

공사기사

두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장
초고층 주거건축의 고강도콘크리트 시공관리 및 내화성능 향상공법
 Controlling the High Performance Concrete and Fire-Resistant Method in the Skyscraper



이재삼*
Jae-Sam Lee



김석일**
Seok-Il Kim



지석원***
Suk-Won Jee



김현섭****
Hyun-Seob Kim



이병훈****
Byeong-Hoon Lee

1. 머리말

아시아 최고층 주거 건축 프로젝트인 해운대 두산위브 더 제니스가 2007년 12월에 착공되어 현재 공사가 진행 중이다.

두산건설(주)에서 시공하는 이 프로젝트는 80층, 75층, 70층의 주거동 3개동과 부대시설 1개동으로 이루어지는 아시아 최고층의 주거건축물로서 최고의 시설과 편의성을 자랑하며 부산 해운대의 랜드마크적 건축물이 될 것으로 기대되어 진다<그림 1>. 상세한 공정현황 및 공사개요는 <표 1, 2>에 나타내었다.



2. 공정 계획 및 공사 현황

2008년 12월 현재 공정률은 약 10%로 토공사, 가설공사, 기초 및 지하층 골조공사가 진행 중이다.

- (1) 토 공 사 : 2007년 12월 ~ 2009년 08월
- (2) 골 조 공 사 : 2008년 09월 ~ 2011년 01월
- (3) 커튼월 공사 : 2009년 09월 ~ 2011년 03월
- (4) 내부마감공사 : 2009년 12월 ~ 2011년 11월



3. 초고층 주거건축 철근콘크리트공사

당 현장은 2008년 12월 현재 공정률은 약 10%로 진행되고 있으며, 2009년 3월 지하층 골조공사를 완료하고 지상층 골조공사를 진행하는 공정으로 계획하였다.

본 기사에서는 초고층 주거건축의 철근콘크리트 공사 일반사항과 지하 및 지상층 골조공사에 적용되는 고강도콘크리트의 내화 안전성 확보 방안에 대한 내용을 기술하고자 한다.



그림 1. 해운대 두산위브 더 제니스 조감도

* 정희원, (주)텍스콘 연구개발팀 팀장
 jslee62@doosan.com
 ** 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 공무원장
 *** 정희원, 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 기술지원팀장
 **** 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 1공구 소장
 ***** 정희원, 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 프로젝트 매니저

표 1. 주요 공정 현황

공사 구분	내 용
공통가설	주변건물 진단, 가설도로 부지정리
토공, 흙막이	E/A 공사 진행 및 계측관리
골 조	1공구 : B2~B4 지하층 골조공사 2공구 : B3~B5 지하층 골조공사 3공구 : 매트기초 타설

표 2. 공사 개요

공 사 명	해운대 두산위브 더 제니스		
위 치	부산광역시 해운대구 우동 1407번지 외 11필지		
설 계	Destelfeno, JERDE, TTE, W.M.A, S.W.A, 간삼파트너스, 부산건축, 이웨스		
감 리	(주)아이티엔코퍼레이션 한국방재기술(주)(소방) (주)세종기술단(전기)		
공사기간	2007. 12 ~ 2012. 01(50개월)		
구 조	철근콘크리트 조, 철골조		
공사규모	101동 80층, 102동 75층, 103동 70층		
대지면적	42 478 m ²		
건축면적	16 192 m ²		
건 폐 율	38.1%	용적률	898.6%
연 면 적	572 534 m ²		
조경면적	13 149 m ²		
주차대수	4 474 대(법정대수의 117.15 %)		
세 대 수	총 1 788 세대		

3.1 철근콘크리트공사 관리

아시아 최고 주거 건축인 해운대 두산위브 더 제니스의 설계조건은 <표 3>에 나타난 바와 같이 구조체의 콘크리트는 30~60 MPa의 고강도콘크리트를 사용한다. 당 현장의 철근콘크리트 공

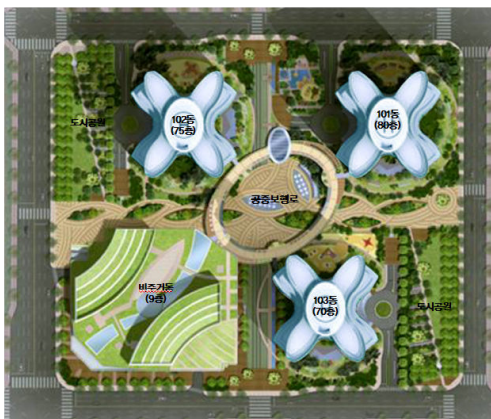


그림 2. 해운대 두산위브 더 제니스 배치도

표 3. 설계 내용

구 분	설계 내용
구조 형식	·전단코어월 + flat slab
콘크리트 강도	·30~60 MPa
철근 강도	·400~500 MPa
철골	·철골기둥, link beam, 철골계단
Mat 기초	·3.5~3.8 m

표 4. 중점 관리사항

항 목	측정장치 및 내용
일반사항	·수직, 수평 정밀성 ·3-Day 공정실현 - 장비/인력 가동력 최적화 ·시공전후 VE ·측량관리/column shorting ·비기준층 공기지연 사전예방
Mat 기초	·매트기초 두께 : 3.5~3.8 m ·높은 수화열 저감 ·야간 민원 해소 ·경제성 확보 ·공기 단축
고강도콘크리트 적용	·폭렬방지 및 내화성능 확보 ·펌프 압송성 확보 및 개선 ·조기강도 확보를 위한 배합 및 양생방안

사 시 중점관리 항목으로는 매트기초 수화열 관리, 컬럼쇼트닝 계측관리, 3-Day 공정 실현을 위한 콘크리트 조기강도 관리, 펌프 압송성 관리 등이 있으며, 특히 설계기준강도 40~60 MPa 고강도콘크리트의 내화안전성 확보 방안 마련과 현장적용 관리가 중요시 된다. <표 3>에 설계내용을 나타내었으며, <표 4>에서 중점관리항목에 대해 기술하였다.

3.2 시공성능 검증 계획

당 현장의 콘크리트 공사에 있어서 가장 중요한 성능검토 항목을 살펴본 결과 원활한 시공과 고품질확보를 위해 매트기초 수화열 관리와 고강도콘크리트의 내화성능확보, 고층부 압송 및 조기강도 발현성능에 대한 검증이 요구되어, 아래 <표 5>와 같은 항목을 검토하였다.

4. 고강도콘크리트 내화성능 향상

2008년 7월 국토해양부 고시 제 2008-334호 “고강도콘크리트 기둥보의 내화성능 관리 기준”에서 설계기준강도 50 MPa 이상의 고강도콘크리트 기둥보에 대한 내화성능 관리 기준이 마련되었다. 해당 콘크리트를 기둥 및 보 부재로 사용할 경우 현장 적용과 동일한 재료, 공법, 철근 배근 및 피복두께로 내화성능

표 5. 시공성능 검증 항목

항목	성능 검토
Mat 기초	·수화열 저감공법 - 저발열콘크리트 배합설계 - 관리재령 28일, 56일 적용 - 표면 보양 양생관리 - 2단 분리타일 및 응결시간차를 조정한 일체화 ·사전 검토 - 수화열에 의한 응력해석 - 응결시간조정을 위한 mock-up
고강도콘크리트	·고강도콘크리트 내화인증 - 60 MPa 고강도콘크리트 부재 ·펌프 압송성 검토 - 고강도콘크리트의 고층부 펌프 압송성능에 관한 예측 ·조기강도 발현성능 - 양생환경 및 공기검토를 위한 콘크리트 조기강도 발현성능 시험

확인을 위한 시험을 실시하여야 하며, 시험은 KS F 2257-1 “건축부재의 내화시험방법 일반요구사항”에서 제시하는 표준시간-가열온도곡선에 의하여 시험을 실시, 시험체 모두 내화구조 성능기준(국토해양부 고시 제2005-122호)에서 규정한 시간까지 주철근의 온도를 평균 538℃, 최고 649℃ 이하로 규정하였다. 이에 당 현장에 최고 60 MPa의 설계기준강도로 설계된 기둥부재의 화재에 대한 내화성능 보강대책을 수립하고 이의 성능 시험을 통해 고강도콘크리트 부재의 화재 안정성을 확보하고자 하였다.

4.1 고강도콘크리트의 내화성능

4.1.1 콘크리트의 폭렬과 내화성능

폭렬이란 화재시 갑작스런 고온에 의해 콘크리트 구조체의 부재표면이 심한 폭음과 함께 박리·탈락하는 현상으로 피복 콘크리트의 결손으로 구조체 내부까지 고온이 전달되어 철근이 노출됨으로써 고온을 받은 철근의 강도저하로 구조부재는 치명적인 내력저하를 초래함에 따라 초고층 주거 건축에서 특히 중요한 성능요건 중 하나이다.

4.1.2 폭렬 발생 원인 및 대책

폭렬의 발생요인은 콘크리트 내부의 수증기압 상승, 급격한 가열에 의한 비정상적인 열응력의 발생 및 골재 종류 등을 주요 원인으로 정리될 수 있으며 급격한 고온, 높은 함수율, 낮은 WB 등의 복합적인 원인에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다.

<그림 5>의 폭렬발생 메커니즘 모델과 같이 가열 초기 고온의 환경에 노출된 콘크리트는 가열면으로부터 가까운 영역에서부터 모세관 공극속 잉여수(free water)가 수증기로 증발하여 콘크리트 내부로(수평방향) 이동하기 시작하여 중반에 이르면 잉여수 뿐만 아니라 겔속에 존재하는 화학적 결합수도 같이 기화하

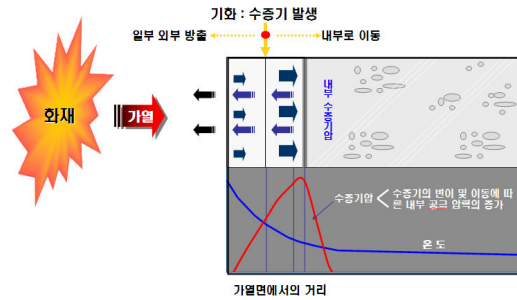


그림 3. 폭렬 발생 메커니즘

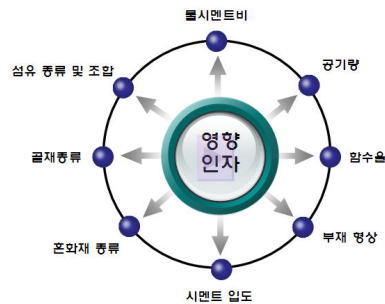


그림 4. 폭렬발생의 영향 요인

여, 거대공극인 WPB(water-path of bleeding)에서 결집된다. 이렇게 결집된 수증기는 WPB를 따라 수직상승 하여 결국 골재 밑에 존재하는 공기포에 갇히게 되고, 일정시간이 경과할 경우 포집된 수증기에 의해 높은 수증기 압력으로 작용하게 된다. 그러나 이때 섬유를 혼입한 경우는 <그림 6>과 같이 공기포 내에서

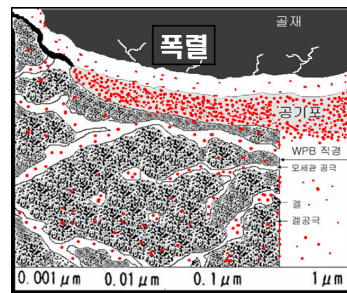
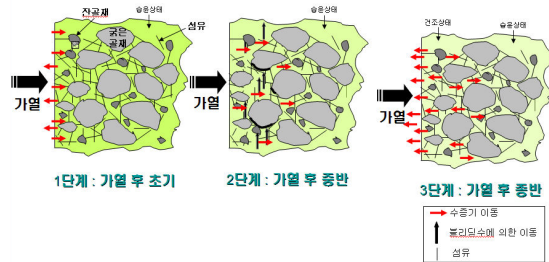


그림 5. 폭렬발생 메커니즘 모델

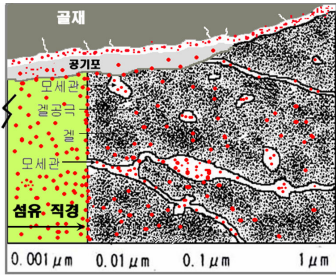
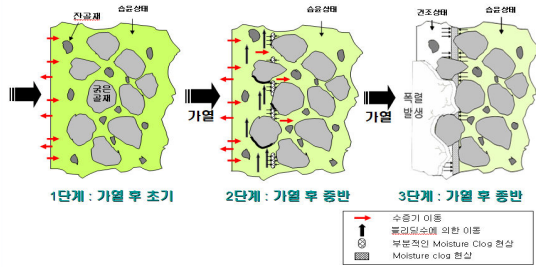


그림 6. 폭렬방지 메커니즘 모델

증가되고 있는 수증기 압력에 대한 완충작용을 하게 된다.

콘크리트 구성재료의 열팽창계수 차에 의해 균열이 발생되는데, 특히 골재와 시멘트와의 전이지역(internal transit zone)에서 가장 큰 균열이 생기기 시작한다. 앞서 폭렬발생 메커니즘에서 살펴보았듯이 섬유를 혼입하지 않은 경우에는 이러한 취약부분을 중심으로 폭렬이 발생되나 섬유를 혼입한 경우는 균열에 의해 생긴 공극과 섬유가 녹아생긴 공극 그리고 콘크리트 조직 내에서 자체적으로 존재하는 균열 등이 복합적으로 네트워크를 형성하여 내부에 존재하는 수증기를 외부로 이동시키거나 자체적인 완충작용에 의해 더 이상 콘크리트 조직 내부에 높은 압력이 걸리지 않도록 하여 고강도콘크리트의 폭렬현상을 방지할 수 있다.

4.2 모의부재 성능 실험

4.2.1 성능 실험 계획

해운대 두산위브 더 제니스 신축공사 현장의 고강도콘크리트의 내화안전성 시험을 통한 검증을 위해 나일론섬유와 폴리프로필렌섬유를 1:1 비율로 섞어 콘크리트 부피의 0.025 %, 0.050 % 0.075 %를 혼입한 60MPa 고강도콘크리트로 현장의 최고 설계강도 콘크리트 기둥 중 단면 치수가 가장 작은 부재와 동일한 배근을 적용한 시험체를 제작하였다.

4.2.2 모의부재 제작 모델링

내화성능시험을 위한 부재의 크기는 <표 6>과 같이 1,000×1,350×1,500 mm로 하고 설계강도 60 MPa의 콘크리트로, 피복두께는 40mm로 계획하였다. 기타 내화성능 시험을

표 6. 부재 크기 및 개요

항목 부재종류	부재크기(mm) (W×D×H)	설계강도 (MPa)	피복두께 (mm)
기둥	1,000×1,350×15,000	60	40

표 7. 모의부재 제작 일반사항

항 목	내 용	
철 근	주철근 치수 및 재질	HD32, SD500
	능근치수 및 재질	HD13, SD400
콘크 리트	설계기준강도(MPa)	60
	슬럼프플로(mm)	600±100
	공기량(%)	3.5±1.5
	굵은골재 치수(mm)	20
시험체 제작	양생기간	90, 91일
	양생조건	대기양생

표 8. 내화성능 보강 방법

나일론섬유(NY)	폴리프로필렌섬유(PP)
사용량	NY+PP : 0.025, 0.050, 0.075 %

위한 모의부재 제작의 일반사항은 <표 7>과 같다.

4.2.3 내화성능 보강계획

내화성능 향상을 위한 보강계획으로 시공성이 가장 우수하며 또한 가장 경제적인 방법의 하나로 섬유보강을 고려하였으며, 이에 나일론 섬유와 폴리프로필렌 섬유를 1:1의 비율로 각각 콘크리트의 용적당 0.025%, 0.050%, 0.075%씩 혼입하여 폭렬저감 및 내화성능 효과를 비교하고자 하였다.

4.2.4 배합 및 부재 제작

본 시험체의 설계기준강도는 60 MPa이며 섬유를 혼입하기 전 base 콘크리트의 배합은 <표 9>와 같다. 또한 철근 배근 및 열전

표 9. 실험 배합표

W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)					
		W	C	BSC	S	G	AD(%)
27.5	44.0	165	420	180	710	914	4.80 (0.80)

Main bar		HD32-28EA
Steel		-
Hoop Bar	상, 하단부	HD13-@400
	중앙부	HD13-@400

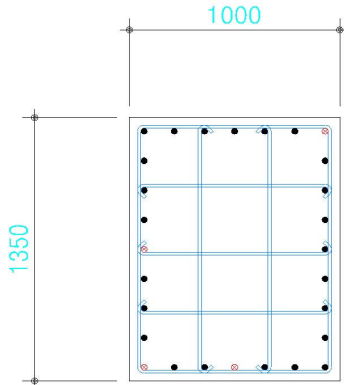


그림 7. 철근 및 열전대 배치

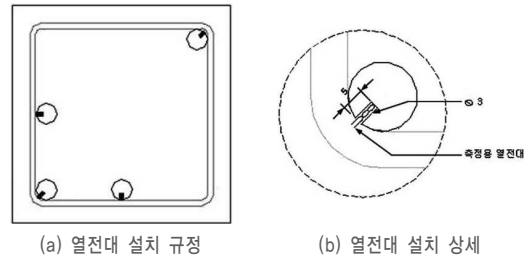
대 설치는 <그림 7>과 같이 실행하였으며 부재 제작은 <그림 8>과 같이 진행하였다. 열전대는 <그림 7>과 같이 단면에 표시된 (⊗) 주철근의 높이중심(바닥에서 750mm)에 직경 약 5mm의 구멍을 뚫어 설치할 수 있도록 한다.

4.2.5 내화 성능 시험

고강도콘크리트의 내화성능 보강을 위해 나일론 섬유와 폴리프로필렌 섬유를 사용하여 제작한 모의 구조체의 제작부재는 다음과 같은 구분에 따라, 콘크리트 열전대를 매설하였는데, 열전대는 <그림 7>과 같이 단면에 표시된(⊗, ×) 주철근(RC부재)의 높이중심(바닥에서 750 mm)에 <그림 8> 같이 설치하였다. 또한, 모의 구조체는 <그림 9>의 사진과 같이 한국건설기술연구원의 보바닥 가열로에 배치하였다.

4.2.6 내화성능 시험 결과

<그림 10~12>는 내화성능 보강 섬유의 혼입을 변화에 따른 온도이력을 나타낸 것이다. 먼저 내화성능 보강 섬유 혼입률 0.025%의 경우 표면부분 주근에서 내화시험 개시 후 25분경에 피복 콘크리트가 탈락하고 내부철근이 화기에 노출되면서 급격하게 온도가 상승하는 것으로 나타났고, 가열시간 약 30분경에 538℃를 초과하였으며, 가열시간 약 40분경에 최고온도 649℃를 초과하였다. 혼입률 0.050%의 경우 3시간 경과 후 주근부 최고온도는 531℃, 평균온도는 405℃로 국토해양부에서 규정한 최고온도 범위와 평균온도 범위에 만족하는 것으로 나타났으며 0.075%혼입의 경우 더욱 우수한 결과가 나타나 고강도콘크리트를 사용한 건축물의 내화 대책으로 효과적인 것으로 판단된다. 종합적인 내화 인증평가로 60 MPa 고강도콘크리트에 내화보강



(a) 열전대 설치 규정

(b) 열전대 설치 상세



(c) 열전대



(d) 철근내 열전대 설치



(e) 철근 조립



(f) 거푸집 조립



(g) 섬유 혼입



(h) 물성시험



(i) 모의부재 타설



(j) 모의부재 양생

그림 8. 모의부재 제작 과정

섬유의 혼입률 0.050%인 경우는 3시간 비가력 내화시험 후 최고온도 531℃, 평균온도 405℃로 국토해양부에서 제정 고시된 「고강도콘크리트의 기동보의 내화성능관리기준」을 충분히 만족하는 것으로 밝혀졌다.

따라서 본 공법은 실무 건설공사 현장에서 시공성이 우수하고, 경제성이 획기적이면서 월등한 내화성능을 갖춘 이상적인 공법임이 입증되었다.

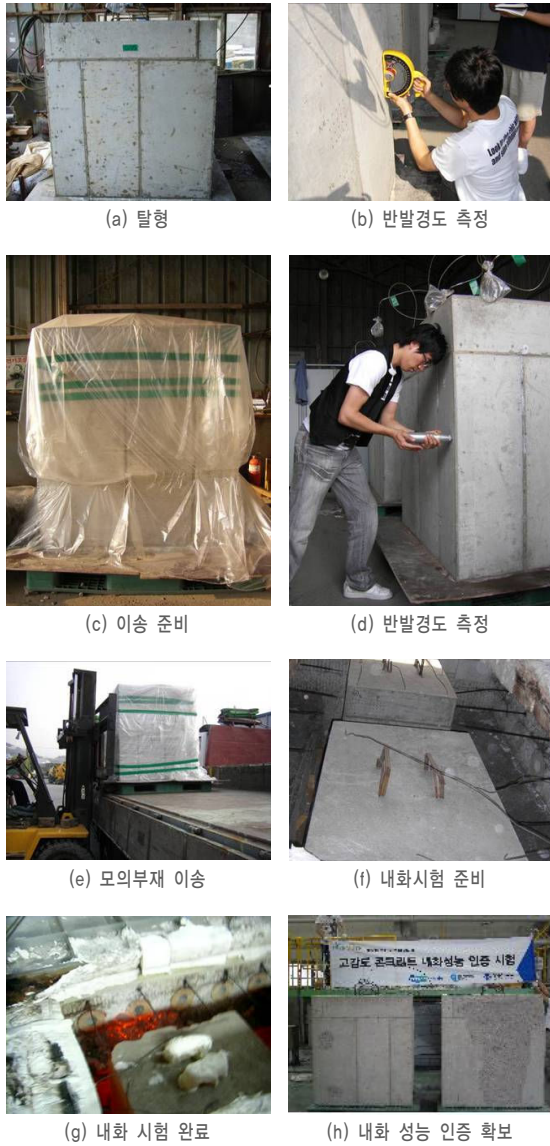


그림 9. 모의부재의 내화성능 시험

4.3 내화인증 고강도콘크리트의 현장적용

내화인증 고강도콘크리트는 당 현장 각 동의 주동부 총 28개 기둥에 대해 40, 50, 60 MPa 고강도콘크리트에 적용하고 있으며, 총 물량은 약 34,500m³에 달한다. 섬유는 나일론섬유와 폴리프로필렌섬유를 3m³ 포장과 1m³ 포장 2가지로 입고하고, 혼입시 손실이 발생하지 않도록 믹서에 직접 투입하거나, 컨베이어 벨트를 이용하여 투입하는 방법 2가지를 적용하고 있다. 현장 입고시 육안관찰 및 투입 후 개봉된 포장의 회수를 통해 섬유 투입과 혼입유무를 확인하고 있다.

표 10. Case 별 수화열 측정 결과

섬유 혼입률(%)	내화성능 시험 결과		내화성능 기준	
	주철근 평균온도(°C)	주철근 최고온도(°C)	주철근 평균온도(°C)	주철근 최고온도(°C)
0.025	570	1 097	538	649
0.050	405	531		
0.075	399	489		

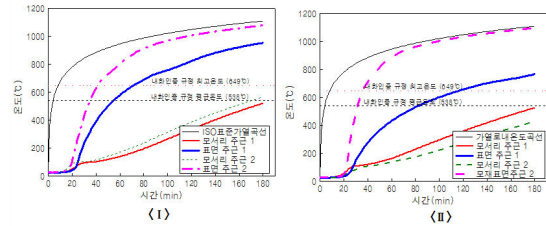


그림 10. 내화성능 보강 섬유 혼입률 0.025%

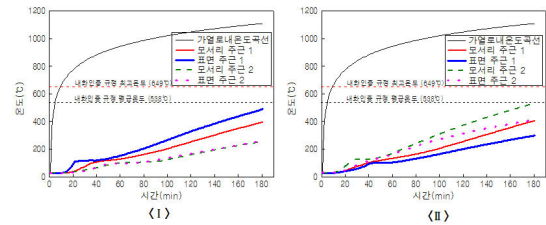


그림 11. 내화성능 보강 섬유 혼입률 0.050%

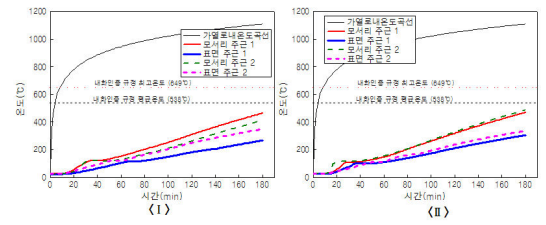
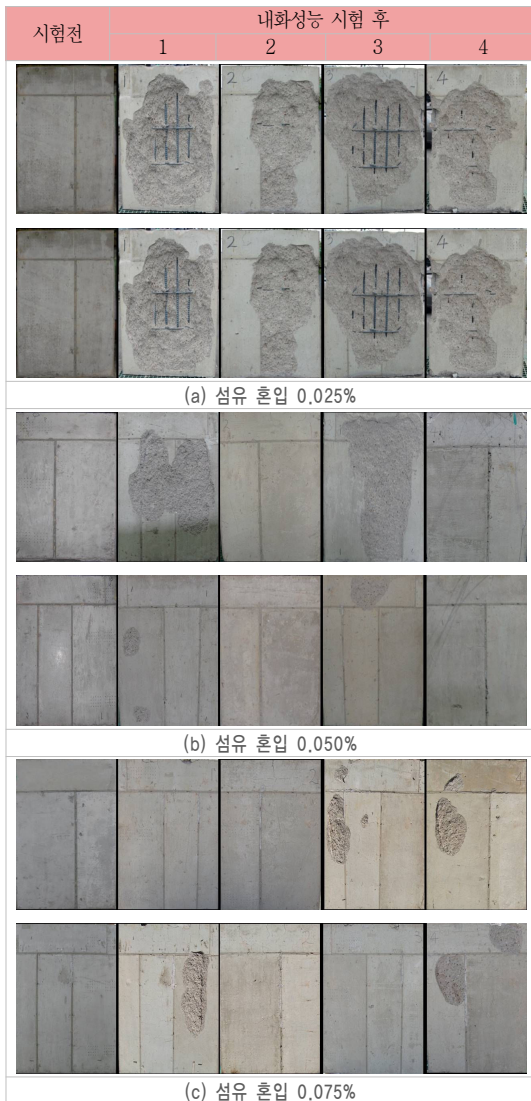


그림 12. 내화성능 보강 섬유 혼입률 0.075%

5. 맺음말

두산건설(주)에서 시공하고 있는 해운대 두산위브 더 체니스 신축공사 현장의 고강도콘크리트 내화성능확보방안은 국토해양 부고시 “제 2008-334호 고강도콘크리트 기둥보의 내화성능 관리 기준”을 국내 최초로 만족하고, 당 현장의 40 MPa 이상 모든 고강도콘크리트 기둥에 이 공법을 적용하고 있으며, 초고층 주거건축공사의 요소기술에 대해 일반검토항목과 중점관리항목으로 분류 후, 고강도콘크리트 내화안전성 확보방안과 같이, 매스부재의 수화응력에 대한 대책과 고층부 펌프 압송성 등에 대한 시공전 철저한 사전 점검을 통해, 우수한 기술력과 현장직용 안전성을 확보하여 적용함으로써, 고품질의 품격 높은 아시아 최고층 주거 건축물의 실현을 목표로 공사에 임하고 있다. ☐

표 11. 내화성능 시험 전후의 부재 형상



참고문헌

1. 내화구조의 인정 및 관리기준, 건설교통부 고시 제2005-122호, 2005. 5. 20.
2. 고강도콘크리트 기둥, 보의 내화성능 관리기준, 국토해양부 고시 제2008-334호, 2008. 7. 21.
3. 두산산업개발(주), 화재시 고성능 콘크리트의 폭발방지 및 내화성능 향상 공법 개발, 2005 산학 공동연구, 청주대학교 산업과학연구소, 2005.
4. 한민철, 허영선, 한친구, “고강도콘크리트의 폭발발생 및 방지 메커니즘,” 콘크리트학회 학회지, 19권, 1호, 2007, pp.94~100.
5. A. Meda, P. G. Gambarova, and M. Bonomi, “High-Performance Concrete in Fire Exposed Reinforced Concrete

한국건설기술연구원
 경기도 고양시 일산서구 대왕동 2311번지
 Tel: 031-9100-737 Fax: 031-9100-729

성적서 번호: 200807169-1-1
 쪽(1)/(총 15)

시험 성적서

1. 의뢰자
 - * 기관명: 두산건설(주)/(주)엑스콘
 - * 주소: 서울 강남구 논현동 105-7두산빌딩/서울 서초구 방배동 2726번지
 - * 의뢰일자: 2008년 07월 22일(접수번호: 200807169)
2. 시험성적서의 용도: 국토해양부 고시에 의한 내화성능확인
3. 시험대상품목(또는 시료명): 60MPa 기둥 내화성능 시험체(PP섬유+NY섬유: 부피비 0.05%)
4. 시험일자: 2008년 08월 21일
5. 시험방법: 국토해양부 고시 제2008-334호 「고강도 콘크리트 내화성능 관리기준」(2008.7.21) KS F 2257-1:2005 (건축구조부재의 내화시험방법 - 일반요구사항)
6. 시험환경
 - * 온도: (31 ~ 33) °C, 상대습도: (34 ~ 32) % R.H. * 장소: 방내화시험실
7. 시험결과

구분	성능기준	시험결과		내화성능
		온도	시간	
시험체①	주철근 평균온도 538 °C 이하	399 °C	180 분	3 시간
	주철근 최고온도 649 °C 이하	489 °C	180 분	
시험체②	주철근 평균온도 538 °C 이하	412 °C	180 분	3 시간
	주철근 최고온도 649 °C 이하	531 °C	180 분	
8. 결과에 대한 종합의견:

본 성적서는 국토해양부 고시 제2008-334호(2008.07.21) 제4조의 3 시간 내화성능을 만족 함.
9. 시험성적서 유효기간: 시험성적서 발급일로부터 3 년간 유효함.

시험자 전 기 *[Signature]* 기술책임자 여인환 *[Signature]*
 2008년 09월 18 일
한국건설기술연구원장

* 위 성적서는 2항 시험성적서의 용도 이외에는 사용을 금지합니다.
 * 상기 내용은 의뢰자가 제시한 시료의 시험결과이며, 본 시험결과는 전체 제품의 품질을 대표하지 않습니다.

그림 13. 내화성능 시험 성적서



그림 14. 내화보강 고강도콘크리트 기둥부재 타설

Sections,” *ACI Structural Journal*, Vol. 99, 2002. pp. 277 ~287.

6. Gai-Fei Peng, Wen-Wu Yang, Jie Zhao, Ye-Feng Liu, Song-Hua Bian, and Li-Hong Zhao, “Explosive Spalling and Residual Mechanical Properties of Fiber-Toughened High-Performance Concrete Subjected to High Temperatures,” *Cement & Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 723~727.

담당 편집위원 :
 한민철(청주대학교) twhan@cju.ac.kr