

# 저발열 고강도 레미콘 제조 및 통계적 품질관리

## Production and Statistical Quality Control of Low-Heat High Strength Ready-Mixed Concrete

박 연 동<sup>1)</sup>      노 재 호<sup>2)</sup>      한 정 호<sup>3)</sup>      김 훈<sup>4)</sup>  
Park, Yon-Dong,    Noh, Jae-Ho,    Han, Chung-Ho,    Kim, Hoon

### ABSTRACT

In this study, the quality control of high strength ready-mixed concrete with design compressive strength of 420 kgf/cm<sup>2</sup> placed at a tall building for a long period is statistically investigated. The amount of cast-in-place high strength concrete is by about 15000m<sup>3</sup>.

The required average compressive strength is 500 kgf/cm<sup>2</sup> according to KS F 4009 with assumed coefficient of variation of 11%. Since there are many mass concrete members in this construction, fly ash is used to reduce the heat of hydration of concrete.

As the results of this study, the average actual 28-day compressive strength is 498 kgf/cm<sup>2</sup> and the coefficient of variation is 6.7%. The placing speed is comparable to normal strength concrete, however, the pump pressure is higher than that of normal strength concrete.

### 1. 서 론

최근까지 고강도 콘크리트의 사용은 토목 구조물에 국한되어 있었으며, 건축 구조물의 경우는 강도수준이 비교적 낮거나 시험타설 수준에 그치고 있었다. 그러나 1994년부터 건축분야에서도 고강도 콘크리트가 본격적으로 사용되기 시작하였으며,<sup>(1)</sup> 그 사용은 급격히 증가할 것으로 예상된다.

고강도 콘크리트는 실제 건축 구조물에 사용한 예가 드물기 때문에 레미콘 공장에서 장기간에 걸쳐 대량으로 제조되고 현장에서 시공되었을 때의 품질관리수준이나 품질관리방

안, 문제점, 시공방법 등에 관한 연구보고는 전무한 실정이다. 따라서, 고강도 콘크리트의 범용화를 이루기 위해서는 이에 대한 많은 연구와 개선이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 논문에서는 장기간에 걸쳐 고층 건축물에 시공된 고강도 콘크리트의 압축강도 발현 특성, 작업성 특성, 품질변동 등을 통계적으로 분석하고 그 결과를 토대로 하여 적절한 품질관리방안을 제시하는데 그 목적이 있다.

고강도 콘크리트 시공 대상 구조물은 고층 주상복합건물로서 지상 31층, 지하 4층, 총 건물 높이는 139m이다. 이와 같은 고층 구조물에 보통강도 콘크리트를 사용하게 되면 수직 부재의 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.

- 1) 정희원, 동양중앙연구소 선임연구원, 공박
- 2) 정희원, 동양중앙연구소 선임연구원
- 3) 정희원, 동양중앙연구소 주임연구원
- 4) 정희원, 동양중앙연구소 연구원

현재까지 타설된 고강도 콘크리트의 양은 약 15,000m<sup>3</sup> 이며, 설계기준 압축강도는 420 kgf/cm<sup>2</sup> 이다.

## 2. 현장 실험

### 2.1 배합강도

고강도 콘크리트 출하 예정 레미콘 공장의 품질관리 수준, 보통강도 콘크리트에 대하여 적용하고 있는 변동계수, 예비실험 결과를 토대로 하여 분석해 본 결과 설계기준강도 420 kgf/cm<sup>2</sup> 콘크리트의 변동계수는 10% 정도가 적절한 것으로 판단되었으나, 출하 실적이 많지 않았기 때문에 이에 대한 안전율로 변동계수를 10% 할증하여 최종적으로 11%로 결정하였다.

변동계수를 11%로 둘 경우 KS F 4009에 따르면 배합강도는 500 kgf/cm<sup>2</sup>, ACI 고강도 콘크리트 위원회 보고서에 따르면 493 kgf/cm<sup>2</sup>가 되는데, 본 연구에서는 KS F 4009에 따라 500 kgf/cm<sup>2</sup>로 결정하였다.

### 2.2 배합비

고강도 콘크리트가 타설되는 부분은 건물의 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. 한편, 동일 물-결합재비에서 결합재량이 줄게 되면 콘크리트의 점성이 증가하게 된다. 따라서, 펌프카 작업시 높은 압력으로 인한 작업 곤란을 방지하기 위하여 작업성 확보에도 중점을 두었다. 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. 현

장 실험에 사용된 배합비는 표 1과 같다.

표 1. 현장 실험 배합비

단 위 량 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (kg/m <sup>3</sup> )
W	C	FA	S	G	
173	397	99	754	967	7.94

### 2.3 구조체 코아 강도

모의벽체의 양생은 건축현장에서 일반적으로 행하는 방식대로 하였으며, 압축강도 실험용 코아 공시체는 벽체의 중심부에서 수평방향으로 채취하였다. 각 재령에 따른 코아 공시체 및 표준양생 공시체의 압축강도는 표 2와 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 압축강도면에서는 충분한 여유치가 있음을 알 수 있었다. 재령 28일과 56일 압축강도를 기준으로 했을 때  $\phi 15 \times 30$ cm 공시체는  $\phi 10 \times 20$ cm 공시체에 비하여 코아 공시체의 경우는 96% 정도 발현되었으며, 표준양생 공시체의 경우도 96%가 발현되어 유사한 경향을 나타내었다. 재령 28일 압축강도를 기준으로 했을 때, 코아 공시체는 표준양생 공시체에 비하여 98% 정도 발현되어 높은 강도발현율을 나타내었는데, 그 주된 이

표 2. 코아 및 표준양생 공시체 압축강도

공시체 종류	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
	1일	3일	7일	28일	56일
코아 ( $\phi 10 \times 20$ cm)	204	300	365	464	511
코아 ( $\phi 15 \times 30$ cm)	-	303	311	442	493
표준 ( $\phi 10 \times 20$ cm)	-	272	327	482	543
표준 ( $\phi 15 \times 30$ cm)	-	271	316	445	541

유중의 하나가 고온양생시 플라이에쉬의 강도 증진 효과로 사료된다.

### 3. 현장 타설

#### 3.1 타설 및 품질관리 방법

건축물에 고강도 콘크리트를 타설할 시에는 원활한 작업을 위하여 일반적으로 슬럼프값을 18cm 이상으로 하여 타설한다.<sup>(2)</sup> 그러나, 슬럼프값의 경우, 18cm 이상에서는 콘크리트 유동성 및 작업성이 변화되어도 슬럼프값의 차이가 크게 나타나지 않아 슬럼프값에 의한 품질관리는 적절하지 못한 것으로 판단되었다. 따라서, 본 현장타설에서는 슬럼프값 18cm 이상의 범위에서 콘크리트 유동성 변화를 잘 나타낸다고 판단되는 슬럼프 플로우값(슬럼프 실험후 시료의 퍼진 넓이를 측정한 값)을 작업성을 판정하는 기준으로 정하였다.

시간당 타설량을 측정한 결과 동일한 장비로 레미콘 트럭 1대 분량(6m<sup>3</sup>)을 타설할 때 걸리는 시간은 보통강도 콘크리트의 경우와 유사하게 10분 정도 소요되었다. 타설후 마감작업에 있어서는 고강도 콘크리트의 높은 점성 때문에 더 많은 인력이 필요하였으며, 마감작업의 효율을 높이기 위해서는 이동의 어려움 때문에 타설작업시 정확한 위치에 정확한 양을 타설하는 것이 중요한 것으로 판단되었다.

#### 3.2 품질관리 결과 및 분석

표 3은 약 1년여 동안에 걸쳐 현장에 타설된 고강도 콘크리트의 압축강도 실험결과를 통계적으로 요약한 것이다. 목표 배합강도는 앞서도 언급한 바와 같이 변동계수를 11%로 가정하여 KS F 4009에 따라 500 kgf/cm<sup>2</sup>로 정하였다. 실제로 타설된 고강도 콘크리트에 대한 통계적 분석 결과, 평균압축강도는 498 kgf/cm<sup>2</sup>로 목표배합강도와 거의 유사하였으며, 변동계수는 6.71%로 나타났는데, 관리목표로 정한 11%보다 상당히 낮아 품질관리가 매우 잘 된 것으로 나타났다.

한편, 초기재령일수록 변동계수가 크게 나타나고 있는데(재령 180일은 실험치 갯수가 5

개밖에 되지 않으므로 분석에서 제외), 그 이유는 초기재령에서는 압축강도 수준이 상대적으로 낮고 압축강도가 콘크리트의 초기온도, 초기양생조건 등에 의한 영향을 더 많이 받기 때문으로 사료된다. 여기서, 특기할 만한 사항은 재령에 따른 변동계수의 증감은 있으나 표준편차는 전 재령에서 거의 동일한 값을 나타내고 있다는 점이다.

표 3. 고강도 콘크리트 압축강도 품질 시험결과 요약

항 목	재 령(일)						
	3	7	14	28	56	90	180
데이터 수	28	40	26	43	35	21	5
평균 (kgf/cm <sup>2</sup> )	296	384	443	498	565	608	677
표준편차 (kgf/cm <sup>2</sup> )	33.2	30.3	29.1	33.4	32.0	33.1	56.2
변동계수 (%)	11.2	7.89	6.57	6.71	5.66	5.44	8.30

표 4는 고강도 콘크리트 타설 현장 실험실에서 측정한 실험치에 대한 분석 결과인데, 표 3의 결과와 거의 유사하게 결과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

표 4. 고강도 콘크리트 압축강도 품질 시험결과 요약 (현장)

항 목	재 령(일)			
	3일	7일	14일	28일
데이터 수	46	47	38	47
평균 (kgf/cm <sup>2</sup> )	311	394	441	513
표준편차 (kgf/cm <sup>2</sup> )	34.68	35.86	34.53	34.86
변동계수 (%)	11.15	9.10	7.83	6.80

그림 1은 재령 28일 압축강도를 콘크리트 타설순서에 따라 도시한 것인데, 월별 및 계절별로 압축강도에 큰 차이가 나타나지 않아 품질관리가 잘 되었음을 알 수 있다.

그림 2은 재령 7일 및 재령 28일 압축강도 분포도를 정규분포곡선과 함께 도시한 것인데, 실험치의 숫자가 많지 않은 관계로 인해 흠이 다소 심하나 정규분포에 가까운 분포를 나타냄을 알 수 있다.

그림 3은 재령 28일 압축강도를 기준으로 하여 각 재령별 상대압축강도비를 도시한 것이다. 고강도 콘크리트의 경우, 보통강도 콘크리트에 비하여 초기재령 강도 발현율이 높는데, Parrott<sup>(3)</sup>은 고강도 콘크리트의 재령 7일과 재령 28일 압축강도의 비가 0.8~0.9 정도라고 보고하였다. 또한, Carrasquillo 등<sup>(4)</sup>은 재령 7일과 95일 압축강도비가 고강도 콘크리트에서는 0.73 정도임을 밝혀냈다.

본 연구의 결과는 재령 7일과 28일의 압축강도비가 0.77, 재령 7일과 90일의 압축강도비가 0.63으로서 기존의 연구결과보다 낮는데, 이는 구조물에 타설된 고강도 콘크리트가 수화열을 저감시킬 목적으로 저발열로 배합설계되어 플라이애쉬를 다량 함유하고 있기 때문에 초기강도가 낮게 장기강도는 높게 발현되었기 때문으로 판단된다.

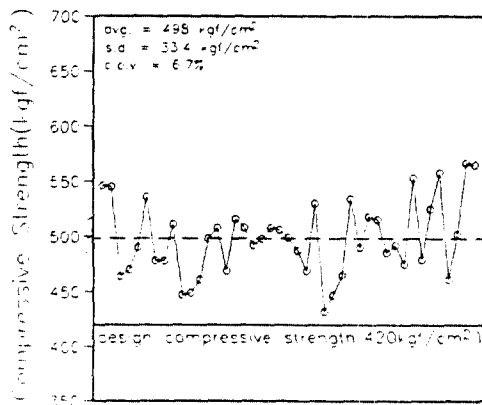
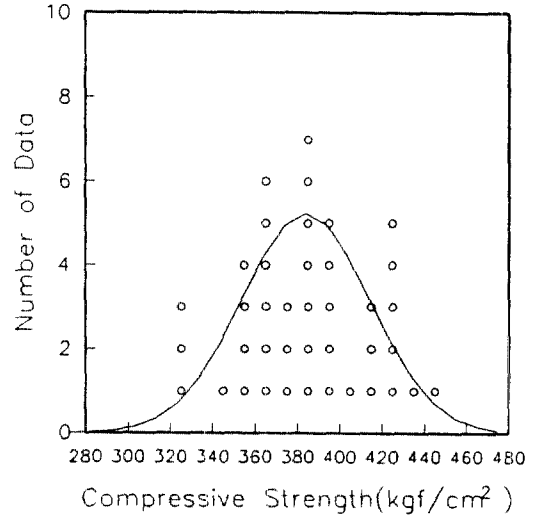
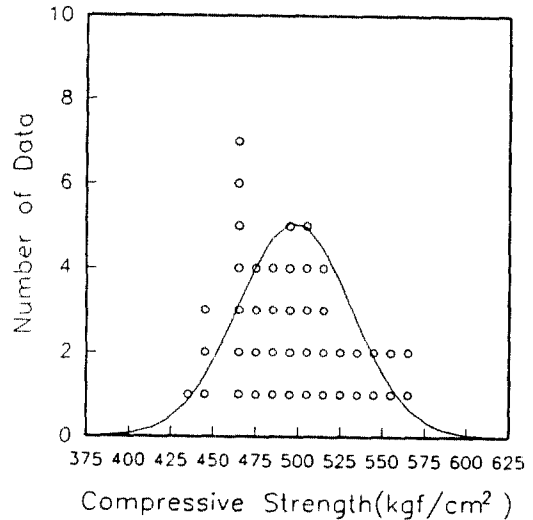


그림 1. 타설순서에 따른 콘크리트 압축강도의 변화



(a) 재령 7일 압축강도



(b) 재령 28일 압축강도

그림 2. 콘크리트 압축강도 분포도

### 3.3 매스 콘크리트 부재 수화열 관리

그림 4는 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 스티로폴을 사용한 경우가 2℃ 높았으나 부재 내·외부 온도차는 스티로폴을 사용한 경우가 11℃, 거

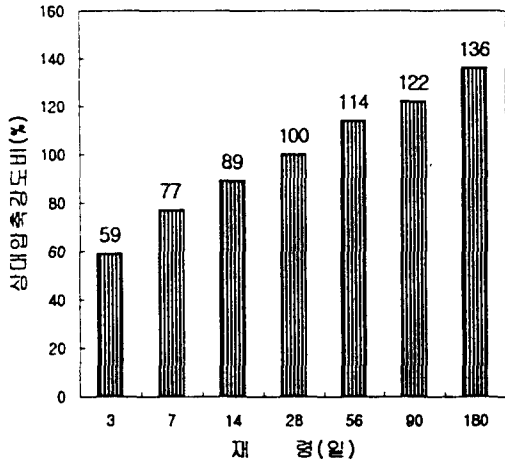


그림 3. 각 재령별 상대압축강도비

푸집만을 사용한 경우가 18℃로 나타나 매스 콘크리트 부재에서는 스티로폴 등을 사용하여 적절하게 단열보양을 실시하면 수화열응력에 의한 균열 발생 위험성을 현저히 줄일 수 있는 것으로 판명되었다. 한편, 거푸집 탈형후 기둥표면을 육안관찰한 결과 모든 기둥에서 균열은 발생하지 않았다.

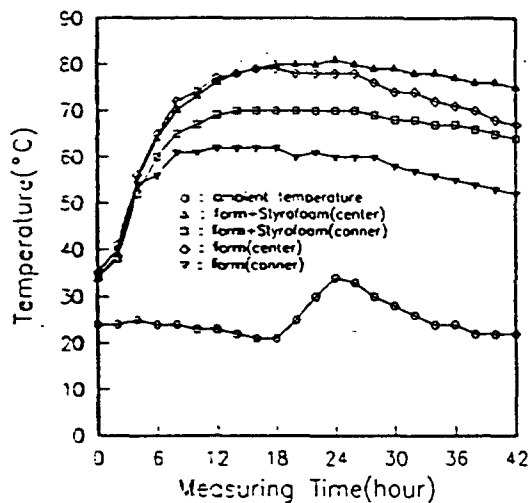


그림 4. 보양방법에 따른 1200×1200×5000mm 기둥에 대한 수화열 측정 결과

고강도 콘크리트는 단위시멘트량이 많아 보통강도 콘크리트에 비하여 수화발열량이 많다. 따라서, 수화열응력에 의한 위험을 줄이기 위해서는 강도 및 작업성이 확보되는 범위내에서 시멘트의 사용량을 줄이고 플라이애쉬 등의 결합재를 사용하는 것이 좋다. 또한, 시공시 적절한 타설 및 보양 방법을 선정하여 균열발생 위험을 줄이는 것이 중요하다. 또한, 수화열에 대한 현장관리 기술자나 기능공들의 재인식이 필요한 것으로 판단되며, 대형 구조물의 경우 반드시 수화열로 인한 균열발생 방지대책을 수립한 후 공사를 수행하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

장기간에 걸쳐 고층 건축 구조물에 타설된 고강도 콘크리트의 강도발현 특성, 품질변동, 시공에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령 28일 압축강도를 기준으로 할 때, 현재까지 타설된 고강도 콘크리트의 평균 압축강도는 498 kgf/cm<sup>2</sup>, 변동계수는 6.7%로서, 목표로 한 배합강도 500 kgf/cm<sup>2</sup>, 변동계수 11%와 비교할 때 매우 양호하였다.
- 2) 플라이애쉬를 사용한 고강도 콘크리트 코아 공시체의 압축강도는 표준양생 공시체의 98% 수준으로 매우 양호한 결과를 나타내었다.
- 3) 고강도 콘크리트의 타설속도는 보통강도 콘크리트와 유사하였으나, 기초 표면 마무리 작업에서는 보통강도 콘크리트에 비하여 더 많은 인력이 소요된다.
- 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) 메스 콘크리트 타설시에는 분리타설, 보양 방법 개선 등에 의해 수화열응력에 의한 균열발생을 방지할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구의 자료확보에 많은 도움을 주신 우성건설 도곡동 캐릭터 199 현장 김원섭 소장님, 김세현 차장님을 비롯한 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 신성우 외 8인, "초고층 주상복합건물예의 초고강도 콘크리트의 시공 및 구조적 성능," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제6권, 제2호, 1994, pp. 313-318.
- 2) 日本建築學會, "高強度コンクリート技術の現状," 1991, 290 pp.
- 3) Parrot, L.J., "The Properties of High Strength Concrete," Technical Report No. 42.417, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1969, 12 pp.
- 4) Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads," ACI J., V. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 171-178.