

초고층 빌딩 적용을 위한 설계강도 800kg/cm² 고강도 콘크리트의 개발

An Application of High Strength Concrete with 800kg/cm² to High-Rise Building

김규동* 이승훈** 김명식*** 손유신**** 김한준****
Kim, Gyu Dong Lee, Sung Hoon Kim, Myung Sik Sohn, Yu Shin Kim, Han Joon

ABSTRACT

The columns and The belt wall of Tower Palace III were desined as 800kg/cm² ultra-high strength concrete. The concrete should meet or exceed the requirements of slump of 23cm, $\sigma_{1.18h}$ of 100kg/cm², $\sigma_{9.18h}$ of 800kg/cm². The concrete mixings with 4 different domestic Silica fumes were investigated. Laboratory tests, the pilot productions of batcher plant and the full-scale mock up tests were performed. As results of site application, all test results are satisfied with the requirements of columns and belt wall.

1. 서론

최근 들어 구조물의 초고층화, 대형화 그리고 특수화 현상이 뚜렷이 나타나고 있으며, 이에 상응하는 재료, 구조, 설계 및 시공능력에 대한 기술 향상이 요구되고 있다. 특히 건설공사의 고부가가치화 및 성역화가 가능한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 개발과 실용화는 세계적 추세로서, 선진국의 경우 이미 많은 연구와 함께 실용화가 보편화되고 있다. 또한, 세계 각국에서 50층 이상 초고층 구조물의 시공이 증가하면서 설계강도 500kg/cm² 급의 고강도 콘크리트가 일반적으로 사용되고 있으며, 설계강도 800~1,000kg/cm²의 초고강도 콘크리트의 적용도 증가하는 추세에 있어 이에 대한 연구결과, 구조설계법 및 시공사례 등이 많이 소개되고 있다.

당사의 경우 고강도 콘크리트에 대한 기술 개발 및 시공역량 강화에 끊임없는 노력을 기울여 왔으며, 그 예로 도곡동 타워팰리스 I 현장(66층, 234 m)에 500kg/cm²의 고강도 콘크리트를 적용하였으며, 말레이시아 페트로나스 타워(92층, 453m)에 큐브강도 기준으로 800kg/cm²의 고강도 콘크리트를 적용하는 등 초고층 구조물에 대한 응용이 매우 활발하게 이루어지고 있다.

현재 국내에서는 사무소 건축물만이 아니라 주거용 아파트 건축물도 초고층화가 이루어지고 있으며, 새로운 주거형태로 초고층의 대규모 주상복합 건물들이 세워지고 있다. 특히, 본 연구를 통해 설계강도 800



그림1 타워팰리스III 조감도(69층)

* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원
** 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원
*** 삼성물산(주)건설부문 도곡동 타워팰리스 3차 J.V 현장 기술팀 대리
**** 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 주임연구원

kg/cm³의 초고강도 콘크리트가 적용될 도곡동 타워펠리스 III 현장은 지하 6층, 지상 69층(263m) 규모의 국내 최고층 주거용 건축물로서 순수 주거 건축물로서는 세계에서 가장 높은 건축물로 기록되고 있으며, 외장이 가장 화려하고 건축적 조형미가 탁월한 건물로 평가되고 있다.

이처럼 고강도 콘크리트 적용에 따른 다양한 기능성과 선진 외국의 기술동향 등을 고려할 때 설계강도 800kg/cm³ 초고강도 콘크리트의 개발과 현장 실용화는 국내 최초라는 점에서 그 의미가 클 것으로 판단되며, 본 연구에서는 향후 초고층 구조물에 적용될 고강도 콘크리트의 재료·시공적 기술에 대한 그 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 최적배합 도출을 위한 실내실험

2.1 사용재료

고품질의 초고강도 콘크리트 제조를 위해서는 시멘트, 골재, 혼화제 및 혼화제에 대한 사전검토를 통하여 재료 선정 및 관리에 상당한 주의를 기울여야 하며, 특히 고분말의 실리카 흙에 대해서는 물성비교시험을 통해 고품질의 초고강도 콘크리트를 생산할 수 있도록 하였다. 소정의 워커빌리티 확보를 위해 고성능 감수제를 사용하여 배합을 실시하였으며, 표 1에 사용재료의 특성을 나타내었다.

표 1 사용재료의 특성

구분	종류	비중	분말도(cm ³ /g)	강열감량(%)	SiO ₂ (%)	조립율(%)	흡수율(%)
시멘트	1종보통	3.15	3,267	0.8	20.5	-	-
실리카흙	체코산	2.2	192,600	1.7	94.0	-	-
플라이애쉬	보령산	2.2	3,610	3.2	61.0	-	-
새골재	인천세척사	2.59	-	-	-	2.8~2.9	0.9
조골재	쇄석(태산)	2.63	-	-	-	6.5~6.7	1.0

2.2 실리카흙 선정 비교실험

초고강도 콘크리트의 배합설계에 있어서 가장 중요한 재료인 실리카흙에 대해서 국내에서 시판되고 있는 4가지 제품을 대상으로 비교실험을 실시하여 상대적으로 우수한 품질의 제품을 선정하며, 최종적으로 경제성 검토를 통하여 설계강도 800kg/cm³ 초강도 콘크리트에 사용하고자 하였다

2.2.1 기본물성 비교

4가지 제품에 대한 비교실험은 당 현장의 품질관리 기준에 맞도록 계획하여 유동성, 응결, 조기강도 및 장기강도 등으로 구분하여 수행되었으며, 표 2는 4가지 실리카흙의 기본적 물성자료에 대한 조사결과를 정리한 것이다.

표 2 실리카흙의 기본물성 조사결과

구분	A제품	B제품	C제품	D제품
원산지	노르웨이	미국	캐나다	체코
SiO ₂ 함량	92.3%	93~98%	93~96.5%	94.0%
Bulk Density	440 kg/m ³	160~256 kg/m ³	250~300 kg/m ³	237 kg/m ³
강열감량	2.41%	1.5~3.5%	2.40%	1.48%
평균입경	8.94 μm	0.03~0.1 μm	0.1~0.2 μm	11.03 μm
Surface Area	16~18 m ² /g	15~28 m ² /g	18~20 m ² /g	20 m ² /g
비중	2.2	2.28	2.2	2.21

2.2.2 실험결과

실리카 흙 선정을 위한 비교실험은 2차에 걸쳐 실시되었으며, 그 결과를 토대로 하여 타워펠리스 III 현장의 800kg/cm² 초고강도 콘크리트 배합에 적용할 실리카흙으로서 체코산의 D제품을 결정하였다.

표 3은 2차에 걸쳐 실시한 실리카흙 비교실험 결과에 대한 판정 결과만을 정리하여 나타낸 것이며, 실리카 흙의 Type은 운반 및 저장용적 등의 경제성을 고려하여 Densified Type을 사용기로 결정하였다.

표 3 실리카 흙 비교실험 결과

구분	제품	평가기준	응결	조기강도	장기강도	초기유동성	슬럼프유지성능
1차	A 제품		△	△	○	○	△
	B 제품		○	○	○	◎	○
	C 제품		◎	○	○	◎	◎
	D 제품		◎	◎	○	◎	○
2차	C 제품		◎	◎	◎	◎	○
	D 제품		◎	◎	◎	◎	◎

※ 평가 기준 ⇒ ◎:우수, ○:보통, △:부족

2.3 실내배합

실내배합에서는 기존의 고강도 콘크리트 시공자료를 근거로 하고, 설계강도가 800kg/cm²인 점을 고려하여 소요강도를 만족하는 적정 물-결합재비(W/B)의 범위를 찾고자 W/B의 변수를 23.0% ~ 27.0%로 설정하였으며, 물-결합재비별로 현장에서의 워커빌리티를 확보할 수 있는 적절한 단위수량과 결합재량의 범위를 찾고, 조기강도와 장기강도 및 유동성 기준을 만족하는 결합재의 치환량을 결정하기 위해 배합을 실시하였다.

그 결과를 토대로 배합변수별 적정범위를 결정하여 표 4 및 표 5에 정리하였으며, 이를 근거로 실내배합에서의 기준배합을 결정하고, 기준배합에 대한 굳지 않은 콘크리트의 물성시험과 압축강도 측정결과를 정리하여 표 6에 나타내었다. 표 6에서 알 수 있듯이 기준배합은 유동성 및 강도발현 측면에서 양호한 것을 알 수 있었다.

표 4 배합변수별 적정범위 선정

변수	평가기준	초기 유동성	응결	조기강도	장기강도
물-결합재비(W/B)		-	25.0% 이하	26.0% 이하	25.0% 이하
단위수량(W)		160 kg/m ³ 이상	-	-	-
단위결합재량(B)		650 kg/m ³ 이하	650 kg/m ³ 이상	650 kg/m ³ 이상	-
실리카흙치환율		8% 이하	8% 이상	8% 이상	8% 이상
플라이애쉬 치환율		15% 이상	15% 이하	15% 이하	15% 이상
슬래그미분말 치환율		20% 이상	20% 이하	20% 이하	20% 이상
굵은골재 절대용적		0.32 ~ 0.34	-	-	-
고성능감수제			2000H	2000H	

표 5 실내배합의 기준배합

실험구분	W/B(%)	Gv	S/a(%)	단위 재료량 (kg/m ³)				
				W	B	S/F(%)	F/A(%)	S.P(%)
19-800-23	24.5 ~ 25.5	0.32 ~ 0.34	37.0 ~ 45.0	160 ~ 165	650 ~ 660	8%	15 ~ 20	2.1 ~ 2.5
기준배합	24.9	0.34	41.5	162	650	8	15	2.4

표 6 물성시험결과 (기준배합)

구분	슬럼프(cm)/플로우(cm/cm)		손실량 (cm)	공기량(%) 60분	재령별 압축강도 (kg/cm ²)						
	0분	60분			16H	1일	3일	7일	28일	56일	91일
기준배합	24.0 (46/45)	23.0 (40/39)	1.0(5~6)	2.6	168	294	505	635	851	911	926

2.4 실내 최적배합비 도출

실내배합 결과를 근거로 도곡동 타워팰리스 III 현장에 공급할 설계강도 800kg/cm² 초고강도 콘크리트의 실내 최적배합비를 도출하였으며, 그 배합표를 표 7에 나타내었다.

표 7 실내 최적배합비

배합구분	W/B(%)	S/a(%)	단위 재료량 (kg/m ³)					
			W	B	C	S/F(%)	F/A(%)	S.P.(%)
19-800-23	24.9	41.5	162	650	500	52(8)	98(15)	15.6(2.4)

3. 레미콘 시험생산 (Pilot Test)

레미콘 시험생산은 실내배합 결과를 근거로 하여 레미콘 생산업체에서의 사용재료에 의한 물성변화와 그 특성을 분석하고, 실제 레미콘 공장에서의 시험생산을 통해 실내배합과의 차이점을 보정하여 최적배합을 도출하고자 실시하였다.

시험생산은 실내 최적 배합비를 대상으로 실시하였으며, 현장에 레미콘을 공급할 4개 공장에서 순차적, 반복적으로 진행되었다. 사진 1은 레미콘 믹서트럭에서 시료를 채취하는 전경을 나타낸 것이다.

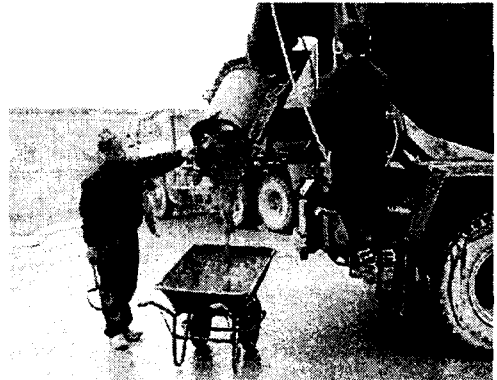


사진 1 레미콘 시험생산 전경

4개 레미콘 공장에서 실시한 Pilot Test 결과를 평균하여 표 8과 표 9에 정리하였다. 표에서 알 수 있듯이 양호한 유동성, 조기강도 및 장기강도 발현특성을 나타내어 당 현장에 공급될 800kg/cm² 초고강도 콘크리트의 배합으로 적절할 것으로 판단되었다.

표 8 굳지않은 콘크리트 물성시험 (레미콘 Pilot test)

구분	슬럼프(cm)/플로우(cm/cm)			공기량 (%)		온도 (°C)
	0분	40분	60분	0분	60분	
4개사 평균	23.5(45/45)	23.0(42/41)	22.5(40/39)	3.7	2.5	17.5

표 9 압축강도 및 탄성계수 측정결과(레미콘 Pilot test)

구분	재령별 압축강도 (kg/cm ²)								탄성계수(×10 ⁵)	
	16H	1일	3일	7일	14일	28일	56일	91일	56일	91일
4개사평균	194	273	457	626	745	812	856	892	3.86	3.87

4. 현장 Mock-Up Test

현장 Mock-Up Test는 현장 상황과 동일한 조건 속에서 수행함으로써, 현장 타설 시 콘크리트의 품질에 문제가 발생하지 않도록 하기 위해서 실 부재와 동일한 단면의 부재를 제작하여, 적절한 다짐방법 및 다짐시간, 양생방법, 거푸집 존치기간 등을 결정하고, 굳지 않은 콘크리트의 물성시험과 경화콘크리트의 표준공시체 및 코아공시체의 재령별 압축강도를 측정하였다.

현장 Mock-Up Test에 사용된 시방배합은 레미콘 시험생산에서 결정된 배합으로서 표 10에 나타난 바와 같고, 레미콘은 경기도 안양 소재의 레미콘 공장에서 공급하도록 계획하였으며, 기둥부재와 월부재에 타설을 실시하였다. 사진 2는 현장 Mock-Up Test 전경을 나타낸 것이다.

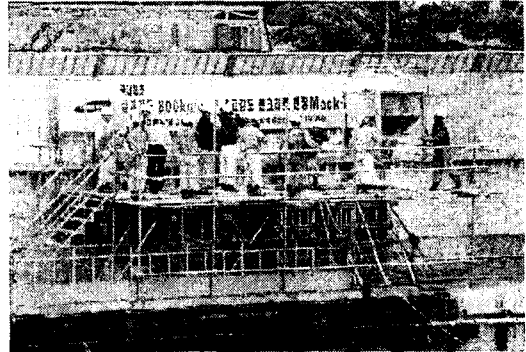


사진 2 현장 Mock-Up Test 타설전경

표 10 현장 Mock-Up Test 시방배합표

배합구분	W/B(%)	S/a(%)	단위 재료량 (kg/m ³)					
			W	B	C	S/F(%)	F/A(%)	S.P(%)
19-800-23	24.9	41.5	162	650	500	52(8)	98(15)	17.55(2.7)

레미콘 생산에서 현장까지의 운반시간은 50분이 소요되었으며, 그 때의 굳지 않은 콘크리트 물성시험 결과를 표 11에 나타내었고, 표 12는 경화 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 측정 결과를 나타낸 것이다.

표 11 굳지않은 콘크리트 물성시험 (현장 Mock-Up Test 결과)

구분	슬럼프(cm)/플로우(cm/cm)		공기량 (%)		온도 (°C)
	공장	현장	0분	60분	
Mock-Up Test	23.5(42/41)	23.0(40/39)	4.5	2.6	33.5

표 12 압축강도 및 탄성계수 측정결과(현장 Mock-Up Test)

구분	재령별 압축강도 (kg/cm ²)								탄성계수(×10 ⁵)		
	16H	1일	3일	7일	14일	28일	56일	91일	28일	56일	91일
표준공시체	233	273	478	583	671	801	844	872	3.56	3.69	3.95
코아공시체	-	635	-	703	-	723	754	768	3.48	3.57	3.64

현장 Mock-Up Test 결과에서 표 11에 나타난 바와 같이 양호한 유동성을 나타내어 현장에서 소요의 워커빌리티 확보가 충분히 가능할 것으로 판단되었다.

표 12의 압축강도 결과에서도 표준 공시체는 안정적인 강도발현 특성을 나타내었으며, 특히 코아 공시체 재령 1일 압축강도는 초기 재령에서의 시멘트 수화반응에 의한 높은 수화열의 영향에 의한 것으로 판단되며, 기준재령에서 설계기준강도의 96%로서 기준치인 85%를 초과하는 안정적인 강도발현을 보였다.

탄성계수 측정실험 결과서는 ACI 363식에서 제안하는 값과 거의 유사한 결과를 나타내었으며, 재령 91일 공시체의 경우는 제안식에 의한 값에 비해 약 5% 정도 높은 값을 가지는 것으로 나타났다.

5. 현장 적용

도곡동 타워팰리스 3차 J.V현장의 지하 6 층 SRC 기둥부재에 설계강도 800kg/cm² 초고강도 콘크리트의 현장 치 타설을 실시하였다. 최적 배합도출을 위해 수행하였던 실내배합, 레미콘 시험생산 및 현장 Mock-Up test 등의 일련의 과정을 통해 국내 최초, 국내 최고의 초고강도 콘크리트를 실제 구조물에 치 타설 한다는 점에서 더 큰 의미를 가지며, 소요의 워커빌리티 확보와 조기강도 및 장기강도 발현 특성에 대한 실험을 수행하고, 이에 대한 철저한 사전관리를 통해 현장에서의 효율적인 품질관리가 가능하도록 하였다. 사진 3은 현장 타설전경을 나타낸 것이다.

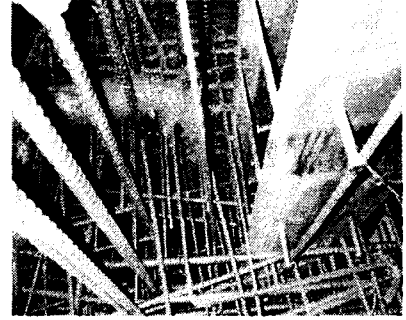


사진 3 현장 타설전경

현장 타설결과 콘크리트의 품질은 작업성 및 팽팽성 측면과 강도발현 측면에서 양호한 것으로 나타났다. 그림 2는 4개 레미콘에서 공급한 설계강도 800 kg/cm² 초고강도 콘크리트의 압축강도 발현특성을 재령별로 각각 도식화하여 나타낸 것으로서 조기강도 및 장기강도 모두가 품질기준을 만족하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 볼 때 국내 최초로 실시된 설계강도 800kg/cm² 초고강도 콘크리트의 현장 타설은 성공적으로 수행되었다고 판단된다.

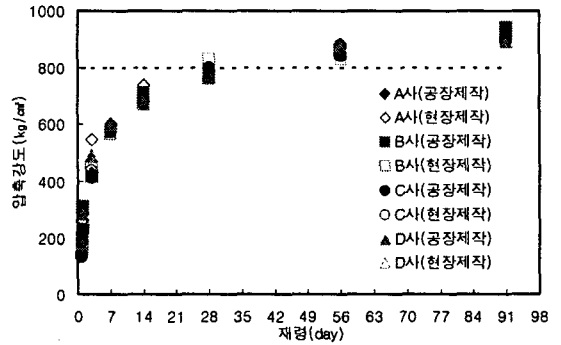


그림 2 압축강도 측정결과(현장타설)

6. 결론

도곡동 타워팰리스 III 현장의 기둥 부재와 벨트 월 부재에 적용되는 설계강도 800kg/cm² 초고강도 콘크리트에 대한 원활한 생산과 현장 시공 및 현장 품질관리를 목적으로 실리카 흙의 비교실험, 실내배합, 레미콘 시험생산, 현장 Mock-Up Test 및 실구조물의 현장 타설까지 일련의 과정을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내에서 사용되어지는 실리카 흙 4개 제품에 대한 비교실험에서 체코산 제품이 슬럼프 경시변화와 초기강도 발현특성 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구를 통해 개발된 설계강도 800kg/cm² 초고강도 콘크리트는 60분 경과 후 슬럼프가 평균 23cm로서, 현장 작업성이나 팽팽성에 있어서 양호한 유동성을 확보하는 것으로 나타났다.
- (3) 현장 타설된 콘크리트의 재령 18시간 조기강도는 평균 156kg/cm², 재령 91일 장기강도는 평균 903kg/cm²으로서 안정적인 강도발현 특성을 나타내었으며, 충분히 현장 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- (4) 초고강도 콘크리트의 현장 치 타설에서 레미콘 생산 및 시공은 성공적으로 수행되었으며, 향후의 효율적인 품질관리를 위해서 철저한 사전 품질관리 지침이 마련되어야 할 것으로 판단되며, 시공 기술자료의 DB화와 계절별 강도발현 특성 등에 대한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. "シリカフェームを用いたコンクリートの 調合設計施工ガイドライン", 일본 건축학회, 1996
2. 신성우, 윤영수, 이승훈, 안종문, 백승준 "1,200kg/cm² 초고강도 콘크리트의 고층 주상복합구조물에서의 시공 및 특성화 연구", 한국콘크리트 학회 학술발표, 제7권 2호, 1995. 10
3. 신성우, 이광수, 윤영수, 이승훈 "초고층 주상복합 건물에의 초고강도 콘크리트의 시공 및 구조성능", 한국콘크리트 학회 학술발표, 제 6권 2호, 1994.10