

# 초고층 주상복합구조물에 적용한 고강도 콘크리트의 배합설계 및 품질관리 시스템에 관한 연구

## A Study On the Mix Design and Quality Control System of High Strength Concrete for the Construction of High Rise Complex Structure

김선구\*      이 상 수\*\*      원 철\*\*\*      박 상 준\*\*\*      김 동 석\*\*\*  
Kim Sun Gu      Lee, Sang Soo      Won, Cheol      Park, Sang Joon      Kim, Dong Seok

### Abstract

The purposes of this study were mix design and quality control of high strength concrete for the construction of high rise complex structure. Desired performances of this high strength concrete were slump flow  $50\pm 10\text{cm}$ , air content  $4.5\pm 1.5\%$  and design strength  $400\text{kgf/cm}^2$ . Experimental flow was that optimal mix design was selected in the indoor experiment and after that, producing test was done in the batcher plant. Excellent results of experiment was obtained from binder content  $475\text{kg/m}^3$  with replacement ratio 10% of fly ash. The results of field application of high strength concrete was sufficiently satisfied both flowability and compressive strength.

### 1. 서론

대도시의 인구집중에 따라 토지의 고도이용을 위하여 건물의 고층화 및 복합화에 대한 요구가 점점 더 높아지고 있어, 주거용 아파트에도 초고층 빌딩 개념이 도입되고, 상가 및 커뮤니티 시설 등이 추가되는 주상복합건물의 건설이 증가하는 추세에 있다.

일반적으로, 고층건물은 강성이 높고 시공면에서 유리한 철골조로 건설되는 경우가 많지만, 철골조는 철근콘크리트조에 비해 풍하중에 대한 진동제어가 불리하고 바닥진동이 크기 때문에, 주거를 목적으로 하는 건물에는 더욱 적합하지 않다.<sup>1)~2)</sup> 그러나, 철근콘크리트조는 중량에 비해서 단면의 확대가 불가피하고, 주변환경에 따른 시공의 제약, 품질관리의 어려움 등 구조재료로서 여러 가지 문제점<sup>3)</sup>을 내포하고 있다. 이에 대한 개선책의 일환으로서 단면감소에 따른 공간확보 및 건물의 경량화, 내구성 증진 등이 가능한 콘크리트의 고강도화가 요구되고 있다.

한편, 초고층 건물은 과밀배근에 따른 콘크리트의 충전불량 및 펌프압송에 따른 부하중대 등의 문제가 있으므로, 이를 개선시키기 위하여 유동성 및 충전성 개념이 도입된 고강도 콘크리트가 요구되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 여의도에 국내 최초로 시공되고 있는 지상 41층 규모의 순수 RC조 아파트에 적용하기 위하여, 고유동성을 갖는 고강도 콘크리트의 배합설계를 실시하고, 현장적용시 콘크리트의 제조·생산 및 운반·타설 등에 대한 품질관리를 수행하였다.

\* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 소장  
\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원  
\*\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 주임연구원

## 2. 실험개요

### 2.1 실험계획

본 연구는 순수 RC조 아파트의 저층부에 설계기준강도 400kgf/cm<sup>2</sup>, 배합강도 480kgf/cm<sup>2</sup>(할증계수 1.2)인 고유동성을 갖는 고강도 콘크리트의 배합설계 및 현장품질관리를 위한 것으로, 실험계획은 Table 1.과 같다. 최적배합을 도출하기 위한 변수는 단위결합재량, 플라이애쉬 치환율, 잔골재율이다.

Table 1. 실험계획

실험 변수		
단위결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	450, 475, 500	
플라이애쉬 치환율 (%)	10, 20	
잔골재율 (%)	41, 43	
측정항목	굳지않은콘크리트	슬럼프 플로우, 공기량
	굳은 콘크리트	압축강도

### 2.2 사용재료

#### (1) 시멘트 및 플라이애쉬

시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 플라이애쉬는 보령산 F급 플라이애쉬를 사용하였으며, 품질시험결과는 Table 2. 및 Table 3.과 같다.

Table 2. 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결시간 (h:m)		강열감량 (%)	안정도 (%)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		초결	종결			3일	7일	28일
3.15	3,200	3:50	6:10	0.7	0.05	195	293	397

Table 3. 플라이애쉬의 물리·화학적 성질

비중	분말도(cm <sup>2</sup> /g)	강열감량(%)	습분(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
2.20	3,158	3.57	0.19	56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1

#### (2) 골재

잔골재는 세척사, 굵은골재는 최대치수 20mm의 쇄석으로서, 품질시험결과는 Table 4.와 같다.

Table 4. 골재의 물리적 성질

구분	절건비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	실적율 (%)	단위용적증량 (kg/l)	씻기손실량 (%)
잔골재	2.60	0.84	2.89	62.5	1.624	1.06
굵은골재	2.63	0.65	6.65	56.3	1.481	0.35

#### (3) 화학혼화제

고성능감수제는 모르타르 성능평가지험<sup>4)</sup>을 통하여 점성과 유동성의 상관관계에서 가장 효과적인 것으로 나타난, N사의 고축합형 멜라민계의 고성능감수제를 사용하였고, 품질시험결과는 Table 5.와 같다.

Table 5. 고성능감수제의 물성 및 품질성능

색상	주성분	pH	비중	응결시간차(min)		압축강도비(%)		
				초결	종결	3일	7일	28일
암갈색	멜라민계 (고축합형)	8.0±2.0	1.20±0.02	80	90	136	132	127

### 2.3 콘크리트의 배합

배합설계시 요구되는 콘크리트의 배합조건 및 요구성능은 Table 6.과 같다. 타설대상 부재는 지상 12층 이하의 기둥 및 전단벽체로서 철근 배근이 조밀하므로, 콘크리트를 밀실하게 타설하기 위해, 유동성을 개선시킨 슬럼프 플로우 50cm정도의 고유동화 콘크리트를 채택하였다.

또한, 고강도 콘크리트의 수화열 억제를 위하여, 배합강도 480kgf/cm<sup>2</sup>을 확보하기 위한 단위시멘트량을 최소한으로 하고, 플라이애쉬를 사용하였다.

Table 6. 콘크리트의 배합조건 및 요구성능

배 합 조 건		항 목	목표값
굵은골재 최대치수(mm)	20	설계기준강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	400
물결합재비(%)	40 이하	배합강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	480
단위수량(kg/m <sup>3</sup> )	175 이하	슬럼프 플로우(cm)	50±10
고성능감수제 첨가율(%)	1.6 이하	공기량(%)	4.5±1.5
		염화물 함유량(kg/m <sup>3</sup> )	0.3 이하

### 3. 실내실험 결과 및 분석

#### 3.1 플라이애쉬 치환율별 단위결합재량에 따른 실험결과

플라이애쉬 치환율별 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도 실험결과는 Fig 1. 및 Fig 2.와 같다.

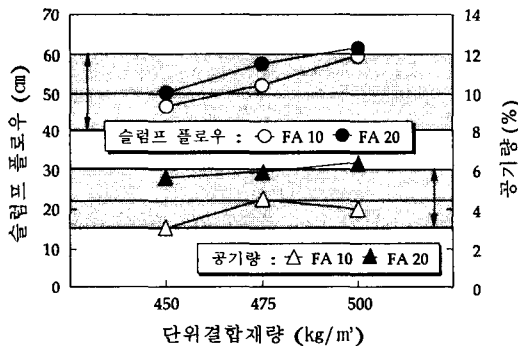


Fig 1. 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로우 및 공기량 실험결과

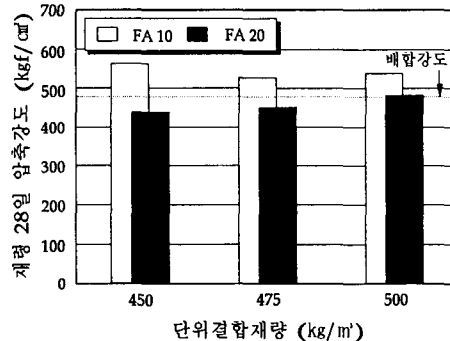


Fig 2. 단위결합재량에 따른 압축강도 실험결과

단위결합재량 475kg/m<sup>3</sup>, 플라이애쉬 치환율 10%의 경우가 굳지 않은 상태에서 가장 양호한 성상을 보였다. 강도발현성상도 재령 28일에 있어서 528kgf/cm<sup>2</sup>를 발현하고 있어, 콘크리트의 요구성능을 만족시키고 있었다.

#### 3.2 잔골재율별 단위결합재량에 따른 실험결과

3.1의 실험결과에서, 플라이애쉬 치환율 20%의 경우는 압축강도 발현율이 낮고, 단위결합재량 500kg/m<sup>3</sup>의 경우는 슬럼프 플로우 및 공기량이 관리한계를 벗어나고 있다.

따라서, 그 이하의 조건에 대하여 잔골재율을 변화시켜, 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도 특성을 실험하였고, 그 결과는 Fig 3. 및 Fig 4.와 같다.

실험결과, 모두 목표값을 만족하고 있었으나, 특히 S/a 43%, 단위결합재량 475kg/m<sup>3</sup>의 경우가 유동성 및 점성이 가장 양호하게 나타나고 있어, 이를 최적배합으로 결정하였다.

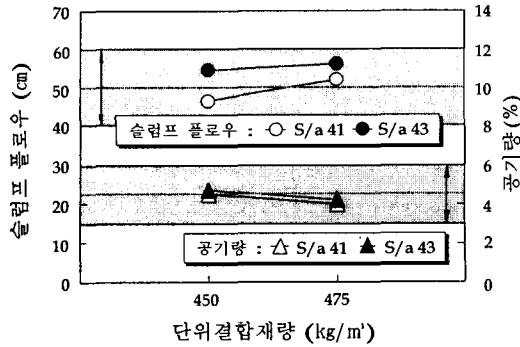


Fig 3. 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로우 및 공기량 실험결과

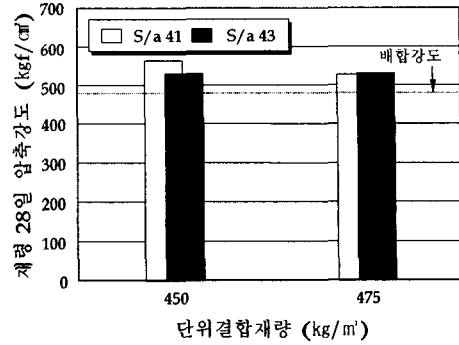


Fig 4. 단위결합재량에 따른 압축강도 실험결과

#### 4. 현장적용 결과 및 분석

##### 4.1 현장개요

적용현장은 당사에서 서울 여의도에 시공중인 대우 트림프 월드 I 신축공사 현장으로서, Fig 5.와 같이 지하 5층, 지상 41층의 RC조로 층수에 따라 콘크리트의 종류가 다르고, 강도 Zoning이 이루어져 있다. 즉, 매트기초( $G_{max}$ :25mm)는 저발열 콘크리트, 기둥 및 전단벽체( $G_{max}$ :20mm)는 설계기준 강도별 4종류, 보 및 바닥슬래브( $G_{max}$ :25mm)는 일반 강도 콘크리트로 각각 구분되었다.

이 중에서 본 연구의 대상은 지상 12층 이하의 기둥 및 전단벽체로서, 콘크리트 시방서에서 규정하고 있는 설계기준강도 400kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 고강도 콘크리트이다.

##### 4.2 레미콘 공장의 선정

고강도 콘크리트를 생산하기 위한 레미콘 공장은 위치, 거리, 생산능력, 혼화재 Silo, 특수 콘크리트 생산실적, 품질시험실의 품질관리 능력을 고려하여, H사, S사 및 Y사의 3개사를 선정하였으나, 레미콘 공장에서의 실내실험 및 배척플랜트 생산성 실험을 통해 최종적으로 H사가 선정되었다. 레미콘 공장에서의 현장까지의 거리는 9km로서 소요시간은 평균 25분 정도였다.

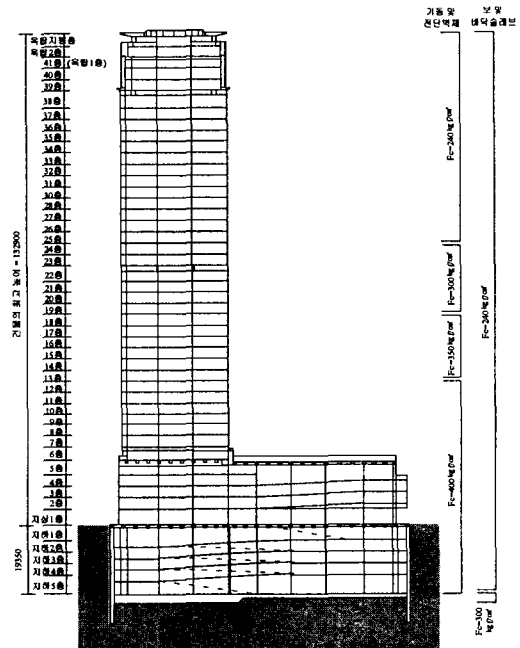


Fig 5. 높이에 따른 강도 Zoning

##### 4.3 레미콘 공장에서의 실험결과 및 분석

실내실험에서 최적으로 선정된 배합이라도, 레미콘 회사별로 사용재료가 다르고, 배척플랜트 생산시에는 약간 상이한 경우가 있으므로, 이의 확인을 위해 레미콘 공장에서의 실내실험 및 배

배치플랜트에서 사전에 생산성 실험을 실시하였다.

레미콘 공장에서 콘크리트 제조에 사용되는 재료에 대한 물성시험을 수행하였으며, 결과는 실내시험에 사용한 재료와 유사하였다. 또한, 콘크리트 제조시의 비빔시간은 고성능감수제의 충분한 분산을 위해 90초로 설정하였고, 재료의 투입은 일괄투입법에 따라 실시하였다.

Table 7.은 선정된 3개 레미콘 공장에서의 실내시험 및 배치플랜트 생산성 실험결과이다. 유동성을 만족시키기 위한 고성능감수제의 양은 실내시험의 경우보다 0.2%정도 증가하였고, 재령별 압축강도 발현성상은 대체적으로 만족하고 있으나, 레미콘사별로 품질관리 수준에 따라 실내와 배치플랜트와의 성능차가 크게 나타나고 있었다.

Table 7. 각 사별 실험결과

구 분	슬럼프플로우 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			7일	28일	
H사	(실내)	55	3.3	442	569
	(B/P)	50	5.4	451	561
S사	(실내)	57.5	5.6	403	495
	(B/P)	50	3.8	360	483
Y사	(실내)	58	5.6	416	576
	(B/P)	50	7.0	312	394

배치플랜트에서 생산되는 고강도 콘크리트의 품질은 골재의 입도·입형·표면수 관리 및 전용 플랜트 설비 여부에 의해 좌우되며, 특히 사용시멘트와 고성능감수제와의 적합성이 매우 중요한 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 품질관리 수준이 가장 양호한 것으로 나타난 H사의 레미콘을 현장에 적용하게 되었으며, 이상의 레미콘 공장에서의 실내시험 및 배치플랜트 생산실험을 통해서 얻어진 최적배합은 Table 8. 과 같다.

Table 8. 최적배합표

W/B (%)	S/A (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	C	FA	S	G	SP	AE
35.0	43.0	166	427	48	723	969	6.65	0.19

#### 4.5 콘크리트 품질관리 및 현장적용 결과

초고층 RC 건축물은 철근 배근이 매우 복잡하여 콘크리트 타설시에 높은 시공성이 요구된다. 따라서, 시공성의 지표인 슬럼프 플로우값의 관리수준을 검토하기 위하여, 본 현장에 기 적용된 약 6,000m<sup>3</sup>정도의 매스 콘크리트 생산실적으로부터 평균값, 표준편차 및 변동계수를 산정하였다.

산정결과, 평균값( $\chi$ )=54.5cm, 표준편차( $\sigma$ )=3.4cm, 변동계수(c)=6.3%였다. 따라서, 슬럼프 플로우의 관리범위는 정규분포상에서 불량율이 최소로 되도록, 목표값의 3배 표준편차 범위에 들어 올 신뢰도를 99.73%로 한 55±10cm를 콘크리트 생산시의 목표값으로 하였다.

현장에 적용된 굳지 않은 고강도 콘크리트의 유동성 실험결과를 Fig 6.에 나타냈다. Fig 6.에서 보듯이, 슬럼프 플로우 및 공기량은 모두 관리범위를 만족하고 있었으나, 슬럼프 플로우의 경우에 관리범위의 하한쪽으로 편심되어 있는 것은 타설부위에 경사를 가진 부재나 계단 부위가 있어 콘크리트 타설 작업이 곤란한 경우가 있기 때문에 유동성 효과를 다소 축소하여 적용한 결과로 사료된다. 또한, 고강도 콘크리트에서는 압축강도가 중요한 품질관리 사항이다. 압축강도 측정결과는 Fig 7.과 같이, 재령 28일 압축강도가 평균 451kgf/cm<sup>2</sup>로 나타나고 있어 배합강도에 미치지 못하는 것이 많지만, 불량율이 없이 모두 설계기준강도 이상을 확보하고 있는 것으로 나타

나고 있었고, 변동계수도 6%로서 콘크리트의 품질관리가 양호했던 것으로 판단된다.

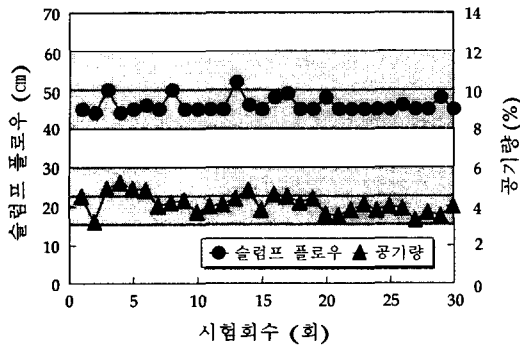


Fig 6. 콘크리트의 유동성 실험결과

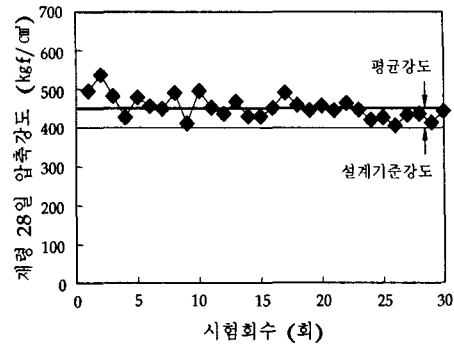


Fig 7. 콘크리트의 압축강도 실험결과

### 5. 결론

본 연구는 국내 최초로 주거를 목적으로 하는 초고층 아파트에 적용하는 고강도 콘크리트의 제조·생산 및 운반·시공에 걸쳐 전반적인 품질관리를 실시한 것으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 현장적용을 위한 고강도 콘크리트를 생산하기 위한 실험 플로우는 실내 최적배합 선정실험 → 레미콘 공장의 사용재료 적합성 판정을 위한 실내실험 → B/P 생산성실험의 단계로 진행되는 것이 최적이라고 판단된다.

2) 현장적용결과, 단위결합재량 475kg/m<sup>3</sup>, 플라이애쉬 치환율 10%, S/a 43%에서 설계기준강도 400kgf/cm<sup>2</sup>이상을 충분히 만족하고 있었다.

3) 콘크리트 생산시의 슬럼프 플로우의 관리기준을 불량율이 최소로 되도록, 목표값의 3배 표준편차 범위에 들어올 신뢰도를 99.73%로 한 55±10cm로 하였으나, 향후에는 보다 엄격한 관리를 위해 표준편차를 2σ로 관리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4) 배척플랜트에서 생산되는 고강도 콘크리트의 품질은 골재의 입도·입형·표면수 관리, 전용 플랜트 설비 여부가 중요하고, 특히 사용시멘트와 고성능감수제와의 적합성에 따라 크게 좌우된다. 따라서, 고강도 콘크리트의 범용화를 위해서는 고강도 콘크리트 전용의 시멘트 개발이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- 1) Robert Englekirk, "Steel Structures : controlling behavior through design", Kin Keong Printing co. Pte. Ltd in Singapore, 1994.
- 2) 박문호, "트럼프월드에 적용된 대우의 기술력", 대우건설기술지 통권 제22호, 2000. 4
- 3) 운영수, 신성우, 장일영, "국내의 고성능 콘크리트에 대한 최근의 연구동향-고강도 콘크리트를 중심으로-", 콘크리트학회지 Vol. 7 No. 5, 1995. 10
- 4) 박철림, 안재현, 권영호, 이상수, "초유동 콘크리트용 모르타의 최적배합설계", 콘크리트학회지, 제10권 3호, 1998.