

초고층 구조물을 위한 특수 콘크리트

Advanced concrete for Skyscraper

조윤구 *

Cho, Yun Gu

요 약

본 논문에서는 전 세계적인 추세인 초고층 구조물의 건설에 필수적인 특수 콘크리트에 대하여 알아보고자 한다. 초고층 구조물에 사용되는 특수 콘크리트를 크게 초고강도 콘크리트, 저발열 콘크리트, 내화 콘크리트 그리고 방폭 콘크리트로 나누고 각각의 필요성, 원리, 적용사례 등을 기술하였다. 본문 뒷부분에서는 현대건설에서 개발하고 있는 특수 콘크리트 기술에 대하여 정리하고 특수 콘크리트의 향후 방향에 대하여 언급하였다.

키워드 : 초고층, 특수 콘크리트, 초고강도, 초저발열, 내화, 방폭

1. 서론

초고층 구조물은 한 나라의 랜드마크로 건설기술에 대한 과시뿐만 아니라 경제 활력에 박차를 가해주는 역할을 한다. 1930년 초반 대공황의 와중에 건설된 뉴욕의 엠파이어스테이트 빌딩, 1970년대 중반 한국의 경제발전을 예고한 서울 여의도의 63빌딩, IMF의 위기를 헤쳐나온 말레이시아의 페트로나스 타워와 타이완의 타이페이 101 등이 대표적인 예이다.

최근 초고층 구조물에 있어서 국내의 동향을 살펴보면 지상 107층(높이 464.5m) 높이의 부산 제2롯데월드, 지상 151층(높이 560m) 높이의 세계에서 두 번째 높은 건물이 될 인천송도 151타워 등 국내에서도 전 세계에서 10위 안에 드는 초고층 프로젝트들이 시행되고 있다.

최근 국내에서의 초고층 프로젝트들에 의해 각계각층의 연구기관에서 특수 콘크리트 성능에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초고층 구조물의 필수 요소기술인 특수 콘크리트 기술은 크게 다음의 네 가지가 있다.

- ① 초고강도 콘크리트
- ② 저발열 콘크리트
- ③ 내화 콘크리트

④ 방폭 콘크리트

본고에서는 특수 콘크리트 기술에 대해 살펴보고 현재 현대건설에서 보유하고 있는 콘크리트 기술에 대해 알아보기로 한다.

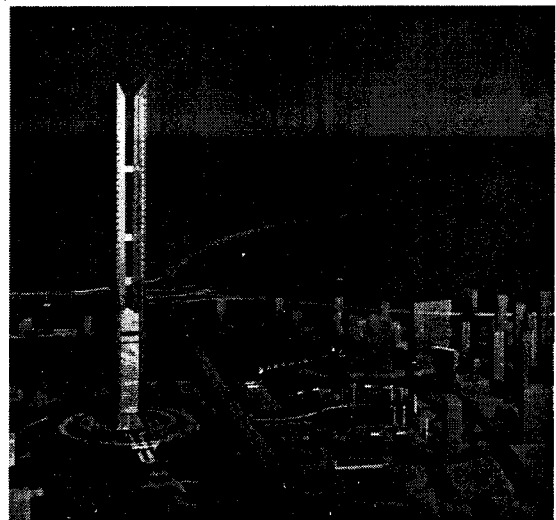


그림 2 송도 151 타워 조감도

* 현대건설 기술연구소 / 재료팀장 / 차장, ilscyk@hdec.co.kr

2. 특수콘크리트 기술

2.1. 초고강도 콘크리트

구조물의 높이가 증가할수록 저층부의 기둥이 받는 하중은 증가하게 된다. 그렇기 때문에 초고층 구조물의 저층부는 기둥의 단면을 증가시키거나 고강도 콘크리트를 사용하여 저층부의 내하력을 증가시켜야 한다. 이때 기둥의 단면을 증가시키는 방법은 저층부 내부 공간의 비효율적 설계를 유발하게 되므로 고강도 콘크리트를 사용하여 내하력을 증가시켜 주는 것이 효과적이다. 따라서 초고강도 콘크리트의 개발은 초고층 콘크리트 구조물이 가능케 하는 가장 핵심적인 기술이다.

콘크리트에 하중이 작용할 때 천이구역에서부터 파괴가 시작된다. 초고강도 콘크리트가 가능하기 위해서는 콘크리트의 구조적 약점인 천이구역에 대한 제어기술이 필수적이다.

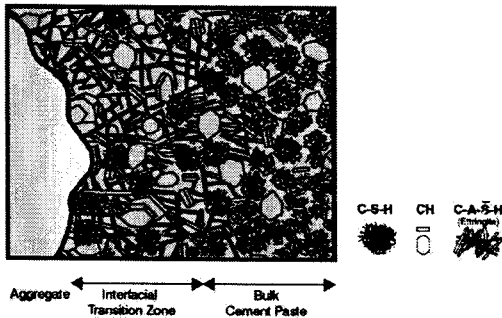


그림 3 천이구역(Interfacial Transition Zone)

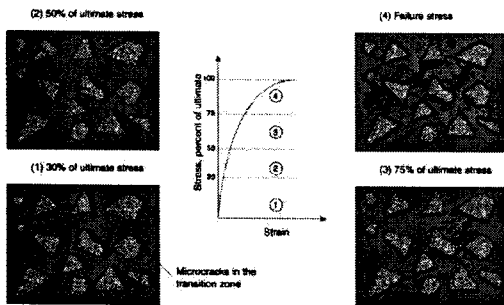


그림 4 하중 증가에 따른 콘크리트 파괴과정

최근 국내외에서는 초고강도 콘크리트의 강도 경쟁이 활발히 이루어지고 있다.

다음은 초고강도 콘크리트의 현장적용 사례 들이다.

표 1 초고강도 콘크리트 사용 사례

년도	구조물	건설사	강도(MPa)
2005	황학동 아파트	롯데건설/삼표	120 MPa
2005	건대스타시티	금호건설/성신	130 MPa
2006	목동 트라펠리스	삼성불산/아시아	150 MPa
2007	울산 이안 태화강 엑소디움 주상복합	포스코/대우자관	150 MPa
2007	화성-동탄 메타폴리스 주상복합	포스코/쌍용	200 MPa

2.2. 저발열 콘크리트

저발열 콘크리트는 고속도로, 공항, 고속철도, 대규모 해양 구조물, 지하공간 구조물, 항만 구조물, 고층 아파트 및 빌딩 등 대형 콘크리트 구조물의 시공시 반드시 필요한 핵심기술이다. 특히 고층 구조물의 경우 구조물의 높이가 높아질수록 기초의 크기가 대형이 되는 것은 필수적이다. 대규모 콘크리트 시공을 위해서는 짧은 기간 안에 많은 양의 콘크리트를 타설하게 되므로 수화열의 발생이 필연적이다. 이 경우 콘크리트의 내부구속에 의해 과도한 열응력이 발생하여 초기 시공 단계에서 수화열로 인한 심각한 균열이 유발된다. 그러므로 초고층 구조물은 대규모의 콘크리트의 타설로 인한 수화열과 그로인한 균열발생 문제를 항상 주의할 필요를 가지고 관리해야 한다.

일반적으로 수화열 발생을 저감하기 위한 방법은 크게 저발열 배합, 분할타설, 프리쿨링, 파이프쿨링 등이 있다. 이 방법들은 실제 대형 구조물에 사용하는 것들이지만 저발열 배합을 사용함으로써 인한 비용의 증가, 분할타설로 인한 공사기간의 증가, 프리쿨링 설비에 대한 투자, 파이프쿨링시 별도의 파이프 매설과 설비의 투입으로 인한 공사비 증가 등 문제를 내포하고 더욱이 수화열 발생에 대한 근본적인 대안이 되지 못한다.

수화열 발생을 근본적으로 저감하기 위해서는 시멘트의 성분조성의 변화를 통해 경화과정에서 발생하는 발열량을 줄여야 한다. 최근 이러한 노력의 일환으로 삼성분계 또는 사성분계 시멘트를 사용한 콘크리트의 사용이 대형구조물에 적용되는 사례가 적지않게 보고되고 있다.

2.3. 내화 콘크리트

최근 고층건물의 수요가 증가함에 따라 고강도 콘크리트의 사용이 많아지고 있다. 고강도 콘크리트는 시멘트 페이스트의 치밀한 구조 때문에 보통 일반 강도 콘크리트에 비하여 물리적 성질과 내구성에 있어서 우수한 성질을 갖는다. 하지만 화재가 발생할 경우는 시멘트 페이스트의 치밀한 구조가 고강도 콘크리트의 성능저하에 치명적인 문제로 작용한다.

보통강도의 콘크리트는 일반적으로 화재에 강한 재료로 인식되어 왔다. 기둥은 작은 지름이 250mm이상, 보는 철근콘크리트조로만 이루어지면 모두 3시간 내화구조로

인정되었다. 보통 강도의 콘크리트는 화재가 발생했을 때 내부의 수분이 콘크리트의 공극을 통해 이동해서 폭열이 방지되지만 콘크리트의 강도가 고강도이면 시멘트 페이스트의 구조가 치밀하기 때문에 내부의 수증기가 콘크리트 밖으로 빠져나가지 못해 콘크리트에 수증기압으로 작용하고 그로 인해 폭열현상이 나타난다. 폭열이 발생한 콘크리트는 부재 단면손실과 주철근의 파괴로 인한 내력저하로 인해 급격한 내화성능 저하가 발생하여 전체 구조물에 안전에 문제가 된다.

이에 국토해양부에서는 2008년 7월21일 국토해양부고시 제2008-334호[고강도콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준]를 고시하여 고강도 콘크리트에 대한 안전성을 확보하기 위한 제도적 조치를 취하였다. 국토해양부고시 이후 50MPa 이상의 콘크리트를 사용한 기둥·보는 내화성능에 대한 인증을 받아야 한다.

표 2 국토해양부고시 제2008-334호의 주요 내용

구분	설명
대상	실계기준강도50MPa 이상 기둥, 보
시험체	현장과 동일한 재료, 공법, 철근배근, 피복두께, 내화성능 확보를 위한 재료 및 공법을 포함.
기준	주철근의 온도 평균 538℃, 최고 649℃ 이하

2.4. 방폭 콘크리트

초고층 건축물은 단순히 건설 기술이 뛰어나다는 것을 상징하는 것이 아니라 한 국가의 위상을 상징하는 구조물이다. 그러한 상징 때문에 초고층 구조물은 반정부주의자들의 테러 표적이 되기 쉽다. 대표적인 예로 2001년 9월 11일 뉴욕에서 발생한 세계무역회관에 대한 비행기 테러는 그동안 극한의 폭발에 대한 영향을 고려하지 않았던 민간 토목, 건축 구조물에 대해서도 폭발과 같은 극한의 하중에 대한 연구의 필요성을 불러일으키는 계기가 되었다. 911테러를 계기로 오늘날 미국에서는 정부산하기구나 민간건물 소유자들은 잠재적인 폭발에 대한 위험에 대비할 수 있도록 건물을 신축하거나 보강하도록 지시하고 있다.

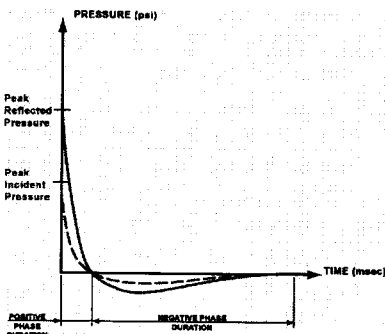


그림 5 Air blast pressure time history [Adopted from FEMA 427]

폭발하중은 짧은 시간(수천분의 1초)동안 빛, 열, 소리, 충격과 등의 형태로 매우 많은 양의 에너지를 방출하는 현상을 말한다. 폭발에 의한 피해는 국부적인 구조물의 파괴로 인해 전체 구조물의 안전성에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 그러므로 폭발 등으로 인한 테러의 위협이 있는 중요 건축물에 사용하는 콘크리트는

방폭 성능이 뛰어난 재료를 사용하는 것이 요구된다.

방폭 구조물의 대한 연구가 해외에서는 활발하게 진행되는 것에 반해 국내에서는 방폭 구조물에 대한 연구 사례가 극히 드물다. 또한 방폭 구조물에 대한 연구는 국가안보 및 군사보안과 밀접한 관련이 있는 특수한 성격의 것이라 국내외적으로 관련 연구나 방폭 재료 등에 대한 정보가 극히 제한적으로 공개되어있다. 따라서 국내에서도 군사시설 뿐 아니라 사회기반 시설물에 대한 독자적인 방폭 콘크리트에 대한 기술을 구축할 필요성이 있다.

3. 연구개발 현황

위에서 언급한 기술들에 대해 현대건설이 연구 개발하고 있는 기술들에 대해 소개를 하고자 한다.

3.1. 초고강도 콘크리트

콘크리트의 가장 중요한 성분인 시멘트는 시멘트 자체의 화학조성을 조절하고 바인더 성분의 조합을 통해 초고강도용 프리믹스 시멘트를 만들어낸다.

강도와 물-시멘트 비는 서로 반비례하는 관계를 갖는다. 초고강도 콘크리트의 경우 물-시멘트 비가 0.15~0.2사이의 값을 갖게 되므로 맞춤형 고성능혼화제의 사용이 필수적이다. 강도와 재료의 성분이 변하는 것에 따라 그에 맞는 혼화제의 사용이 요구된다.

콘크리트에서 가장 큰 부피를 차지하는 부분인 굵은 골재의 강도는 초고강도 콘크리트에서 중요한 변수이다. 골재의 각형이 양호하고 양질의 입도를 가지는 골재를 선별하고 확보하는 것은 초고강도 콘크리트에서 필수적인 과정이다.

다음 제시되어있는 표는 초고강도 콘크리트용 재료와 배합비에 관련된 사항을 정리한 것이다.

표 3 초고강도 콘크리트용 재료

사용재료	설명
시멘트	프리믹스 시멘트 성신양회(주)
잔골재	세척사
굵은골재	부순골재(19mm)
고성능혼화제	(주)원플로우

표 4 초고강도 콘크리트 배합량

성분	혼입량
물-시멘트 비	< 0.2
바인더 (C+SP+SF)	< 1300 kg
물	< 140 kg
잔골재	< 450 kg
굵은골재	< 700 kg
고성능혼화제	1 ~ 3 %

위와 같은 노력을 통해 현대건설에서는 2007년 2월 설계강도 200MPa를 상회하는 콘크리트를 개발하는데 성공하였고 같은 해 4월에는 mock-up 실험을 통해 현장 적용성을 검증하였다. 다음 표는 초고강도 콘크리트의 물성 실험 결과를 정리한 것이다.

표 5 초고강도 콘크리트의 물리적 성질

구분	범위
밀도	2460 ~ 2480 kg/m ³
강도	200 ~ 233 MPa
탄성계수	50 ~ 53 GPa
포아송비	0.21 ~ 0.22
인장강도	10 ~ 12 MPa



그림 6 압축 강도실험

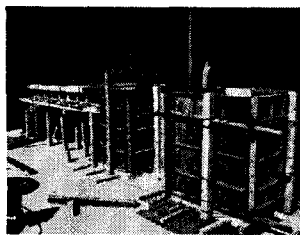


그림 7 mock-up 시험

3.2. 초저발열 콘크리트

초고강도 콘크리트와 마찬가지로 시멘트 자체의 화학 조성을 조절하고 바인더 성분의 조합을 통해 초저발열 콘크리트용 프리믹스 시멘트를 만들어낸다. 물-시멘트 비는 0.3 ~ 0.5 사이의 값을 갖게 되는데 콘크리트의 저발열 특성을 제대로 발휘하기 위해서는 혼화재의 사용이 요구되어 맞춤형 혼화제를 사용하여 초저발열 콘크리트의 성능을 개선하였다. 또한 굵은골재와 잔골재는 일반적인 콘크리트에 사용하는 부순골재와 해사를 사용하여 레미콘의 생산가격에는 큰 변화 없이 생산을 가능하게 하였다.

다음 제시되어있는 표는 초저발열 콘크리트용 재료와 배합비에 관련된 사항을 정리한 것이다.

표 6 초저발열 콘크리트용 재료

사용재료	설명
시멘트	프리믹스 시멘트 성신양회(주)
잔골재	해사
굵은골재	부순골재(25mm)
고성능혼화제	(주)원플로우

표 7 초저발열 콘크리트 배합량

구분	
설계강도	30 ~ 50 MPa
물/결합재	0.3 ~ 0.5
물	< 160 kg
감수제	< 1.2 %
슬럼프	180 mm
공기량	4 %

초저발열 콘크리트는 콘크리트 구조물의 중심부에서 수화열로 인한 온도 증가가 20℃ 수준 정도로 지금까지 국내에서 개발된 저발열 콘크리트의 온도 증가분 35~40℃에 비해 획기적인 온도 저감을 실현하였다.

초저발열 콘크리트를 사용하면 수화열로 인해 발생하는 온도균열이 거의 발생하지 않아 구조물의 내력, 수밀성 및 미관 등과 특히 장기적인 내구성능이 우수하여 경제적이고 안전한 구조물 건설이 가능해진다.

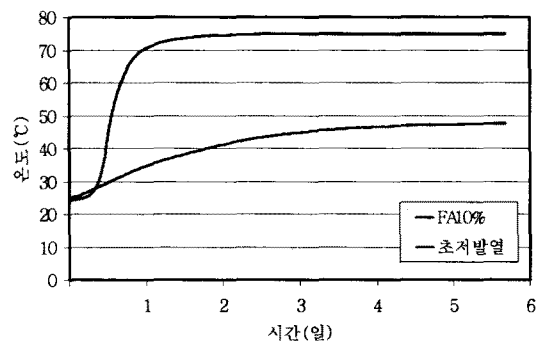


그림 8 단열온도 상승실험 결과

초저발열 콘크리트는 현재 송도151타워의 기초에 적용하기 위하여 3 m × 3 m × 3 m 크기의 mock-up 실험을 실시하여 현장적용성에 대한 검증을 마친 상태이다.

3.3. 내화 콘크리트

고강도 콘크리트의 폭열을 방지하기 위한 방법은 폭열 방지재료(섬유 등)를 콘크리트 내부에 혼입하는 방법과 콘크리트 부재 외측을 내화피복재료(도료, 뿔질, 보드 등)로 감싸는 두 가지가 대표적이다.

현재 현대건설에서는 자체적으로 개발한 200MPa 초고강도 콘크리트와 150MPa, 100MPa 강도의 콘크리트에 대한 내화성능을 확보하여 초고강도 콘크리트에서 강도에 따른 내화성능을 확보할 수 있는 최적의 피복 두께, 섬유 종류와 혼합비를 얻어내기 위하여 각 강도에 대한 공시체를 제작하여 실험을 진행 중에 있다.

또한 100MPa ~ 200MPa의 초고강도 콘크리트를 이용하여 500 mm × 500mm × 150mm 크기의 기둥부재를 제작하여 내화 mock-up 실험을 준비 중에 있다.

3.4. 방폭 콘크리트

지진파의 전달이 구조물에 동적하중으로 작용하듯 폭발하중도 파의 전파가 하중을 구조물에 전달한다. 단 폭발파가 지진파와 다른 점은 하중의 작용시간이 매우 짧아 동적하중에 의한 구조물의 공조현상이 일어나기 전에 하중의 작용이 중단되고 또한 순간적으로 작용하는 극한의 하중 때문에 구조물은 국부적인 파괴가 일어나게 된다. 이러한 폭발하중에 견딜 수 있는 방폭 콘크리트는 고강도의 성질을 가지면서 동시에 연성적 거동을 할 수 있어야 한다.

콘크리트는 기본적으로 비균질적인 재료로서 그 파괴가 일어나는 부분은 골재와 시멘트 페이스트 사이의 천이구역에서의 비균질한 부분에서 시작한다. 이러한 비균질성을 줄이기 위하여 굵은 골재를 사용하지 않고 잔골재가 콘크리트 내부에서 가장 큰 입자가 되게 하고 시멘트 입자보다 미세한 입도를 가지는 실리카폼 등을 사용하여 콘크리트의 충전성을 높여주어 콘크리트의 균질성을 극대화하여 주었다. 여기에 고인성 재료인 강섬유를 혼입하여 콘크리트의 근본적인 약점인 인장성능을 높여 주었다. 그리고 마지막으로 3~4일간 증기양생을 통해 제작 초기에 콘크리트의 성능을 낼 수 있게 줌으로써 방폭 성능을 가지는 콘크리트를 개발하였다.

방폭 콘크리트는 기존에 개발되어 있던 Reactive Powder Concrete(이하 RPC)를 국내 기술화한 것으로써 외국의 기술에 의존하지 않고 국내 기술만으로 콘크리트의 강도와 인장성능이 기존의 것보다 뛰어나게 개선한 것이다.

아래 표는 RPC의 배합비와 물리적 성질을 정리한 것이다.

표 8 RPC의 배합비

성분	혼입량
물-시멘트 비	< 0.2
시멘트	< 800 kg
물	< 200 kg
실리카폼	10~30 %
모래(규사)	800 ~ 1000 kg
충전재	200 kg ~
혼화제	1 ~ 3 %
강섬유	2 ~ 3 %

표 9 RPC의 물리적 성질

구분	범위
밀도	2490 ~ 2590 kg/m ³
강도	200 ~ 260 MPa
탄성계수	53 ~ 55 GPa
포아송비	0.18 ~ 0.19
인장강도	22 ~ 24 MPa

4. 결론

지금까지 살펴본 초고층 구조물에 쓰이는 특수 콘크리트의 생산기술은 계속해서 진보해 나아가고 있다. 특수 콘크리트의 기술이 향상 될수록 초고층 구조물의 높이는 더욱 더 높아질 수 있을 것이다. 현재 개발되어 있는 특수 콘크리트를 초고층 구조물에 적용하면서 초고강도 이면서 수화열을 저감 할 수 있는 콘크리트, CO₂저감형 친환경 콘크리트 개발, 고내구성/무균열 콘크리트 등 추가 개선사항들에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

5. 참고문헌

국도해양부고시 제2008-334호, [고강도콘크리트 기동·보의 내화성능 관리기준].

송훈 외, "고강도콘크리트의 내화특성 및 폭발현상", 콘크리트학회지 제20권 5호, 2008.9.

이도형, 김두기, 이기학, 2008, "지진, 폭발, 피로 등을 포함한 동적하중에 대한 해석기술", 콘크리트학회 20권 4호, pp.36~44.

FEMA 2003, Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks, FEMA Report No 427., Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.

Metha, Monteiro, Concrete microstructure, properties, and materials, 3rd edition.

Neville, Properties of concrete, 4th edition.

T. Ngo et al., "Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview", Electronic Journal of structural engineering, Special Issue: Loading on structure, pp.76-91.

abstract

Advanced concrete technology, which is the main construction technology of skyscraper, is dealt with in this paper. Advanced concrete technologies are classified into several types such as super high strength concrete(SHSC), low heat concrete(LHC), fire resistant concrete(FRC) and blast resistant concrete(BRC). The necessity, principal and application examples of advanced concrete technology are described respectively. In the last part of the paper, the introduction of HYUNDAI E&C's technology of Advanced concrete and future research trend are described.
