우성 캐릭터 199에 고강도 콘크리트 적용에 관한 연구

The Application of High Strength Concrete on Woo-Sung Character 199 Project

신 성 우* 안 종 문** 김 원 섭**** 김 세 현****
Shin, Sung-Woo Ahn, Jong-Mun Kim, Won-Seop Kim, Se-Hyoun

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate material properties and quality control of cast-in-place high strength concrete. High strength concrete with a design strength of 420 kgf/cm^2 is successfully produced at a ready-mixed concrete plant, and placed at a tall building. Many laboratory and field tests are carried out for the successful construction of the reinforced high strength concrete building.

As the results of this study, the average actual 28-day compressive strength is 513 kgf/cm^2 and the coefficient of variation is 6.8%. The placing speed is comparable to normal strength concrete, however, the pump pressure is higher than that of normal strength concrete. To prevent cracks of massive and long concrete members, the control of hydration heat and shrinkage is very important.

1. 서 론

고강도 콘크리트는 국내의 경우, 1980년대 후반부터 고강도 콘크리트에 관한 본격적인 연구가 시작되었으며, 최근에 들어 건설 관련 연구소 및 대학 연구실을 중심으로 하여 실용화 및 특성 규명을 위한 연구가 활발히 수행되고 있다[1)2)3)]. 국내에서 고강도 콘크리트를 실제 구조물에 사용한 예는 극히 드물며, 그 중에서도 건축구조물에 전면적으로 사용한 경우는 여러가지 제약 요인들로 인해 전무한 실정이었다. 그러나, 1994년에 들어와 고층 건물에 400 kg/cm^2 이상의 고강도 콘크리트가 본격적으로 사용되기 시작하고 있어[4)] 앞으로 그 적용이 급격히 늘어날 것으로 예상된다.

현재, 국내의 고강도 콘크리트 관련 연구를 분야별로 고찰해 보면 재료 특성, 역학적 성질, 구조적 성질 등에 관해서는 비교적 많은 연구가 수행되어 있으나, 실제 현장에서의 연구 및 적용 결과가 적을 뿐만 아니라, 실제 건축 구조물에 사용된 예가 드물기 때문에 장기간에 걸쳐 대량으로 제조되고 시공되었을 때의 품질관리수준이나 품질관리방안, 문제점, 시공방법 등에 관한 연구보고는 전무한 실정이다. 따라서, 고강도 콘크리트의 범용화를 이루기 위해서는 이에 대한 많은 연구와 개선이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 장기간에 걸쳐 건축물에 시공된 고강도 콘크리트의 작업성 특성, 강도발현 특성, 품질변동 등을 통계적으로 분석하고, 그 결과를 토대로 하여 고강도 콘크리트의 적절한 품질관리방안을 제시하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 공 사 개 요

대상 구조물은 초고층 주상복합건물로서 총 건물 높이는 139m(지하 포함, 지상 31층, 지하 4층)이다. 이와 같은 구조물에 보통강도 콘크리트를 사용하게 되면 수직부재의 크기가 증가하여 비효율적인 공사가 되며, 주거 및 상업공간 등이 줄어들게 된다. 또한, 공사기간도 길어지며 공사비도 상승하는 단점이 있다. 따라서, 건물설계단계에서부터 고강도 콘크리트의 사용을 고려하게 되었다.

건물 공사에 사용된 콘크리트의 최대 설계기준 압축강도는 420 kg/cm^2 이며, 층이 올라감에

* 정회원, 한양대학교 건축공학과, 부교수
** 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정
*** 우성건설, 현장소장
**** 우성건설, 공사차장

따라 설계기준강도는 감소한다. 각 층별, 부위별 콘크리트의 설계기준 압축강도 및 예상 사용량은 표 1과 같다.

표 1 고강도 콘크리트 타설부위

압축강도 (kg/cm^2)	타설량 (m^3)	타설 부위
420	15,000	지하 4층~지하 1층 수직부재 및 기초
360	2,000	1층~4층 수직부재(옹벽포함)
300	2,500	5층~10층 수직부재
240	60,000	상기 부위를 제외한 모든 부위

3. 예 비 실 험

3.1 1차 실내실험

3.1.1 실험계획

본 실험은 건축 구조물에 타설될 고강도 콘크리트의 작업성 및 강도확보에 중점을 두고 수행되었으며, 물-결합재비, 단위결합재량, 혼화제 종류 및 첨가량, 플라이애쉬 치환여부를 변수로 두었다. 고강도 콘크리트의 경우 단위시멘트량의 증가로 인해 매스 콘크리트에 타설시 수화열응력에 의한 균열 발생이 문제점으로 대두되고 있는데; 적용대상 구조물은 고층건물로서 지하 및 하부에는 매스 콘크리트 부재가 많으므로 국내에서 콘크리트 제조용으로 사용가능한 원재료를 고려해 볼 때 플라이애쉬가 가장 경제적으로 수화발열량을 저감시킬 수 있으므로 본 실험에서는 플라이애쉬 사용을 기본전제로 하였다.

표 2 1차 실내실험 기본 배합비

공시체 번호	단위량 (kg/m^3)					SP
	W	C	FA	S	G	B×(%)
1	162.6	542.0	0	678.0	1024.9	1.83
2	162.6	487.8	54.2	653.4	1029.5	2.03
3	172.4	522.5	0	700.9	1016.7	1.52
4	172.4	444.1	78.4	662.7	1001.6	1.72
5	170.3	473.1	0	727.0	1012.3	1.32
6	170.4	378.6	94.6	705.5	1023.3	1.52

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 점성이 높아 작업성이 불량하므로 고슬럼프가 필요한데, 본 실험에서는 모든 배합에 대하여 초기 슬럼프가 21cm 정도를 나타내도록 고성능감수제 첨가량을 조절하였다.

각 배합의 배합비는 위의 표 2와 같고, 각 배합에 대하여 ϕ10×20cm 공시체를 제작하여, 3, 7, 28, 56, 90, 180일 재령의 압축강도를 측정하였다.

3.1.2 사용 재료

시멘트는 T사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트(비중 3.15, 비표면적 3315 cm^2/g, 28일 압축강도 407 kg/cm^2)를 사용하였으며, 플라이애쉬는 보령화력발전소산 유연탄 플라이애쉬를 정제한 제품(비중 2.17, 강열감량 4.82, 비표면적 3365 cm^2/g)을 사용하였다. 잔골재는 조립율 2.66의 인천산 세척사를 사용하였으며, 굵은골재는 최대크기 25mm의 쇄석을 사용하였다. 고성능감수제는 나프탈린계의 제품을 사용하였다.

3.1.3 실험 결과 및 고찰

그림 1은 물-결합재비 30, 33, 36% 배합에 대한 장기강도 발현특성을 나타낸 것인데, 재령 28일 압축강도는 감소하나 90일 이상의 장기재령에서는 강도역전현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 물-결합재비가 3% 증가함에 따라 압축강도가 50 kg/cm^2 정도 감소하여 고강도 영역에서 콘크리트의 압축강도가 물-결합재비에 상당히 민감하게 반응함을 알 수 있다.

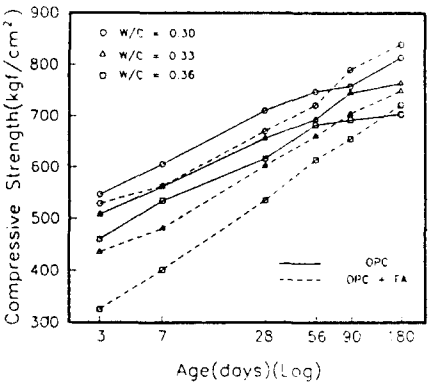

그림 1 플라이애쉬의 장기강도 발현 특성

3.2 2차 실내실험 및 실기실험

3.2.1 실험계획

본 실험은 1차 실내실험을 통하여 얻은 고강도 콘크리트의 강도 및 작업성 특성에 기초하여 구조물에 타설될 고강도 콘크리트 배합비

결정을 목적으로 수행되었다. 설계기준강도 420 kg/cm^2 의 고강도 콘크리트를 레미콘을 사용하여 구조물에 성공적으로 타설하기 위해서 시멘트만을 사용한 배합과 플라이애쉬를 사용한 배합을 결정하고 실내실험을 통하여 압축강도 및 작업성을 측정한 후 최종적으로 레미콘 실기실험을 통하여 물성을 평가하였다. 표 3은 2차 실내실험 및 실기실험 배합비이다.

표 3 2차 실내실험 및 실기실험 배합비

공시체 번호	단위량 (kg/m^3) W	C	FA	S	G	SP B×(%)	비고
2-1	174	498	0	738	970	1.6	실내실험
2-2	175	450.5	79.5	672.2	978.5	1.5	실내실험
2-3	168	406	89	743	964	1.6	실내실험
R-1	174	498	0	748	959	1.9	실기실험
R-2	175	450.5	79.5	687	962	2.0	실기실험

3.2.2 실험 결과 및 고찰

2차 실내실험 및 실기실험 배합에 대한 압축강도 측정 결과는 표 4와 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 온도가 낮은 동절기나 지연형 고성능감수제를 사용한 경우에는 3일 재령의 압축강도가 낮게 발현됨을 알 수 있다. 그러나 재령 7일 이후에는 콘크리트의 초기 온도나 고성능감수제의 지연성능 여부에 관계없이 유사한 강도발현율을 나타내었다. 동일한 배합에 대하여 실내실험과 레미콘 실기실험을 수행한 결과 공장 실험에서는 실험실 실험에 비하여 강도손실이 10% 이상 발생하여 실제 레미콘 배합설계시에는 레미콘 출하 공장과 실내 실험에서의 강도발현 차이를 분석하여 이를 콘크리트 배합설계에 적절하게 반영하여야 할 것으로 판단된다. 표 5는 R-2 배합에 대한 슬럼프 손실 실험 결과로서 콘크리트 제조후 100분까지도 슬럼프 18cm 이상의 양호한 작업성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 4 압축강도 측정 결과

공시체 번호	압축강도 (kg/cm^2) 3일	7일	14일	28일	비고
2-1	307	512	582	653	동절기, 지연형 SP제
2-2	403	497	-	622	표준형 SP제
2-3	346	483	-	601	지연형 SP제
R-1	302	465	520	585	동절기, 지연형 SP제
R-2	320	446	-	551	표준형 SP제

표 5 R-2 배합 슬럼프 손실 실험 결과

경과시간 (분)	0	20	40	60	80	100	120
슬럼프 (cm)	22.6	23.5	21.2	21.2	19.0	19.0	15.0

3.3 현장 실험

3.3.1 배합강도

본 연구에서는 고강도 콘크리트 출하 예정 레미콘 공장에서 보통강도 콘크리트에 대하여 적용하고 있는 변동계수, 예비실험 결과, 국내에서의 고강도 콘크리트 현장 적용 결과 및 실시공 결과 등을 기초로 하여 설계기준강도 420 kg/cm^2 콘크리트의 압축강도에 대한 변동계수를 11%로 정하고 배합설계를 실시하였다.

변동계수를 11%로 둘 경우 KS F 4009에 따르면 배합강도는 500 kg/cm^2, ACI 고강도 콘크리트 위원회 보고서[6]에 따르면 493 kg/cm^2 가 되는데, 본 연구에서는 KS F 4009에 따라 500 kg/cm^{2}를 배합강도로 정하였다.

3.3.2 배합비

앞에서도 언급한 바와 같이 고강도 콘크리트가 타설되는 부분은 지하 및 저층 부위로서 부재치수가 큰 매스 콘크리트 구조물이 많기 때문에 수화열응력에 의한 균열 발생 위험을 줄이기 위하여 최초 배합설계단계에서부터 플라이애쉬의 사용을 고려하였으며, 강도와 작업성이 허용하는 범위내에서 결합재량을 줄이기 위해 노력하였다. 현장 실험에서는 레미콘 공장에서 제조되어 운반된 고강도 콘크리트가 적절한 작업성 및 강도를 확보하고 있는지를 검사하고, 모의 벽체 및 매스 콘크리트 부재를 제작하고 열전대를 매립하여 수화열을 측정하였으며, 벽체의 경우는 코아를 채취하여 구조체에 타설된 고강도 콘크리트가 설계기준강도를 확보하고 있는가에 대하여 실험하였다. 현장 실험에 사용된 배합비는 표 6과 같다.

표 6 현장 실험 배합비

W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m^3) W	C	FA	S	G	SP B×(%)
33.9	43.6	168	396.5	99.1	754.0	966.8	2.0

3.3.3 압축강도 및 작업성 경시변화

표 7은 레미콘 차량으로 운반된 고강도 콘크

리트에 대한 시간경과에 따른 슬럼프 및 슬럼프 플로우, 압축강도 실험결과이다. 이때, 레미콘 차량의 운반시간은 40분 이었으며, 실험조건은 콘크리트 온도 26℃, 대기온도 25℃ 이었으며, 압축강도실험은 28일 재령에서 수행하였다.

표 7 압축강도 및 작업성 경시 변화

측 정 항 목	경과시간 (분, 콘크리트 제조직후부터)				
	40	60	80	100	120
슬 럼 프 (cm)	24	22	22	21	19
슬럼프 플로우 (cm)	40	38	35	32	29
압축강도 (kg/cm^2)	540	539	532	528	530

표에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 제조후 2시간 경과후에도 슬럼프 19cm, 슬럼프 플로우 29cm 정도의 양호한 작업성을 나타내어, 현장에서 만일에 발생할지도 모르는 사태(펌프카 고장, 배관 막힘 등)에 대비한 여유시간을 확보할 수 있었다. 또한, 압축강도는 시간경과에 따라 거의 변화되지 않는 결과를 나타내었다.

3.3.4 구조체 코아 강도

각 재령에 따른 코아 공시체 및 표준양생 공시체의 압축강도는 표 8과 같다.

표에서 알 수 있는 바와 같이 모든 종류의 공시체가 재령 28일에서 설계기준강도를 상회하였으며, 플라이애쉬를 결합재 대비 20% 사용한 결과 재령 28일 이후의 장기재령에서도 강도증진율이 높은 것으로 나타나, 실제 구조부재에 본 연구에서 설정한 배합으로 고강도 콘크리트를 타설시 콘크리트 압축강도 면에서는 충분한 여유치가 있음을 알 수 있다.

재령 28일 압축강도를 기준으로 했을 때, 코아 공시체는 표준양생 공시체에 비하여 98% 정도 발현되어 높은 강도발현율을 나타내었는데, 그 주된 이유중의 하나가 고온양생시 플라이애쉬의 강도증진 효과로 사료된다.

표 8 코아 및 표준양생 공시체 압축강도

공시체 종류	압축강도 (kg/cm^2)				
	1일	3일	7일	28일	56일
코아 (φ10×20cm)	204	300	365	464	511
코아 (φ15×30cm)	-	303	311	442	493
표준 (φ10×20cm)	-	272	327	482	543
표준 (φ15×30cm)	-	271	316	445	541

4. 현 장 타 설

4.1 타설 및 품질관리 방법

본 현장타설에서는 슬럼프값 18cn 이상의 범위에서 콘크리트 유동성 변화를 잘 나타낸다고 판단되는 슬럼프 플로우값(슬럼프 실험후 시료의 퍼진 넓이를 측정한 값)을 작업성을 판정하는 기준으로 정하였다. 본 현장에 타설되는 고강도 콘크리트 슬럼프 플로우의 관리치는 1, 2차 실내실험, 공장실기실험, 현장실험을 통하여 45±10cm 로 정하였다.

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 점성이 크므로 콘크리트 압송시 장비(펌프카 등)에 더 많은 부하가 걸린다. 본 현장타설에서는 펌프카의 압력을 적절히 조절하고, 배관 부위에 에어벤트를 설치하여 유입된 공기를 배출하는 방법으로 콘크리트 압송을 원활하게 하였다.

시간당 타설량을 측정한 결과 동일한 장비로 레미콘 트럭 1대 분량($6m^3$)을 타설할 때 걸리는 시간은 보통강도 콘크리트의 경우와 유사하게 10분정도 소요되었다.

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 재료분리 및 블링이딩 현상은 훨씬 줄어들었으나 수직부재(기둥) 타설시에는 과밀배근 및 타설면과 타설장비(배관 끝 부분)의 높이차로 인한 재료분리를 방지하기 위하여 트레미관을 이용하여 보 하단까지 1차타설한 후 보 상단과 슬래브를 일반적인 방법으로 동시에 타설하였다(그림 2 참조). 한편, 보와 슬래브는 보통강도 콘크리트를 사용하도록 구조설계되어 있으므로 고강도 콘크리트와 보통강도 콘크리트 경계부위의 콜드 조인트를 방지하기 위하여 고강도 콘크리트 타설을 완료한 직후 보통강도 콘크리트를 타설하였다.

타설현장의 기초부위는 두께가 2m인 매스 콘크리트이므로 고강도 콘크리트를 사용할 시에는 균열발생이 우려되어 3등분 분리타설하였는데 1차 타설후 양생포를 덮고 살수하여 3일간 습윤양생을 실시하고 2차, 3차 타설을 실시하였다. 습윤양생시 소성수축, 건조수축 및 수화열에 의한 균열방지를 위하여 살수시점은 콘크리트 응결이 끝난 시점 및 수화열 측정기로 부재 내부온도 및 표면온도를 측정하면서 내·외부 온도차가 줄어드는 시점으로 하였다.

고강도 콘크리트를 사용한 1200×1200×

5000mm 매스 콘크리트 기둥 부재의 경우에는 12mm 합판 거푸집을 사용하여 타설하였으며, 내부 수화열에 의한 온도상승을 측정하였다 또한, 동일한 조건에서 거푸집 조건에 따른 수화발열 성상을 검토하기 위하여 합판 거푸집에 단열재로 10mm 압출 스티로폴을 댄 기둥에 대해서도 내부 수화열에 의한 온도변화를 측정하였다.

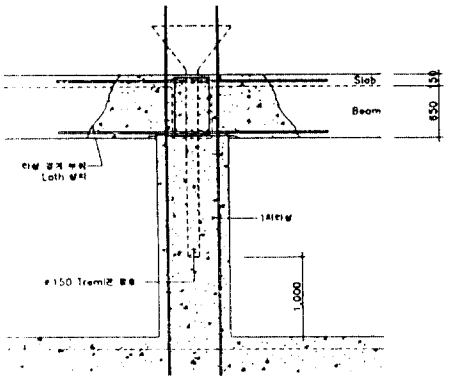

그림 2 기둥 및 보, 슬래브 타설 방법

4.2 품질관리 결과 및 분석

4.2.1 고강도 콘크리트의 강도 및 작업성

표 9는 1995년 5~9월에 현장에 타설된 고강도 콘크리트의 압축강도 실험결과를 통계적으로 요약한 것이다. 배합강도는 500kg/cm^{2}로 정하였는데, 실제로 타설된 고강도 콘크리트의 평균압축강도는 513kg/cm^{2}로 목표배합강도를 약간 상회하는 수준이었다. 한편, 초기재령일수록 변동계수가 커지는 현상을 나타내었는데, 그 이유로는 초기재령에서는 압축강도 수준이 상대적으로 낮고 압축강도가 콘크리트의 초기온도, 초기양생조건 등에 의한 영향을 더 많이 받기 때문으로 사료된다. 그림 3은 재령 28일 압축강도를 콘크리트 타설순서에 따라 도시한 것인데, 월별 및 계절별로 압축강도에 큰 차이없이 품질관리가 되었음을 알 수 있다.

표 9 압축강도 품질시험결과 요약

항 목	재 령			
	3일	7일	14일	28일
데이타 수	46	47	38	47
평 균 (kg/cm^2)	311	394	441	513
표준편차 (kg/cm^2)	34.68	35.86	34.53	34.86
변동계수(%)	11.15	9.10	7.83	6.80

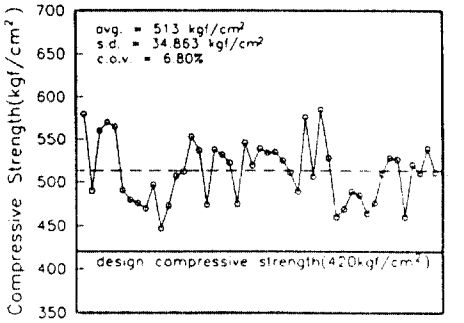

그림 3 타설순서에 따른 압축강도의 변화

그림 4는 슬럼프 플로우와 압축강도의 관계를 도시한 것으로 슬럼프 플로우 35~55cm 범위에서는 슬럼프 플로우값이 증가하여도 콘크리트의 강도감소가 거의 발생하지 않아 콘크리트의 슬럼프값이 클 경우에는 슬럼프 플로우에 의한 관리가 콘크리트 유동성과 압축강도를 동시에 관리할 수 있는 좋은 방법으로 판단된다.

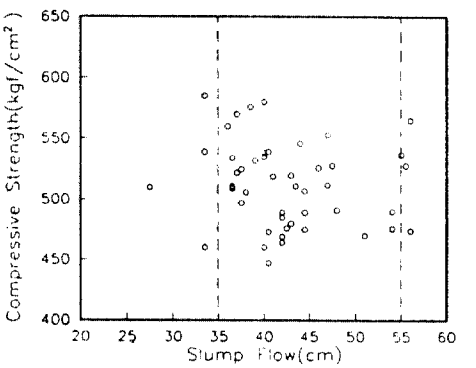

그림 4 Slump Flow에 따른 압축강도의 변화

4.2.2 매스 콘크리트 부재 수화열 관리

그림 5는 1200×1200×5000mm 기둥에 대한 수화열 측정결과를 도시한 것이다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 거푸집만을 사용한 기둥의 중심부는 최고온도가 79℃로 나타났고, 스티로폴을 사용한 기둥의 중심부 최고온도는 81℃로 나타나 최고온도에 있어서는 스치로폴을 사용한 경우가 2℃ 높았으나 부재 내·외부 온도차는 스치로폴을 사용한 경우가 11℃, 거푸집만을 사용한 경우가 18℃로 나타나 매스 콘크리트 부재에서는 스치로폴 등을 사용하여 적절하게 단열보양을 실시하면 수화열응력에 의한 균열

발생 위험성을 현저히 줄일 수 있는 것으로 판명되었다. 또한, 수화열응력에 의한 위험을 줄이기 위해서는 강도 및 작업성이 확보되는 범위내에서 시멘트의 사용량을 줄이고 플라이애쉬 등의 결합재를 사용하는 것이 좋으며, 시공시 적절한 타설 및 보양 방법을 선정하여 균열 발생 위험을 줄이는 것이 중요한 것으로 사료된다. 한편, 거푸집 탈형후 기둥표면을 육안관찰한 결과 모든 기둥에서 균열은 발생하지 않았다.

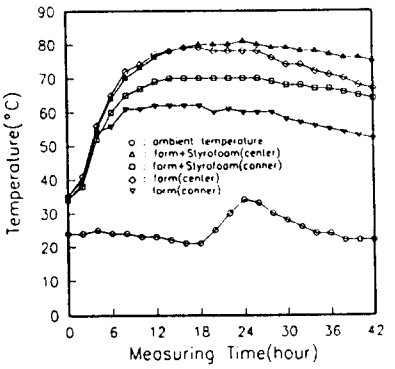

그림 5 보양방법에 따른 1200×1200 ×5000mm 기둥에 대한 수화열 측정 결과

5. 결 론

현장타설 고강도 콘크리트의 강도발현 특성, 품질변동, 시공방법에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 원재료 및 배합비를 최적으로 선택하고, 적절한 품질관리를 수행한 결과 고강도 콘크리트 제조후 2시간까지도 적절한 작업성 확보가 가능하다.
2) 플라이애쉬를 사용한 고강도 콘크리트 코아 공시체의 압축강도는 표준양생 공시체의 98% 수준으로 매우 양호한 결과를 나타내었다.
3) 재령 28일 압축강도를 기준으로 할 때, 현재까지 타설된 고강도 콘크리트의 평균압축강도는 513 kg/cm^2, 변동계수는 6.8%로서, 목표로 한 배합강도 500 kg/cm^2, 변동계수 11%와 비교할 때 매우 양호하였다.
4) 고강도 콘크리트는 점성이 높아 펌프압송시 부하가 많이 걸리고 표면 마무리 작업에 어려움이 있으므로 펌프카 압력조절, 배관에 공기배출구 설치, 정확한 위치에 정량 타설 등의 시공방법이 필요하다.
5) 플라이애쉬를 20% 치환첨가하여 사용한 결과 고강도 콘크리트의 수화발열을 상당히 줄일 수 있었다.
6) 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 블리이딩 발생이 적어 넓은 기초판 등에 타설할 시에는 표면건조 등에 의한 소성수축균열 발생위험이 높으므로 균열방지를 위해서는 일정기간이 지난후 살수(3시간후), 거푸집 존치(3일)의 적절한 기간이 필요하다.
7) 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 유동성이 커 거푸집 사이의 작은 틈으로도 시멘트 페이스트가 유출되어 부재 외관을 손상시킬 수 있으므로 치밀한 거푸집 조립이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김 진근, 김 상식, 오 병환, 신 성우, "고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구(I)," 과학기술처 특정과제 보고서, 1988, 200 pp.
2. 신 성우외 7인, "분당 삼성 초고층 APT에 500kg/cm^{2}이상의 고강도콘크리트 시공 및 구조적 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제2권, 제2호, 1990, pp. 185-186
3. 신 성우외 5인, "현장실용화를 위한 고강도 콘크리트의 레미콘 제조 및 생산," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제7권, 제1호, 1995, pp. 189 -194.
4. 정 재동외 3인, "650 kgf/cm^2 고강도 콘크리트 한중시공 사례 보고," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제6권, 제1호, 1994, pp. 260-265.
5. 신 성우외 8인, "초고층 주상복합건물의 초고강도 콘크리트의 시공 및 구조적 성능," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제6권, 제2호, 1994, pp. 313-318.
6. ACI Committee 363, "State-of the Art Report on High-Strength Concrete," (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, 48 pp.