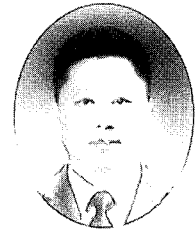


국내 최초 설계강도 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트를 적용한 주거용 초고층 건물 시공 사례

- An Application of 800 kgf/cm² High Strength Concrete on High Rise Building -



왕인수*
Wang, In Soo



이승훈**
Lee, Seung Hoon

1. 머리말

서울특별시 강남구 도곡동에 위치한 타워팰리스 3차 J.V 현장은 지하 6층 지상 69층 규모로 높이 263m이며, 공사기간은 2001년 4월에 시작되어 2003년 12월에 완료되는 국내 최고층 주거용 건축물로서 순수 주거 건축물로서는 세계에서 가장 높은 건축물로 기록되고 있다. 본 프로젝트에서는 콘크리트에 관한 여러 가지 새로운 기술이 적용되었는데, 기초 부분에는 삼성물산과 삼성중공업, 삼우설비건설턴트가 건설 신기술로 지정 받은 순환형 파이프쿨링 시스템(closed pipe cooling system)과 무다짐 콘크리트가 국내에서 처음으로 적용되어 공기 단축 및 시공성 개선에 큰 역할을 하였으며, 기둥과 코어 월에는 16시간만에 거푸집 탈형이 가능한 조기강도 발현 콘크리트를 개발하여 적용함으로써 층당 0.5일 이상의 공기를 단축할 수 있었다. 또한, 기둥 부재에는 국내에서 처음으로 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트를 적용하여 실용화에

성공함으로써 초고강도 콘크리트 시대를 여는 시발점이 되었으며, 콘크리트 강도 수준에서도 선진국 대열에 동참할 수 있게 되었다. 따라서, 본고에서는 국내 최초로 적용된 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트를 적용하기 위한 재료검토 및 배합설계를 비롯하여, 현장적용시 콘크리트의 제조, 운반 및 타설 등에 대한 내용과

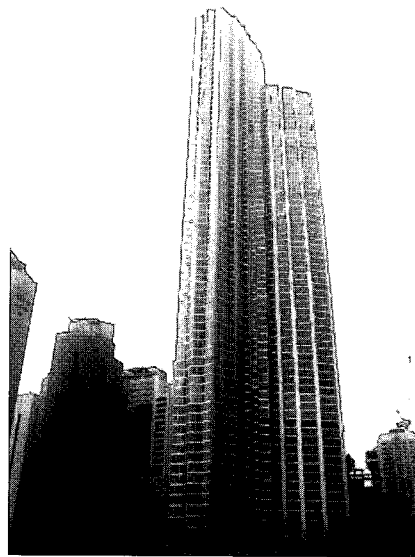


사진 1. 타워팰리스 3차 J.V 현장 전경

그에 따른 경제성 검토에 대해서 소개하고자 한다. <사진 1>은 타워팰리스 3차 J.V 현장 전경을 나타낸 것이다.

2. 콘크리트 강도기준

본 프로젝트의 설계는 기본설계의 경우 초고층 빌딩 설계로 유명한 미국의 SOM사에서, 실시설계는 삼우건축 설계사무소에 의해서 각각 수행되었다. <표 1>은 본 프로젝트에 적용된 콘크리트의 강도기준을 나타낸 것이며, <그림 1>은 층별 기둥 및 코어 부재의 콘크리트 강도를 나타낸 것이다.

3. 초고강도 콘크리트의 제조

3.1 초고강도 콘크리트 제조 흐름도

초고강도 콘크리트의 제조를 위하여 기

표 1. 구조설계 강도기준

구분	세부사항(kgf/cm ²)
콘크리트 강도	- RC 코어 : 500, 400
	- SRC 기둥 : 800, 600, 400
	- 벨트 월 : 800, 600
	- 지상층 슬래브 : 240
	- 기초부 : 400, 300

* 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 타워팰리스 3차 J.V 현장 소장

** 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

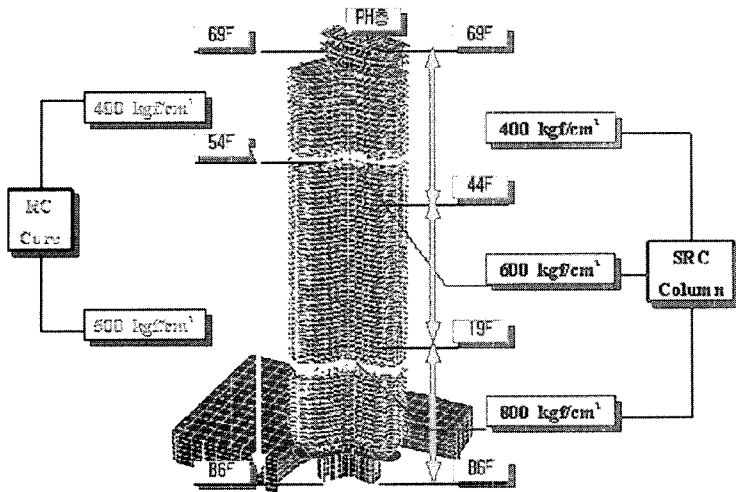


그림 1. 층별 기둥 및 코어 부재의 콘크리트 강도

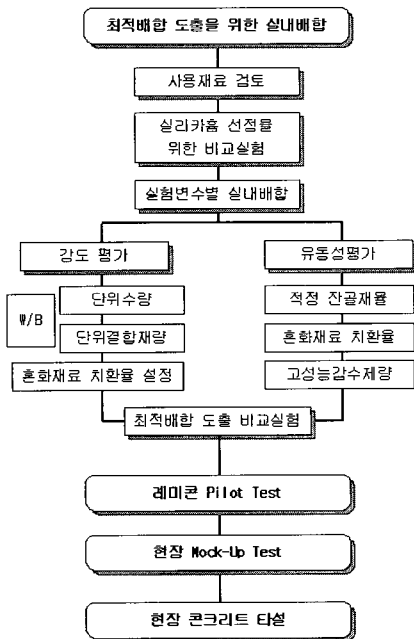


그림 2. 설계강도 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트 제조 흐름도

준의 고강도 콘크리트 시공자료를 근거로 하여 최적배합을 도출하기 위한 실험변수를 설정하였으며, 그에 따른 실험계획을 수립하여 실험을 진행하였다. <그림 2>는 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트의 제조 흐름도를 나타낸 것이다.

3.2 품질관리기준

<표 2>는 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트의 품질관리기준을 나타낸 것이다.

3.3 사용재료

고품질의 초고강도 콘크리트 제조를 위해서는 시멘트, 골재, 혼화제 및 혼화제에 대한 사전검토를 통하여 재료 선정 및 관리에 상당한 주의를 기울여야 한다.

3.3.1 시멘트

시멘트는 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리 화학적 성질은 <표 3>과 같다.

표 2. 설계강도 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트의 품질관리기준

구분	설계강도	800 kgf/cm ²	
	부재종류	기둥 및 벨트 월	
	배합강도(kgf/cm ²)	900	
관리기준	규격	20-800-23	
	Slump(cm)	초기(공장)	23 ~ 25 cm 이상(50 ± 5 cm)
		60분(현장)	21 ~ 24 cm 이상(35 ~ 50 cm)
	Flow(cm/cm)		
	공기량	3 ± 1 %	
	1일 강도(kgf/cm ²)	≥ 100	
	28일 강도(kgf/cm ²)	≥ 720(F _c 의 90 %)	
91일 강도(kgf/cm ²)	≥ 800		

표 3. 시멘트의 물리 화학적 성질

비중	분말도 (cm ² /g)	응결도(h : m)		화학성분(%)		강열감량 (%)	안정도 (%)	압축강도(kgf/cm ²)		
		초결	중결	MgO	SO ₃			3일	7일	28일
3.15	3,267	3:55	5:46	2.06	1.89	0.79	0.06	202	301	416

표 4. 골재의 물리적 성질

골재	최대골재크기(mm)	조립률(F.M.)	비중	흡수율(%)
잔골재	-	2.81 ~ 2.83	2.59 ~ 2.62	0.81 ~ 0.98
굵은골재	20	6.43 ~ 6.69	2.63	0.96

3.3.2 골재

굵은 골재는 초고강도 콘크리트의 압축 강도 및 탄성계수에 영향을 미치고, 잔 골재는 콘크리트의 유동성 및 분리 저항성에 상당한 영향을 미치기 때문에 골재의 선정에는 주의를 기울여야 한다. 굵은 골재는 최대크기가 20 mm이며, 비중이 2.6 ~ 2.7인 부순 골재를 사용하였으며, 잔 골재(모래)의 경우에는 4개 사 모두 바다 모래를 세척한 세척사를 사용하였다. 여기서 잔 골재는 콘크리트의 점성이나 유동성 확보 차원에서 조립률이 2.85 ± 0.5인 모래를 사용하였다. 본 배합에 사용된 잔 골재 및 굵은 골재의 레미콘 공장별 물리적 성질을 <표 4>에 나타내었다.

3.3.3 실리카 폼

초고강도 콘크리트의 경우 양질의 실리카 폼을 사용하고 적절한 배합, 타설 및 양생을 실시하면 수화반응 초기부터 실리카 폼의 포졸란 반응이 시작되어 공극 충전 효과에 따른 강도 증진과 투기 및 투수성의 감소, 중성화 속도의 감소, 염소이온의 침투방지 등의 효과가 기대된다. 그러나 실리카 폼은 그 조성이나 입자의 크기,

표 5. 실리카 폼의 특성

특징	원산지	SiO ₂ 함량	Bulk Density	강열 감량	평균 입경	Surface Area	비중
제품명	체코	94.0 %	237 kg/m ³	1.48 %	11.03 μm	20 m ² /g	2.21

표 6. 고성능감수제의 물리적 성질 및 화학적 성분

구분	유형	색상	주성분	고형분	pH	비중
응결촉진형	액상	암갈색	나프탈렌계	35.0%	5.66	1.195

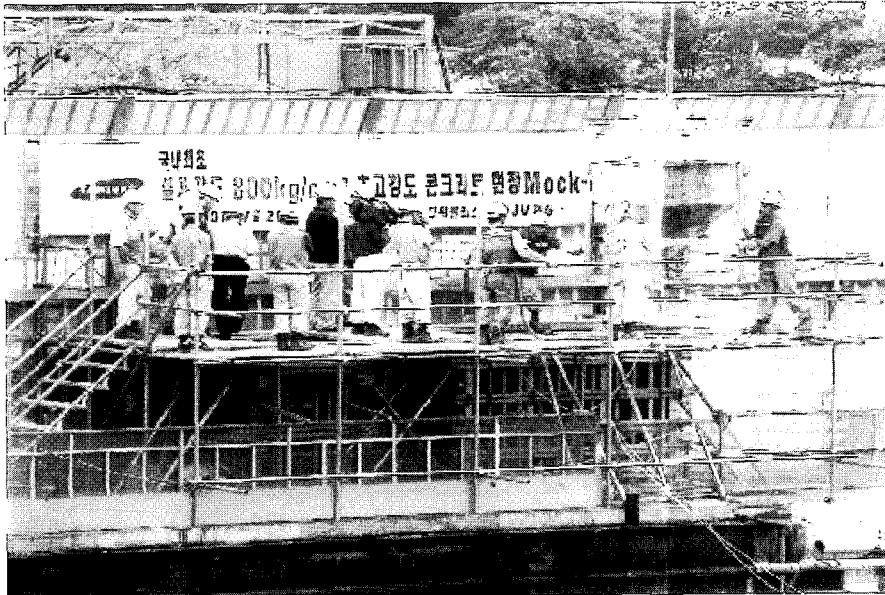


사진 2. Mock-Up Test 전경

표 7. 굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과(Mock-Up Test)

슬럼프(cm)		슬럼프플로우(cm/cm)		공기량(%)		온도(°C)	
공장 (0분)	현장 (60분)	공장 (0분)	현장 (60분)	공장 (0분)	현장 (60분)	공장 (0분)	현장 (60분)
23.5	23.0	42/41	40/39	4.5	2.6	29.9	33.4

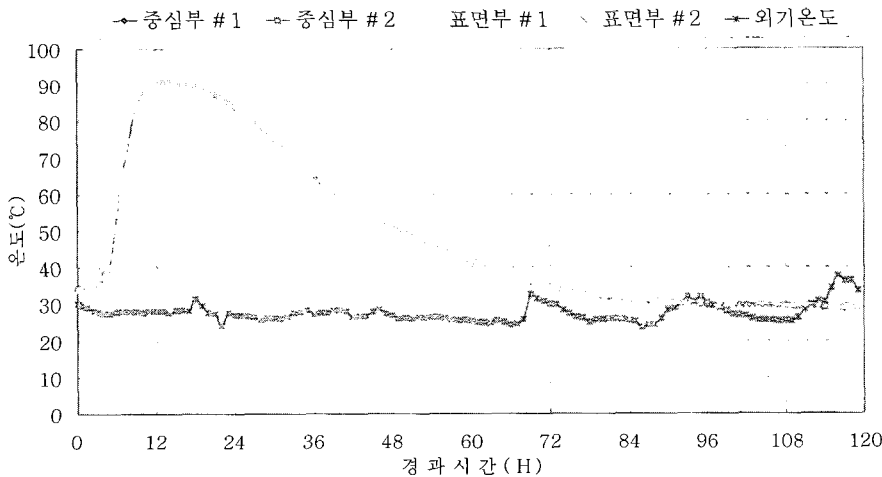


그림 3. 수화열 측정결과(Mock-Up Test)

비중 및 평균입경 등에 따라서 초기 유동성 및 슬럼프 유지성능, 초기강도 발현성 및 장기강도 특성 등에 대해 상당한 차이를 나타낸다. 따라서, 본 프로젝트에서는 콘크리트의 배합설계에 앞서 실리카 폼 첨가에 따른 콘크리트의 응결특성, 초기강도(16시간) 발현특성, 초기유동성, 슬럼프 유지 성능 및 장기강도 발현특성을 비교 평가하여 해당 제품을 최종 선정하였다. 이번 프로젝트에 사용된 실리카 폼의 특성은 <표 5>와 같다.

3.3.4 혼화제(고성능 감수제)

초고강도 콘크리트의 제조에 사용된 고성능 감수제는 배합 수량을 줄이고 유동성 확보의 역할뿐만 아니라 기둥 부재의 초기 강도 발현에 영향을 주는 것으로서 타워펠리스 1차 현장에서 사용하였던 응결 촉진형 고성능 감수제인 D사 제품을 사용하였으며, 그에 대한 물리적 성질 및 화학적 성분을 <표 6>에 나타내었다.

3.4 현장 Mock-Up Test

현장 Mock-Up Test는 실 부재와 동일한 단면의 부재를 제작하여 현장 상황과 유사한 조건 속에서 수행함으로써 현장 타설 시 콘크리트의 품질에 문제가 발생하지 않도록 하기 위한 사전 실물 모형 실험이다. 본 실험에서는 적절한 다짐방법 및 다짐시간, 양생방법, 거푸집 존치기간 등을 결정하고, 굳지 않은 콘크리트의 물성시험과 경화 콘크리트의 재령별 압축강도를 측정하였다. <사진 2>는 Mock-Up Test 전경을 나타낸 것이다.

3.4.1 굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과

굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과를 <표 7>에 나타내었다.

3.4.2 수화열 측정결과

Mock-Up Test 부재의 수화열 측정결과를 <그림 3>에 나타내었다.

〈그림 3〉에 나타난 것처럼 부재 중심부의 최고온도는 약 91℃로 상당히 높은 값을 나타내었으며, 온도 상승값은 약 60℃ 정도로 측정되었으며, 최고 온도에 도달하는 시간은 타설 후 약 14시간이 소요되었다.

4.4.3 경화콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 측정결과

경화 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 〈표 8〉에 나타내었으며, 또한 초고강도 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위한 탄성계수를 측정하였으며, 이 결과를 ACI 363 식의 값과 비교하여 〈표 9〉에 나타내었다. 〈표 8〉에 나타난 재령별 강도 결과는 표 2의 강도 관리기준을 모두 만족하였으며, 실 부재에서 채취한 코어 시편의 재령 91일 강도 또한 설계강도를 상회하였다. 코어 시편의 재령 1일 강도가 635 kgf/cm²로 높게 나타난 것은 내부 수화열에 의해서 강도 발현이 촉진되었기 때문이다. 〈표 9〉는 탄성계수 측정결과이며 재령 28일의 경우 측정값이 ACI 363 제안값보다 다소 작게 나타났으나, 재령 91일에서는 측정값이 더 크게 나타나 장기 재령으로 갈수록 탄성계수 측정값이 계산값보다 커지는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

4. 초고강도 콘크리트의 시공

도곡동 타워팰리스 3차 J.V 현장의 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트의 첫 타설은 지하 6층의 기둥부재에 적용되었다. 이것은 최적배합 도출을 위해 수행하였던 실내배합, 레미콘 시험생산 및 현장 Mock-Up Test 등 일련의 과정을 통해 국내 최초이자 국내 최고의 초고강도 콘크리트를 실 구조물에 처음으로 시공하였다는 점에서 큰 의의가 있다.

4.1 실리카 폼 수급계획

초고강도 콘크리트의 제조에 가장 중요한 재료인 실리카 폼의 원활한 현장 공급

표 8. 경화 콘크리트의 압축강도 측정 결과(Mock-Up Test)

시편 구분	재령별 압축강도(kgf/cm ²)/(강도발현율, %)						
	1일	3일	7일	14일	28일	56일	91일
표준 공시체	361 (45.1)	508 (63.5)	607 (75.9)	672 (84.0)	793 (99.1)	844 (105.5)	872 (109)
코어시편	635 (79.4)	-	703 (87.9)	-	723 (90.4)	773 (96.6)	812 (101.5)

※ () : 설계기준강도(800 kgf/cm²)에 대한 압축강도의 비

표 9. 탄성계수 측정결과(Mock-Up Test)

시험구분	탄성계수(× 106 kgf/cm ²)		
	재령 28일	재령 56일	재령 91일
현장제작 표준 공시체	3.56	3.69	3.95
ACI 363 제안값	3.64	3.68	3.77
현장채취 코어 시편	3.48	3.57	3.64
ACI 363 제안값	3.52	3.58	3.61

표 10. 800 kgf/cm² 강도 월별 타설량 및 실리카 폼 소요량

구분	월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	총량
800 kgf/cm ² 소요량(m ³)		402	648	788	622	2,058	979	328	5,825
Silica Fume 소요량(ton)		22	36	44	34	114	54	18	322

표 11. 각 레미콘 공장별 실리카 폼 저장용량

공장구분	A사	B사	C사	D사
실리카 폼 사일로 용량	30 ton (50 ton)	30 ton (50 ton)	50 ton (80 ton)	60 ton (100 ton)
저장 빈	1.8 ton (3 ton)	6.0 ton (10 ton)	3.0 ton (5 ton)	4.8 ton (8 ton)

※ ()는 시멘트 기준이며, 시멘트 용적은 실리카 폼 용적의 0.6배로 계산하였음.

을 위하여 현장에서의 월별 타설량과 레미콘 각 사별 설비용량을 조사하고 이에 따른 실리카 폼의 수급계획을 수립하였다. 〈표 10〉은 800 kgf/cm² 강도 월별 타설량 및 실리카 폼 소요량을 나타낸 것이며, 〈표 11〉은 레미콘 각 사별로 실리카 폼 저장 사일로의 중간 저장 빈(service bin)의 용량을 조사하여 나타낸 것이다.

4.2 현장공급 및 시험계획

초고강도 콘크리트의 생산시 레미콘공장에서의 배합시간은 강제식 믹서의 경우 120 ~ 150초, tilting mixer의 경우 7분으로 계획하였으며, 차량 1대당 상차되는

콘크리트 물량은 믹서기 부하 등을 고려하여 5 m³로 결정하였다. 현장에서의 타설 시간을 고려하여 차량 배차 간격을 10 ~ 15분으로 설정하였으며, 현장에서의 워커 빌리티 확보를 위해 공장에서의 생산 플로우를 50 ± 5 cm가 되도록 골재 표면수 보정 등의 사전 품질관리를 실시하도록 하였다. 이러한 생산에서 운반 및 타설까지의 일련의 과정을 도식화하여 〈그림 4〉에 나타내었다.

4.3 현장적용

설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트의 현장 타설 결과 양호한 유동성으로 현장에서의 작업성이 우수하였으며, 물

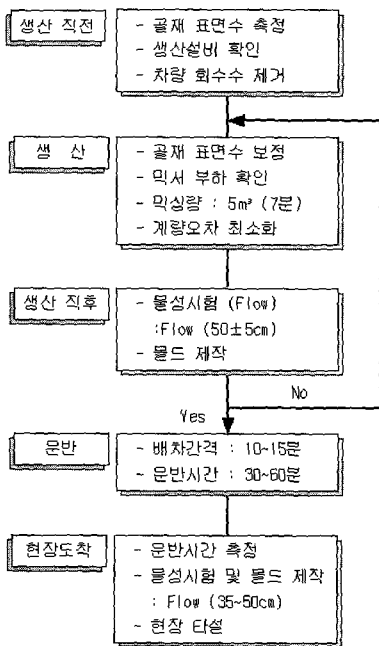


그림 4. 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트 현장공급 및 시험계획

성시험 결과도 양호한 것으로 나타났다. 기둥 부재의 거푸집 탈형은 16시간만에 이루어졌으며, <사진 3> 및 <사진 4>는 타설 전경과 거푸집 해체 후의 기둥 모습을 나타낸 것이다.

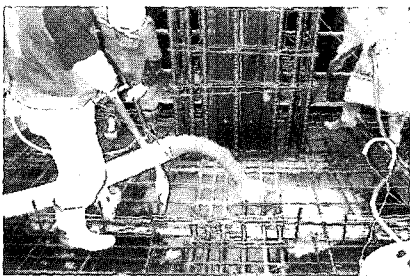


사진 3. 기둥부재 타설 전경

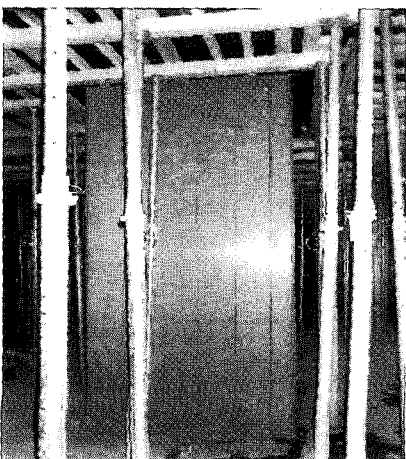


사진 4. 거푸집 해체 후의 기둥

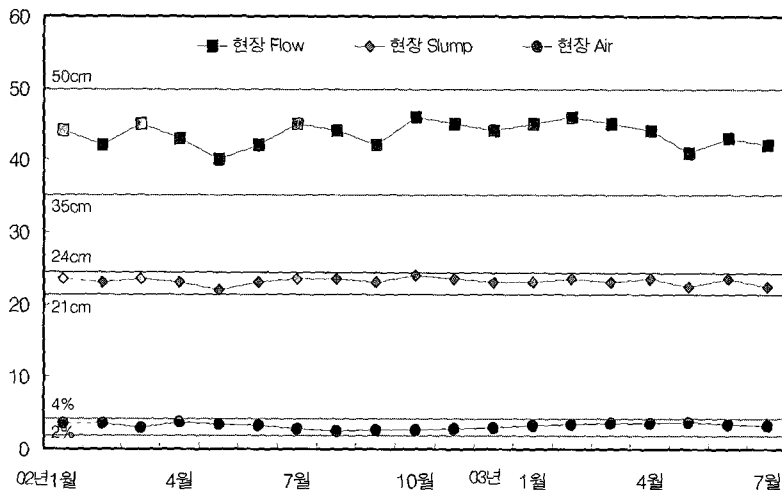


그림 5. 굳지 않은 콘크리트 물성시험 결과(현장타설, 4개사)

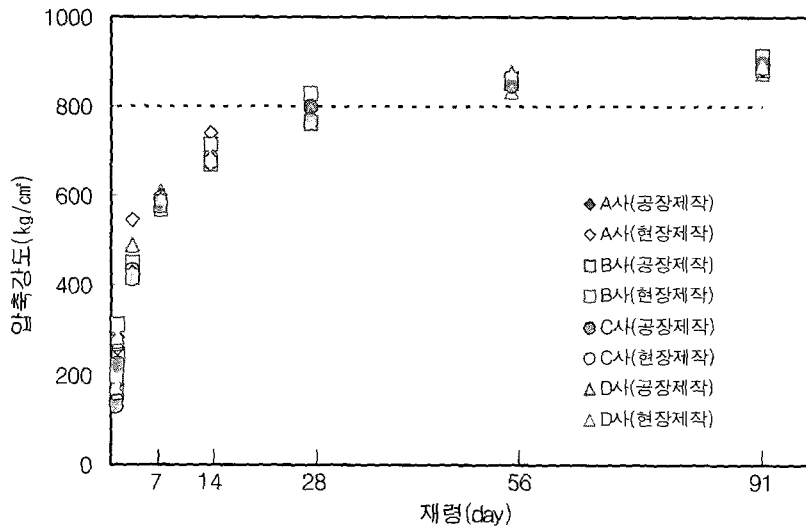


그림 6. 재령별 압축강도 측정 결과(현장타설, 4개사)

4.4 현장적용결과

4.4.1 굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과

4개 레미콘공장에서 현장에 공급한 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과를 <그림 5>에 나타내었다.

4.4.2 경화 콘크리트의 압축강도 측정 결과

4개 레미콘 공장에서 현장에 공급한 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트의 압축강도 측정결과를 <그림 6>에 나타내었다. 압축강도의 측정은 초기(16시간, 1일, 3

일), 중기(7일, 14일, 28일) 및 장기(56일, 91일)로 구분하여 측정하였다. <그림 6>에 나타난 것처럼 초기 재령에서는 4개 레미콘공장의 압축강도 측정결과가 다소 편차를 가지고 분포되었지만, 재령 28일 이후에는 평균값으로 수렴하는 결과를 나타내었다. 장기 재령인 91일에는 4개 사의 압축강도 평균값이 887 kgf/cm²(현장 제작 공시체 기준)로 설계기준강도를 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

5. 800 kgf/cm² 강도 적용 경제성 분석

콘크리트 구조물에 초고강도 콘크리트를

적용하면 건물 강성의 증대, 건물의 경량화로 이어져 경제적인 설계가 가능하게 되는 등 건축물의 설계 및 시공에 많은 영향을 끼칠 수 있다. 본 프로젝트에서는 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트의 기둥 부재 적용으로 인한 구조·시공적 측면과 경제적 측면의 장점을 종합적으로 검토하였다. 기둥 부재에 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트가 적용되면서 SRC 기둥의 단면적은 약 10% 정도 감소하였으며, 내부의 철골 물량은 층별로 다소 차이는 있으나 최대 69%까지 감소되어 경제성 측면에서도 큰 효과를 얻을 수 있었다. 결과적으로 당초 계획하였던 설계강도 500 kgf/cm²인 고강도 콘크리트를 적용하였을 경우의 골조 비용과 800 kgf/cm² 강도를 적용한 경우의 골조 비용을 비교하면, 골조 비용만으로 평가할 때 약 14%의 공사비 절감효과가 발생하였다.

6. 맺음말

국내에서 처음으로 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트를 도곡동 타워팰리스 3차 J.V 현장에 적용한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 레미콘 생산 시와 현장 도착 시의 굳지 않은 콘크리트 물성시험 결과에서 볼 때 슬럼프 및 공기량 측정결과 모두가 기준값을 만족하는 양호한 결과를 보였다. 특히 낮은 물-결합재비와 높은 결합재량으로 인해 콘크리트의 점성이 상당히 높기 때문에 현장에서의 소요 워커빌리티 확보가 문제시되었지만, 반복 실시한 시험생산을 통해 충분한 유동성을 확보함으로써 현장에서의 작업성이나 시공성 측면에서 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 레미콘 4개 사 모두가 현장 타설을 위한 800 kgf/cm² 초고강도 콘크리트를 공급하였으며, 그 때의 굳지 않은 콘크리트 물성시험 결과는 모두가 기준값을 만족하는 양호한 결과를 나타내었다. 경화 콘크리트의 압축강도 측정결과에서도 조기강도 품질기준을 만족하고, 기준 재령인 91 일에는 4개 사 평균 887 kgf/cm²로서 설계기준강도를 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 국내에서는 처음으로 설계강도 800 kgf/cm²인 초고강도 콘크리트의 현장 타설을 성공적으로 수행하였다. 이것은 최적 배

합도출을 위하여 수행하였던 실내배합, 레미콘 시험생산 및 현장 Mock-Up Test 등 일련의 과정을 거치면서 기술연구소와 타워팰리스 3차 J.V 현장의 기술력과 조직력의 시너지 효과를 극대화함으로써 가능하였으며, 동종 타사에 비하여 보다 우수한 고강도 콘크리트의 배합설계 능력과 시공 능력을 확인하는 계기가 되었다. □

참고문헌

1. "초고층 RC빌딩에 적합한 고강도 콘크리트의 물성 개선에 관한 연구", 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 2002. 2.
2. "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", 일본건축학회, 1996.
3. 신성우, 윤영수, 이승훈, 안종문, 백승준, "1,200 kgf/cm² 초고강도 콘크리트의 고층주상복합 구조물에서의 시공 및 특성화 연구", 한국콘크리트학회 학술발표, 제7권 2호, 1995. 10.
4. 신성우, 이광수, 윤영수, 이승훈, "초고층 주상복합 건물에서의 초고강도 콘크리트의 시공 및 구조성능", 한국콘크리트학회 학술발표, 제 6권 2호, 1994. 10.