High-Strength Concrete Structures of AIK

권 영 진\*      신 이 철\*\*      이 재 영\*\*  
Kwon, Young-Jin    Shin, Yi-Chul    Lee, Jae-Young

### Abstract

It is the aim of this study to investigate the fire resistance design Guidelines for high-strength concrete structure for example compressive strength more than 40Mpa. It is well know that explosive spalling due to fire attack of high strength concrete is related to concrete failure.

so, the purpose of this study introduce the fire A Study on the Fire Resistance Design Guidelines for High-Strength Concrete Structures of AIK for the response of explosive spalling of high strength concrete.

키 워 드 : 내화설계 지침, 고강도 콘크리트, 폭발

Keywords : Fire Resistance Design Guidelines, High Strength Concrete, Explosive Spalling

### 1. 서 론

최근 세계적으로 구조물의 초고층화, 대형화의 추세에 발맞추어 국내에서도 60층 정도 규모의 초고층 구조물에 고강도 콘크리트가 활발히 적용되고 있다. 고강도콘크리트는 구조적 장점뿐만 아니라 내구성 및 사용성이 우수하기 때문에, 향후 그 사용량이 더욱 증가할 것으로 기대된다. 그러나 고강도콘크리트는 화재시 심각한 폭발(explosive spalling)이 발생하며, 이러한 폭발은 부재 파편의 비산뿐만 아니라 콘크리트 단면감소로 인한 내력의 감소, 철근의 직접 노출로 인한 휨내력 저하 등의 원인이 되며, 장시간 화재에 노출될 경우 붕괴로 까지 이어질 수 있음이 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다. 이러한 현상을 고려하여 선진외국에서는 기존의 연구성과를 토대로 고강도콘크리트에 대한 성능(Performance Based) 내화설계를 적용하거나 내화설계지침을 정립하고 있으나, 우리나라의 경우는 아직까지 관련법규 및 제도가 정비되지 않고 있는 등 성능위주의 내화 설계에는 상당히 미흡한 실정이다.

따라서 본 지침에서는 고강도콘크리트의 내화성능에 관한 기준이 마련되지 않은 국내 여건에서 그 동안 연구결과들을 정리하여 가급적 실무에서 실용적으로 활용할 수 있도록 폭발 저감방안을 제시하고자 하였다.

### 2. 콘크리트의 내화기준

#### 2.1 콘크리트 구조의 내화기준

내화구조는 화재로 인한 고열로부터 건축물의 붕괴를 방지하기 위해 주요부위를 불연 및 내화재료를 사용하여 성능을 발휘하도록 한 것으로 현행 국내 건축법에서는 일정용도 및 규모에 따라 건축물의 주요 구조부를 내화구조로 시공하도록 규정하고 있다.

일본은 2000년 건축기준법의 개정을 통하여 그림 1과 같이 내화구조의 사양적 적용에 대해 새로운 성능적 기준에 내화설계의 토대를 마련하였다. 내화구조물에 대한 내화성능의 평가는 기존의 사양적 방법에 의한 평가 법(경로) A와 내화성능 검증 법에 의한 평가 법 B, 심사에 의한 평가 법 C로 설정되어 있다.

미국의 내화관련 연구는 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)등의 실험·연구를 통해 이루어지며, 내화관련 규정이나 법규 등은 독자적인 기준 및 규격을 보유하고 있는 민간단체의 규정을 준용한다. 민간단체에서 제정된 대표적인 규정으로는 UBC (Uniform Building Code)와 NFC(National Fire Code)등이 있다.

영국의 내화구조 관련 법규는 정부에서 제정한 BR(The Building Regulations)이 있으며 1984년에 기존의 사양적 규정에서 벗어나 성능적 규정을 도입하였다. BR은 전체적인 화재안전이라는 측면에서 내화구조를 구성하고 있으며 (1)화

\* 정희원, 호서대학교 소방방재학과 교수 · 공박  
\*\* 정희원, 호서대학교 소방학과 초고층·장대터널 방재 연구실 석사과정

재안전공학, (2)화재확산구조, (3)화재발생시 대피수단, (4) 내화대상 건축물 및 내화성능 등과 연계되어 규정하고 있다.

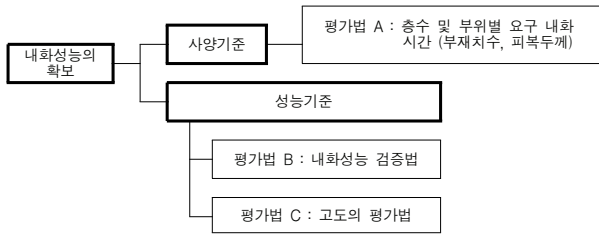


그림 1. 일본 내화성능의 평가법

## 2.2 콘크리트 구조의 내화 성능평가

내화구조에 관한 성능으로는 비손상성, 차열성, 차염성을 들 수 있다. 건물의 하중을 지지하는 주요 구조는 실내화재에 대해 비손상성이 요구되며, 외벽 및 칸막이벽의 경우도 내력벽인 경우 비손상성이 요구된다. 건물의 외피를 구성하는 부재 중 외벽과 지붕에는 실내화재에 대한 차염성이, 칸막이벽 및 바닥부재는 차열성이 요구되며 표1과 같다.

표 1. 국내 주요 구조부의 요구성능

소요성능	주요구조부						
	외벽	칸막이벽	기둥	보	바닥	계단	지붕
실내화재	비손상성	●	●	○	○	○	○
	차열성	○					○
	차염성		○			○	
실외화재	비손상성	●					
	차열성	○					

● 내력벽인 경우 필요

- (1) 비손상성(非損傷性) : 구조 내력상 지장이 있는 손상을 일으키지 않는 것.
- (2) 차열성 : 가열면 이외의 면의 온도가 가연물의 연소를 일으킬 우려가 있는 온도이상으로 상승하지 않는 것
- (3) 차염성 : 건축구조의 구획부재의 한쪽 면을 가열했을 경우 화염이나 열기가 그 부재를 하거나 또는 이면에 발염(發炎)이 생기지 않는 것

## 3. 고강도콘크리트의 내화특성

### 3.1 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 역학적 특성

고온에 노출된 고강도 콘크리트(HSC)의 압축강도, 인장강도 및 탄성계수 등은 온도가 높아짐에 따라 저하되며, 같은 일반강도 콘크리트(NSC)와는 상당한 차이가 있다. 이러한 차이는 그림2와 같이 100℃에서 400℃의 온도에서 가장 두드러지게 나타나며, 일반적으로 NSC는 300℃까지 가열될 경우 초기압축강도에 약 10~20% 정도, 600℃에서는 60~75% 정도의 강도저하가 일어난다. 반면, HSC의 경우 강도의 감소는 더욱 현저하여 450℃미만에서는 초기압축강도에 비하여 40% 정도 강도저하가 일어난다고 보고되고 있다.

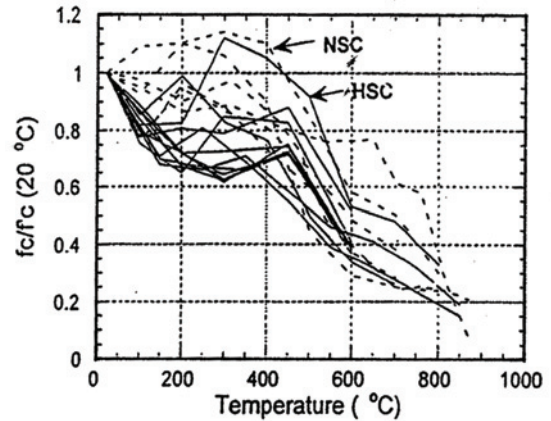


그림 2. 압축강도-온도관계(비재하조건)

일반적으로 HSC의 인장강도는 압축강도의 약 1/10~1/13 정도로 HSC와 NSC는 온도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 인장강도가 감소하는 경향을 보이며, 표준상태에서의 HSC의 인장강도는 약 4MPa 정도이며, NSC의 인장강도는 3MPa 정도의 수치를 나타내고 있고, 모든 온도에 걸쳐 HSC의 인장강도가 NSC보다 약 15% 정도 높은 수치를 나타낸다.

Phan은 콘크리트의 비재하실험(unstressed tests)을 통해 그림3과 같이 탄성계수와 온도와의 관계를 제안 하였다. 탄성계수는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고, HSC와 NSC가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

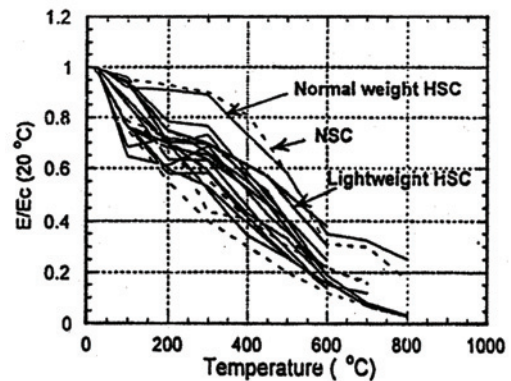


그림 3. 탄성계수-온도관계

고온에서 콘크리트의 응력-변형도 곡선은 고온에서 콘크리트의 변형모델을 설정하기위해 필요하며 카스틸로(1990)에 의해 제안된 NSC와 HSC에 대한 응력-변형도 관계는 그림4와 같다.

연구에 따르면 HSC 콘크리트의 응력-변형 곡선은 NSC에 비해 가파르게 최대 응력에 도달하고 있으며, 최대 응력 이후에 있어서도 가파른 하강을 보이고 있어 HSC의 취성적 특성을 보이고 있다. 또한 NSC에 비하여 최대 응력 이후에 잔존 에너지가 적기 때문에 더 쉽게 붕괴될 수 있다.

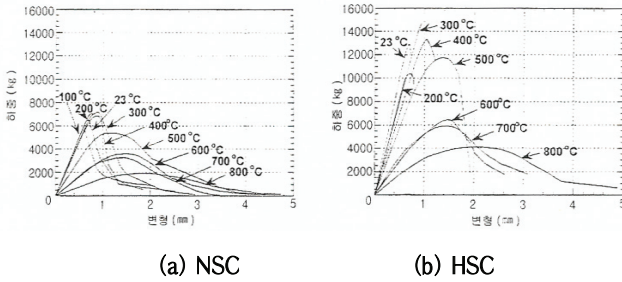


그림 4. 온도에 따른 하중-변형의 관계

### 3.2 고강도 콘크리트의 폭발

폭렬은 구조부재가 가열속도 20~30°C/분인 화재와 같은 고온조건이나 빠르게 증가하는 온도 조건에 노출되었을 때 부재 표면에서부터 일정 층이나 조각 등이 파괴되는 현상으로 화재 시 콘크리트 구조물에 손상을 입혀 화재 안전설계 계산 결과를 부정확하게 만들고 구조물의 안전도를 심각하게 저하하는 원인이 된다.

투수성이 낮은 고강도 콘크리트는 높은 인장강도에도 불구하고 일반강도 콘크리트에 비해 폭발이 발생되기 쉬워 그림5와 같이 가열되는 동안 더 높은 수증기압이 형성된다. 또한 고강도 콘크리트 표면 가까이에서 수증기압의 최대값이 발생하기 때문에 더 얇은 단면의 콘크리트가 화재 시 폭발에 더 취약함을 알 수 있다.

따라서 콘크리트의 폭발성 폭발의 기본 발생 원인을 이해하여 그에 따른 예측모델을 개발하고, 폭발성 폭발 방지 대책을 실제 현장 적용 시 비용과 효율성 측면에서 최적화하는 것이 매우 중요하다.

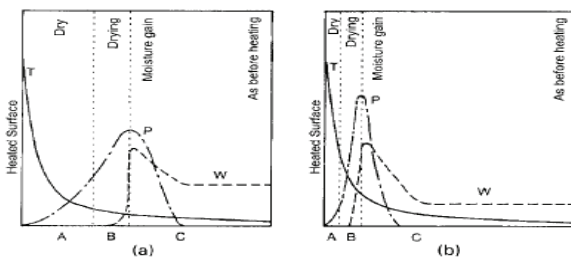


그림 5. 일면 가열된 일반강도(a)와 고강도 콘크리트(b)의 온도, 수증기압, 수분량 분포(Anderberg & Khoury)

### 3.3 고강도콘크리트의 비재하 내화시험(안)

일반적으로 고강도콘크리트 부재는 압축강도와 같은 기계적 성능이 크고 부재의 단면이 크게 설계되는 경향이 있으며, 국내의 실험조건상 시험장치의 용량 한계로 인하여 하중의 도입이 불가능한 경우가 많다. 그러므로 고강도콘크리트 부재의 내화시험 시 비재하 조건에서의 내화시험 방법을 도입할 필요가 있다고 할 수 있다. 따라서 본 지침에서는 국외 내화성능 시험 방법을 참고하여 표2에 비재하 내화성능시험 방법(안)

을 제시하였다.

표 2. 고강도콘크리트 부재의 비재하 내화성능 방법(안)

구분	고강도콘크리트 부재의 내화성능 시험(안)
벽	<ul style="list-style-type: none"> <li>최외곽 강재(철근)에서 측정된 강재의 평균온도</li> </ul>
기둥	<ul style="list-style-type: none"> <li>평균 &lt; 550°C</li> <li>최고 &lt; 650°C</li> </ul>

## 4. 고온을 받는 고강도 콘크리트 해석

고온을 받는 보통강도 콘크리트의 해석은 온도에 따른 재료의 열적특성 변화를 고려하여 열역학 방정식을 이용하여 부재 내부의 온도분포 상태를 구하는 온도해석과 재료의 온도에 따른 역학적 특성변화를 이용하여 부재의 응력상태, 잔존강도 및 구조적 거동을 규명하는 열응력해석(thermal-stress analysis) 및 고온에서 콘크리트 내부 수분이 기화현상에 의해 수증기로 변환되는 상변화를 고려하여 수증기 압력을 산출하는 수분이동 해석(hygro-transfer analysis)이 연구되어 왔다. 고온을 받는 고강도 콘크리트의 폭발해석은 수분이동 해석과 더불어 콘크리트 피복의 박리여부까지 판정하는 매우 복잡하고 어려운 해석과정을 거쳐야 한다. 보통강도 콘크리트의 화재시 거동은 폭발현상이 고강도 콘크리트와 같이 크게 나타나지 않고 있어 열응력해석을 통한 부재거동 및 잔존내력 평가로도 충분하다. 그러나 일반적으로 40MPa 이상의 고강도 콘크리트에서는 고온에서 폭발현상이 발생하므로 질량이 동해석과 더불어 폭발해석이 중요하다.

### 4.1 열응력 해석

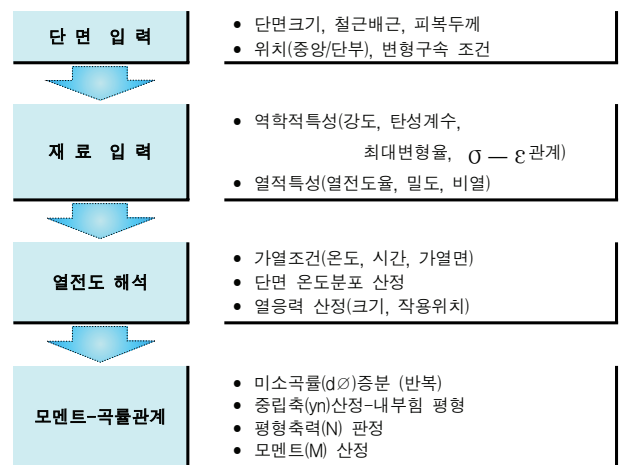


그림 6. 열응력 해석순서

그림6에 나타난 열응력 해석의 개요는 고온 시험 부재의

모멘트-곡률관계를 구하기위해서 단면의 위치, 치수, 배근형태, 지지조건과 사용된 콘크리트와 철근의 강도와 재료모델, 열적특성을 입력한다. 가열조건(수열면, 가열온도, 가열시간)에 따라 열전도 해석을 수행하여 단면의 온도분포를 산정한다. 이때 변형구속의 조건에 따라 열응력을 고려하며, 곡률 증분에 대한 중립축위치를 가정하여 그때의 모멘트를 산정한다.

#### 4.2 폭렬 해석

고온 시 콘크리트의 폭렬현상을 정밀하게 해석하기 위하여 질량이동 해석을 통한 수증기압의 산출 뿐 만 아니라 이에 저항하는 콘크리트의 인장 및 전단강도도 함께 고려하여야 한다. 이를 위하여 콘크리트의 함수량, 열적특성, 수밀성, 가열조건 등 매우복잡하고 다양한 정보가 주어져야 할 뿐만 아니라 해석과정도 열전달방정식, 평형방정식의 적용과 수분의 상변화 등도 함께 고려하여야 한다.

### 5. 고강도 콘크리트 부재의 내화설계

국내 기준에는 화재에 대한 내화 기준이 피복의 두께에 대한 기준은 있으나 화재 시 구조 부재의 설계에 대한 기준이 없어 구조 부재의 안전성에 대한 검토가 불가능하다.

미국의 내화설계 기준을 살펴보면 고온에서 재료의 특성 변화, 열적 해석, 역학적 해석을 통하여 콘크리트 휨 부재 및 기둥의 내화성능을 평가하고 있으며 유럽의 경우는 부재의 구조 해석 또는 간편화된 부재 계산법 및 표를 이용한 계산을 통하여 내화성능을 평가하고 있다.

고강도 콘크리트를 이용한 부재의 내화 설계의 대표적인 두 기준은 각각 장단점이 있으나 우리나라에 적용을 위해 보다 고온에서의 재료 거동에 대해 많이 고려하고, 적용하기가 간편한 유럽기준을 추천한다. 이 기준에 의해 기둥 부재를 설계할 때 폭렬이 발생하지 않은 상태를 전제로 하므로 폭렬을 방지할 수 있는 공법을 사용해야 한다.

표 3. 고강도콘크리트에 폭렬을 억제하기 위한 대책의 특징 비교

항 목	표층부의 온도상승·온도구배 저감	수증기압 저감, 수분이동 용이	폭렬억제형 피복콘크리트 이용	폭렬에 의한 콘크리트 비산방지
공 법	• 내화재를 구조재의 표면에 피복하여 내부의 온도상승을 제어하는 공법	• 콘크리트에 함성섬유 등을 첨가하여 콘크리트 자체의 폭렬(비산)을 방지하는 공법	• 코어부분은 고강도콘크리트를 사용하고 피복부분만을 폭렬이 발생하지 않는 동일 강도급의 재료로 치환하는 공법	• 강판이나 와이에 메쉬 등을 콘크리트 표면에 설치하여 비산을 방지하는 공법
세부 공법분류	• 내화보드 • 내화모르터	• 함성섬유 혼입	• 압출성형 영구거푸집 이용	• 와이어 메쉬보강
적 용	• 전구조물 적용가능	• 콘크리트 구조물	• 콘크리트 구조물	• 콘크리트 구조물
화재 시 성능	낙하	• 균열, 박락 낙하 등이 발생하지 않도록 적절한 부착에 관한 검토 필요	• 특별한 문제 없음	• 와이어메쉬 충전용 모르터의 부착성능에 관한 검토 필요
	폭렬	• 방지가능	• 폭렬억제에 관한 실험적 검증 필요	• 폭렬억제에 관한 실험적 검증 필요
	내려져 하	• 허용온도 내 제어가능	• 열적영향을 고려한 실험적 검증 필요	• 열적영향을 고려한 실험적 검증 필요
열변형	• 적음	• 상대적으로 크므로, 구조안전성 검토가 필요	• 적음	• 상대적으로 크므로, 구조안전성 검토가 필요
화재 후 성능	영향도, 손상진단	• 화재 후 본 부재는 열에 의한 영향이 적으므로 내화재의 손상에 대한 검토만 필요	• 손상부위에 대한 내구성 유지, 보수성능을 포함한 검토가 필요. 또한 열손상에 대한 손상진단이 필요	• 화재 후 본 부재는 열에 의한 영향이 적으므로 내화재의 손상에 대한 검토만 필요
상시 성능	• 낙하지 않도록 적절한 설계가 필요 • 장기적인 내구성관점에서 적절한 재료의 선택이 필요	• 특별한 문제 없음	• 특별한 문제 없음	• 장기적인 내구성관점에서 적절한 재료의 선택이 필요
시공시 성능	• 내화재료 설치 공사의 공기 및 공정 필요	• 콘크리트 타설 중의 워커빌리티 확보가 필요	• 부분복합화 공법 적용시 최적화	• 내화재료 설치 공사의 공기 및 공정 필요
유지관리성능	• 구조부재의 점검시 함께 검토	• 통상의 콘크리트 유지관리시 검토	• 통상의 콘크리트 유지관리시 검토	• 구조부재의 점검시 함께 검토
종합검토	• 구조부재의 온도제어를 통한 폭렬대책으로 가장 우수한 대책이지만, 공사비의 증가 및 추가공정이 필요	• 콘크리트의 폭렬을 제어할수 있으나 섬유 혼입으로 인한 시공성능이 저하되어, 시공시 품질관리의 어려움	• 구조부재의 온도제어를 통한 폭렬대책으로 가장 우수한 방법	• 기본적으로 폭렬을 억제·방지하기 보다는 폭렬의 비산을 방지하는 개념의 내폭렬대책임



## 6. 고강도 콘크리트 폭렬 저감방안

화재 시 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트와 마찬가지로 구조물이나 구조부재에 심각한 폭렬(explosive spalling)이 발생하지 않아야 하며, 화재 중 또는 화재 이후에도 철근과의 일체성을 확보해야 한다. 또한 철근콘크리트는 기본적으로 콘크리트와 철근의 일체구조를 이루기 위하여 부착, 정착, 이음 길이 등과 같은 구조상세가 규정되어 있기 때문에, 화재 시 이러한 구조상세가 피해를 입지 않도록 표면피복의 폭렬이나 균열, 박리박락 등의 단면손실에 관해서도 이를 억제 또는 저감할 필요가 있다. 지금까지 고강도 콘크리트의 폭렬 저감 대책에 대한 많은 연구가 국내외에서 진행되었으며, 기준에서도 이를 채용하고 있다. 일반적으로 현재 고강도 콘크리트의 심각한 폭렬을 저감 또는 억제하는 메커니즘 및 대책으로는 폭렬 억제 메커니즘인 표층부의 온도상승-온도구배 저감 방안, 수증기압 저감, 수분이동을 용이하게 하는 방안, 폭렬억제형 피복콘크리트 이용방안, 폭렬에 의한 콘크리트의 비산을 방지하는 방안 등에 대한 특성을 비교분석하여 표3에 나타내었다.

## 7. 결 론

초고층건축물이 증가함에 따라 고강도콘크리트의 사용량이 증가하는 추세이다. 고강도콘크리트는 내구성 및 사용성이 우수한 장점을 가지고 있는 반면 화재시 심각한 폭렬현상을 발생시켜 콘크리트 내력 감소 및 철근의 노출로 인해 건물이 붕괴까지 이르게 되는 원인이 된다. 따라서 고강도콘크리트의 내화특성을 고려한 해석(열응력, 질량이동, 폭렬)과정을 거쳐 폭렬 저감방안을 모색하여야 한다.

이러한 폭렬 저감방안은 표층부의 온도상승-온도구배 저감 방안, 수증기압 저감/수분이동을 용이하게 하는 방안, 폭렬억제형 피복콘크리트 이용방안, 폭렬에 의한 콘크리트의 비산을 방지하는 방안 등이 있으며 각 방안들은 장단점을 내포하고 있어 상황에 따라 탄력적으로 적용하여야 하며, 향후 고강도 콘크리트의 역학적 성상을 고려하여 단점을 보완하고 추가적인 대책을 수립할 수 있도록 많은 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 권영진, 김무환, 김용로, 장재봉, 화재피해를 입은 콘크리트의 공학적특성에 관한 실험적 연구 대한건축학회 논문집(구조계), v.21 n.1, 2005. 01
2. 대한건축학회, KBC-S 고강도콘크리트 구조내화설계 지침서(안), 2007.

3. Euro code 2 : Design of concrete structures, Part 1-2: General rules-Structural fire design.