

# 초고층 주상복합구조물에 적용한 고강도 콘크리트의 사례

- An Introduction to Application of High Strength Concrete for the Construction of High Rise Complex Structure -



김동석\*



박상준\*



원 철\*\*



이상수\*\*



김영진\*\*\*

## 1. 서론

대도시의 인구집중에 따라 토지의 고도이용을 위하여 건물의 고층화 및 복합화에 대한 요구가 점점 더 높아지고 있으며, 도심지에서의 삶의 질을 윤택하게 하기 위한 방법으로서 조망에 대한 욕구가 더 한층 중요시되고 있다. 이러한 이유로 인해 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 철근 콘크리트조에 비해 풍하중에 대한 진동제어가 불리하고 바닥진동이 크기 때문에, 주거를 목적으로 하는 건물에는 더욱 적합하지 않다.<sup>1),2)</sup> 그러나, 철근 콘크리트조는 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 경량

화, 내구성 증진 등이 가능한 콘크리트의 고강도화가 요구되고 있다.

한편, 초고층 건물은 과밀 배근에 따른 콘크리트의 충전불량 및 펌프압송에 따른 부하증대 등의 문제가 있으므로, 이를 개선시키기 위하여 유동성 및 충전성 개념이 도입된 고강도 콘크리트가 요구되고 있다.

따라서, 본고에서는 여의도에 국내 최초로 시공되고 있는 지상 41층 규모의 순수 철근 콘크리트조 아파트에 적용하기 위한, 고유동성을 갖는 고강도 콘크리트의 배합설계를 비롯하여, 현장적용시 콘크리트의 제조·생산 및 운반·타설 등에 대한 품질관리 등을 소개하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험계획

본 연구는 순수 철근 콘크리트조 아파트의 저층부에 설계기준강도 400 kgf/cm<sup>2</sup>, 배합강도 480 kgf/cm<sup>2</sup>(할증계수 1.2, 변동률 10%)인 고유동성을 갖는 고강도 콘크리트의 최적배합을 선정하기 위한 것으로, 실험계획은 <표 1>과 같다. 최적배합을 도출하기 위한 실험변수는 단위결합재량, 플라이 애쉬 치환율, 잔골재율이다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 시멘트 및 플라이 애쉬

시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 플라이 애쉬는 보령산 F급 플라이

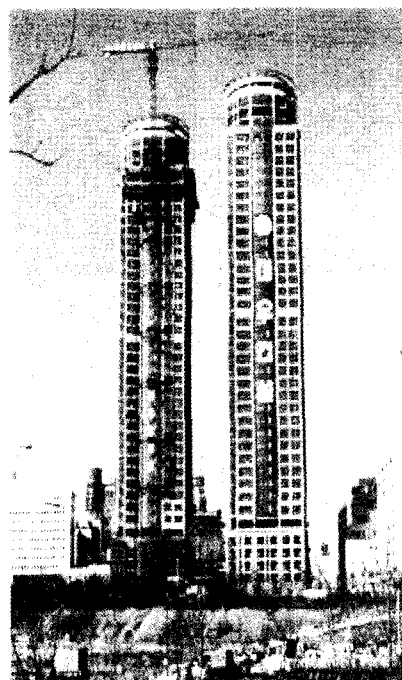


사진 1. 트럼프 월드 I 공사전경

\* 정회원, 대우건설 기술연구소 주임연구원  
\*\* 정회원, 대우건설 기술연구소 선임연구원  
\*\*\* 정회원, 대우건설 기술연구소 수석연구원

표 1. 실험계획

실험요인		수준
단위결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )		450, 475, 500
플라이애쉬 치환율 (%)		10, 20
잔골재율 (%)		41, 43
측정항목	굳지않은 콘크리트	슬럼프 플로우, 공기량
	경화 콘크리트	압축강도

표 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

표 3. 플라이 애쉬의 물리·화학적 성질

비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	화학조성(%)					
				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

표 4. 골재의 물리적 성질

구분	질건비중	흡수율 (%)	조립물 (F.M)	실적물 (%)	단위용적중량 (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

표 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

표 6. 콘크리트의 배합조건 및 요구성능

배합조건		항목	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

애쉬를 사용하였으며, 품질시험결과는 <표 2> 및 <표 3>과 같다.

2.2.2 골재

잔골재는 세척사, 굵은골재는 최대치수 20 mm 쇄석으로서, 품질시험결과는

<표 4>와 같다.

2.2.3 화학혼화제

고성능 감수제는 모르타르 성능평가시험<sup>4)</sup>을 통하여 점성과 유동성의 상관관계에서 가장 효과적인 것으로 나타난, N사

의 고축합형 멜라민계의 고성능 감수제를 사용하였고, 품질시험결과는 <표 5>와 같다.

2.3 콘크리트의 배합

배합설계시 요구되는 콘크리트의 배합조건 및 요구성능은 <표 6>과 같다. 타설대상부재는 지상 12층 이하의 기둥 및 전단벽체로서 철근 배근이 조밀하므로, 콘크리트를 밀실하게 타설하기 위해, 유동성 및 충전성을 개선시킨 슬럼프 플로우 50 cm 정도의 고유동성을 갖는 콘크리트를 채택하였다.

또한, 고강도 콘크리트의 문제인 단위시멘트량의 증대에 따른 수화열을 제어할 목적으로, 배합강도 480 kgf/cm<sup>2</sup>을 확보하기 위한 단위시멘트량을 최소한으로 하고, 플라이 애쉬를 시멘트 대체재로서 사용하였다.

3. 실내시험 결과 및 분석

3.1 플라이 애쉬 치환율별 단위결합재량에 따른 실험결과

플라이 애쉬 치환율별 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도 실험결과는 <그림 1> 및 <그림 2>와 같다.

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

3.2 잔골재율별 단위결합재량에 따른 실험결과

3.1절의 실험결과에서, 플라이 애쉬 치환율 20%의 경우는 압축강도 발현율이 낮고, 단위결합재량 500 kg/m<sup>3</sup>의 경우는 슬럼프 플로우 및 공기량이 관리한계를 벗어났다.

따라서, 그 이하의 조건에 대하여 잔골

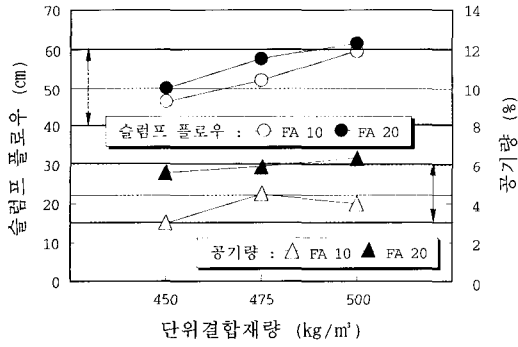


그림 1. 플라이 애쉬 치환율별 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로우 및 공기량 실험결과

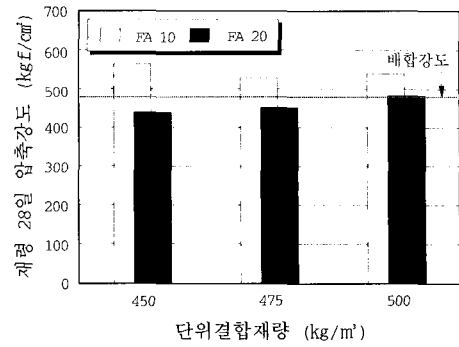


그림 2. 플라이 애쉬 치환율별 단위결합재량에 따른 압축강도 실험결과

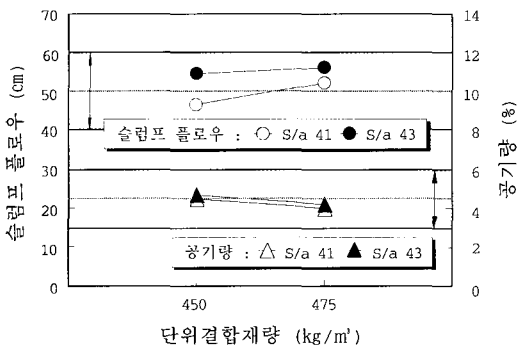


그림 3. 잔골재율별 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로우 및 공기량 실험결과

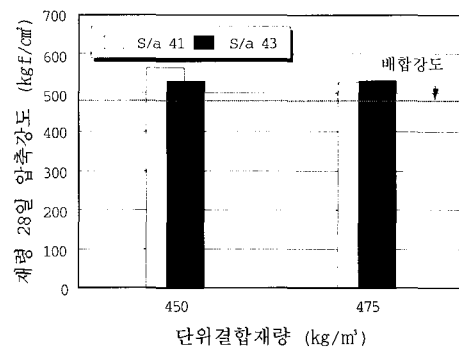


그림 4. 잔골재율별 단위결합재량에 따른 압축강도 실험결과

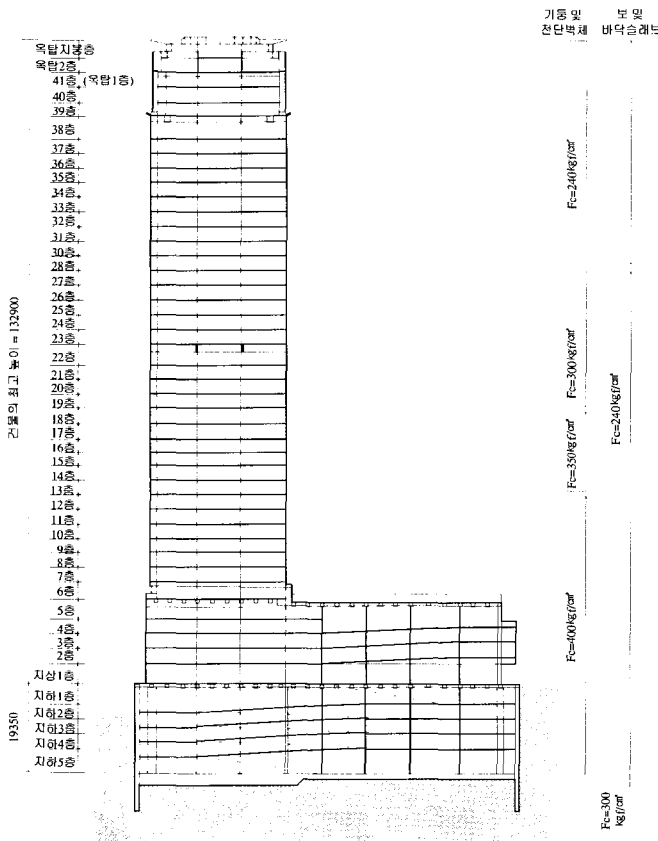


그림 5. 높이에 따른 강도 범위

재율을 변화시켜, 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도 특성을 실험하였고, 그 결과는 <그림 3> 및 <그림 4>와 같다.

실험결과, 모두 목표값을 만족하고 있었으나, 특히 잔골재율 43%, 단위결합재량 475 kg/m³의 경우가 유동성 및 점성이 가장 양호하게 나타나고 있어, 이를 최적 배합으로 결정하였다.

#### 4. 현장적용 결과 및 분석

##### 4.1 현장개요

적용현장은 당사에서 서울 여의도에 시공중인 대우 트럼프 월드 I 신축공사 현장으로서, <그림 5>와 같이 지하 5층, 지상 41층의 철근 콘크리트로 층수에 따라 콘크리트의 종류 및 강도 범위가 다르게 이루어져 있다. 즉, 매트기초( $G_{max}$ : 25 mm)는 저발열 콘크리트, 기둥 및 전단벽체( $G_{max}$ : 20 mm)는 층수에 따라 설

표 7. 각 사별 실험결과

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

표 8. 최적배합표

물결합재비 (%)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )					
			시멘트	플라이 애쉬	잔골재	굵은골재	고성능 감수제	공기연행제
35.0	43.0	166	427	48	723	969	6.65	0.19

계기준강도별 4종류(240, 300, 350, 400 kgf/cm<sup>2</sup>), 보 및 바닥슬래브(G<sub>max</sub> : 25 mm)는 일반강도 콘크리트로 각각 구분되었다.

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

#### 4.2 레미콘 공장의 선정

고강도 콘크리트를 생산하기 위한 레미콘 공장은 위치, 거리, 생산능력, 혼화재 저장사이로, 특수 콘크리트 생산실적, 품질시험실의 품질관리 능력을 고려하여, H사, S사 및 Y사의 3개사를 선정 후, 레미콘 공장에서의 실내시험 및 배치플랜트

생산성 실험을 통해 최종적으로 H사를 선정하였다. 레미콘 공장에서 현장까지의 거리는 9 km로서 소요시간은 평균 25분 정도였다.

#### 4.3 레미콘 공장에서의 실험결과 및 분석

실내시험에서 최적으로 선정된 배합이라도, 레미콘 회사별로 사용재료가 다르고, 배치플랜트 생산 시에는 약간 상이하게 되는 경우가 있으므로, 이의 확인을 위해 레미콘 공장에서의 실내시험 및 배치플랜트에서 사전에 생산성 실험을 실시하였다.

레미콘 공장에서의 콘크리트 제조에 사용되는 재료에 대한 물성시험을 수행하였으며, 결과는 실내시험에 사용한 재료와 유

사하였다. 또한, 콘크리트 제조시의 비빔 시간은 고성능 감수제의 충분한 분산을 위해 일반강도 콘크리트에 적용된 것보다 2배 높은 90초로 설정하였고, 재료의 투입은 기존의 생산방법인 일괄투입방법에 따라 실시하였다.

〈표 7〉은 선정된 3개 레미콘 공장에서의 실내시험 및 배치플랜트 생산성 실험 결과이다. 유동성을 만족시키기 위한 고성능 감수제의 양은 실내시험의 경우보다 0.2% 정도 증가하였고, 재령별 압축강도 발현성상은 대체적으로 만족하고 있으나, 레미콘사별로 품질관리 수준에 따라 실험실과 배치플랜트와의 성능차가 크게 나타나고 있었다.

배치플랜트에서 생산되는 고강도 콘크리트의 품질은 골재의 입도·입형·표면수 관리 및 전용 플랜트 설비 여부에 의해 좌우되며, 특히 사용 시멘트와 고성능 감수제와의 적합성이 매우 중요한 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 품질관리 수준이 가장 양호한 것으로 나타난 H사의 레미콘을 현장에 적용하게 되었으며, 이상의 레미콘 공장에서의 실내시험 및 배치플랜트 생산 실험을 통해서 얻어진 최적배합은 〈표 8〉과 같다.

#### 4.4 콘크리트 품질관리 및 현장적용 결과

초고층 철근 콘크리트 건축물은 철근 배근이 매우 복잡하여 콘크리트 타설시에 높은 충전성이 요구된다. 따라서, 충전성

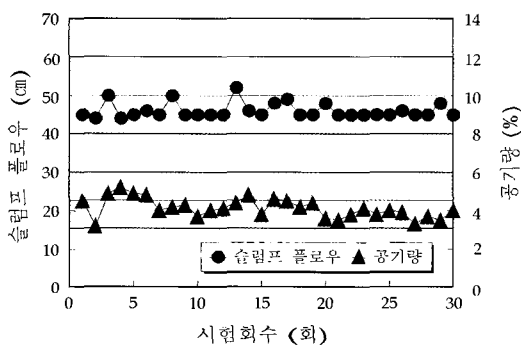


그림 6. 적용된 콘크리트의 유동성 실험결과

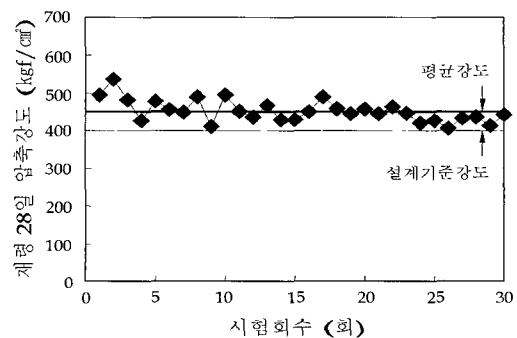


그림 7. 적용된 콘크리트의 압축강도 실험결과

의 지표인 슬럼프 플로우값의 관리수준을 검토하기 위하여, 본 현장에 기 적용된 약 6,000 m<sup>3</sup> 정도의 매스 콘크리트 생산실적으로부터 평균값, 표준편차 및 변동계수를 산정하였다.

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

현장에 적용된 굳지 않은 고강도 콘크리트의 유동성 실험결과를 <그림 6>에 나타냈다. <그림 6>에서 보듯이, 슬럼프 플로우 및 공기량은 모두 관리범위를 만족하고 있었다. 한편, 슬럼프 플로우의 경우, 레미콘 공장 출발시 55 cm인 것에 반해 현장도착시 45 cm로 나타나, 운반시간에 따른 슬럼프 플로우의 평균저하값이 사전에 검토한 슬럼프 플로우의 저하량 5 cm보다 큰 값을 보이고 있었다. 이는 운반시간의 차이 및 타설시의 외기온도에 따른 영향으로 인해 다소 높은 저하량을 나타낸 것으로 판단된다.

또한, 고강도 콘크리트에서는 압축강도가 중요한 품질관리 사항이다. 압축강도 측정결과는 <그림 7>과 같이, 재령 28일 압축강도가 평균 451 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타나고 있어 배합강도에 미치지 못하는 것이 많지

만, 불량률이 없이 모두 설계기준강도 이상을 확보하고 있는 것으로 나타나고 있었고, 변동계수도 6%로서 콘크리트의 품질 관리가 양호했던 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

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

1) 현장적용을 위한 고강도 콘크리트를 생산하기 위한 품질관리 플로우는 실내 최적배합 선정실험 → 레미콘 공장의 사용재료에 따른 적합성 판정을 위한 실내실험 → 배치플랜트 생산성실험의 단계로 진행 되는 것이 최적이라고 판단된다.

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

3) 콘크리트 생산시의 슬럼프 플로우의 관리기준을 불량률이 최소로 되도록, 목표값의 3배 표준편차 범위에 들어올 신뢰도를 99.73%로 한 55 ± 10 cm로 하였으

나, 향후에는 보다 엄격한 관리를 위해 표준편차를 2σ로 관리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4) 배치플랜트에서 생산되는 고강도 콘크리트의 품질은 골재의 입도·입형·표면수 관리, 전용 플랜트 설비 여부가 중요하고, 특히 사용 시멘트와 고성능 감수제와의 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. 박문효, 김영진, "41층 RC 구조 트럼프 월드에 적용된 대우건설의 기술력", 콘크리트학회지, 제12권 3호, pp.128~135, 2000. 5.
3. 운영수, 신성우, 장일영, "국내의 고성능 콘크리트에 대한 최근의 연구동향 - 고강도 콘크리트를 중심으로", 콘크리트 학회지, 제7권 5호, 1995. 10.
4. 박칠립, 안재현, 권영호, 이상수, "초유동 콘크리트용 모르타르의 최적배합설계", 콘크리트학회지, 제10권 3호, 1998.

## 경제 용어 해설

### 표제어 : 풋백옵션(Put Back Option)

: 일정한 실물 또는 금융자산을 약정된 기일이나 가격에 팔 수 있는 권리를 풋옵션이라고 한다. 풋백옵션(Put Back Option)은 풋옵션을 기업인수 합병에 적용한 것으로, 본래 매각자에게 되판다는 뜻을 강조하고 파생금융상품에서 일반적으로 사용되는 풋옵션과 구별하기 위해 풋 백옵션이라고 부른다. 인수시점에서 자산의 가치를 정확하게 산출하기 어렵거나, 추후 자산가치의 하락이 예상될 경우 주로 사용되는 기업인수합병방식이다.

출 처 : 경제용어사전