

고강도 콘크리트 기둥의 내화설계 가이드라인 ¹⁾

(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 고강도콘크리트²⁾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

조사연구 >> 고강도 콘크리트 기둥의 내화설계 가이드라인

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 실대규모의 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 34MPa⁴⁾ (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/cm²

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 구속 보장을 하여야 한다. 보통강도 콘크리트 기둥의 폭렬성능은 폴스케일 기둥 재하가열시험으로부터 관



Conventional Tie Configuration



Modified Tie Configuration

[그림 5] 내화시험 후 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬 비교

러나, (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

조사연구 >> 고강도 콘크리트 기둥의 내화설계 가이드라인

을 감소시킨다는 것을 알았다[5,6,11]. 이중 가장 타당한 이론 중의 하나는 PP섬유가 상대적으로 낮은 온도인 170°C에서 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%⁶⁾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 증기에 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 종류⁷⁾

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 발생정도는 기둥에 채용되는 철근의 배근방법에 영향을 받는다. 띠철근(철근이 기둥 중심을 향해 135° 굽혀서 설치 되었을 때)의 설치는 폭렬을 감소시키는데 도움이 되고 내화성능의 향상시킨다. cross tie의 설치 또한 내화성능을 향상시킨다.
- 용적대비 0.1~0.15%의 폴리프로필렌 섬유는 첨가한 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% 폴리프로필렌섬유의 첨가는 폭렬현상을 많이 줄여준다.
- 철근에 대한 피복두께는 구조적인 고려를 한 기

준에 근거하여 충분히 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.

