

초고층 구조물에 적용되는 고강도 콘크리트의 배합설계 -세계 최고층 빌딩 버즈 두바이 타워 사례-

Mix Design of High Strength Concrete for the High-Rise Building -The Tallest Building in the World, Burj Dubai Tower-

김 규 동* 이 승 훈** 김 재 호*** 김 경 준***
Kim, Gyu Dong Lee, Seung Hoon Kim, Jae Ho Kim, Kyung Jun

ABSTRACT

Mix design of C80A which is applied to the vertical members of The Burj Dubai Tower, the tallest building of the world, was performed so as to meet the requirements of rheological property, mechanical properties & construction sequences based on material analysis in Dubai, UAE. Experimental investigations were carried out to evaluate & optimize the quantities of total binders, the proportions of Micro Silica, Dune Sand & PFA, changes of S/a and the comparison of chemical admixture, etc. Approximately 65,000m³ of C80A concrete has been poured to the vertical members since 16-Apr-2006. In the actual application, it was showed that C80A has proper early strength achievement, excellent mechanical properties and satisfactory flowability & workability. The results of extensive site testing can be summarized that the average compressive strength at 28days is 98.8MPa, the average elastic modulus at 28days is 47.8GPa, the flow of concrete after pumping at the height of 250m (L72) was over 500mm.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 Land Mark적 요소로서 100층 이상의 초고층 구조물에 대한 관심이 증대되고 있으며, 국내에서도 다수의 프로젝트가 시행단계에 있을 뿐만 아니라 세계 각국에 걸쳐 2010년까지 최대 400억 달러 규모의 초고층 구조물의 발주가 예상되고 있다.

이러한 추세로 볼 때 재료적 측면에서 고강도 콘크리트의 사용은 필수적이라고 할 수 있으며, 지역별 사용재료의 특성과 구조물별 역학적 특성 및 시공 프로세스에 적합한 고강도 콘크리트의 최적 배합설계와 그 실용화는 초고층 시공에 있어서 핵심요소기술이라고 할 수 있다.

본 연구는 당사인 삼성물산 건설부문이 두바이에서 시공하고 있는 세계 최고층 빌딩, 버즈 두바이 타워에 적용된 고강도 콘크리트의 기술 자료로서, 중동지역의 재료특성과 소요품질기준을 만족하도록 최적화된 배합설계 과정을 요약한 것이다.

버즈 두바이 타워는 지상 160층, 높이 700m 이상의 세계 최고층 구조물로서, 2006년 10월 말 현재 센터 코아 윌의 공정이 지상 80층(높이:약 275m)에 이르고 있으며, 기준층을 대상으로 층당 3일의 공정이 순조롭게 진행되고 있다. 본 자료는 현재 지속적으로 증가되는 중동지역의 초고층 시장에 있어서 그 지역적 재료특성에 적합한 고강도 콘크리트 배합기술과 역학적 특성 파악 및 현장 실용화를 위한 기초 자료

* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 버즈 두바이 타워 현장, 담당과장
** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 수석연구원
*** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 버즈 두바이 타워 현장, 기술팀장
*** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 버즈 두바이 타워 현장, 현장소장

로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 현장 콘크리트 개요

버즈 두바이 타워(The Burj Tower) 프로젝트에 적용되는 콘크리트는 크게 Tower부 및 Podium부의 구조물별로 구분되며, 그림 1과 같이 요약되어진다.

그림 1에서 알 수 있듯이 Tower부의 수직부재는 큐브 공시체로 최대 80MPa, 상층부는 60MPa인 고강도 콘크리트로 설계되었으며, 수평부재의 경우 층별, 용도별로 35~50MPa로 설계되었지만, 원활한 현장 품질관리를 목적으로 전체를 큐브강도 50MPa인 콘크리트로 단일화 하고자 하였다. Podium의 경우 구조물의 기능과 요소별로 C35~C60 Grade의 다양한 콘크리트가 적용되었다.

본 연구는 Tower부에 적용될 고강도 콘크리트 중에서 지하 2층~지상26층까지의 수직부재에 설계된 "T-C80A-20"의 배합설계를 위주로 기술하고 있으며, 당사가 국내에 기적용하였던 기존의 배합자료와 중동지역의 재료 특성을 근거로 하여 소요 품질기준을 만족하는 최적배합을 도출하고자 하였다.

3. 사용 재료

3.1 시멘트(OPC)

시멘트는 UAE의 북부 Ras Al Khaimah라는 지역에서 생산되는 제품으로서 양질의 석회암을 바탕으로 유동성 및 역학적 특성이 우수한 것으로 나타났다. 콘크리트의 균일한 품질관리를 목적으로 단일제품을 사용하도록 하였으며, 표 1은 그 물리·화학적 특성 실험결과를 나타낸 것이다.

3.2 PFA (Pulverized Fuel Ash)

플라이애쉬는 수화열 저감과 고층부 압송성 및 장기 내구성 증진을 목적으로 사용되었으며, 원산지는 인도(India)로서 압송 높이에 따라 전체 결합재량의 15~20% 정도 치환되었다. 본 제품은 ASTM C618의 Type F 기준에 적합한 제품으로서 비중은 2.2이며, 그 특성치는 표 2와 같다.

3.3 Micro Silica (Silica fume)

M/S(Micro Silica)는 고강도 콘크리트의 압축강도 등 역학적 특성과 고층부 압송성 및 내구성 증진에 있어서 필수적인 재료로서, 국내에서도 유통되고 있는 노르웨이산 제품(Densified)을 사용하였으며, 전체 결합재량의 10%를 치환하였다. 비중은 2.2이며, 그 특성치는 표 3과 같다.

3.4 골재(Aggregate)

본 프로젝트의 고강도 콘크리트에는 석

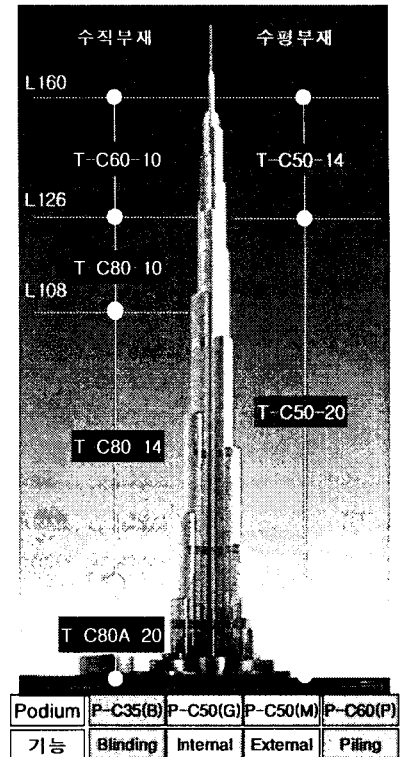


그림 1. 콘크리트 개요(버즈두바이)

표 1. OPC 물성시험 결과

항목	SO3 (%)	MgO (%)	LOI (%)	C3S (%)	C3A (%)	Blaine (cm ² /g)	28일 강도
결과	2.3	1.18	3.01	58.0	6.8	3,628	60.4MPa

표 2. PFA 물성시험 결과

항목	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	SO3 (%)	CaO (%)	LOI (%)	Fineness (45µm)	28일 강도
결과	59.3	30.0	0.16	2.7	0.61	6.5%	36.2MPa

표 3. Micro Silica 물성시험 결과

항목	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	SO3 (%)	CaO (%)	LOI (%)	Spec. surface (m ² /g)
----	----------	-----------	---------	---------	---------	-----------------------------------

회합 골재가 사용되었으며, 최대치수 20mm 골재를 주로 하여, 압송높이에 따라 14mm 및 10mm 골재의 사용을 통해 압송부하를 최소화하도록 배합설계에 반영하였다. 잔 골재의 경우 부순 모래와 사막 모래(Dune Sand)를 혼합하여 사용하였으며, 부순 모래는 석회암을 파쇄하여 세척한 것으로서 조립률이 3.3~3.5의 범위이고, Dune Sand는 사막지역의 천연모래로서 0.3mm체를 90%이상 통과하는 세립자이다. 표 4는 Dune Sand와 부순 모래의 입도시험결과를 나타낸 것이다.

결과	90.3	0.76	0.34	0.69	2.27	20.3
----	------	------	------	------	------	------

표 4. 잔골재 입도시험결과

No.	누적 통과량 (%)	
	부순모래	Dune Sand
10.0mm	100	100
5.0mm	98	100
2.36mm	66	100
1.18mm	36	100
0.6mm	19	100
0.3mm	12	91
0.15mm	9	24
75µm	5.4	1.8

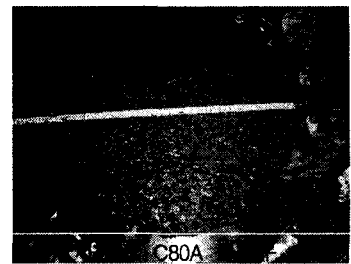
3.5 고성능 감수제(Superplasticizer)

단위수량 및 시멘트량을 최소화함에 있어 고성능 감수제의 사용은 필수적이며, D사의 폴리카르본산계가 사용되었다.

4. 배합 설계

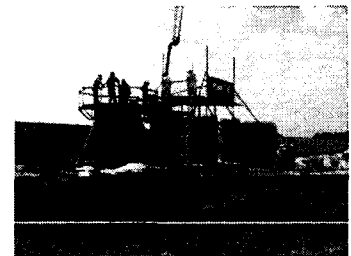
4.1 배합 설계 개요

설계 및 시방서에 명기된 요구조건과 시공조건을 고려하여 현장품질관리 기준을 설정하였으며, 이를 만족하기 위한 배합인자를 선정, (표 5 참조) 실내배합을 수행하였다. 실내배합 결과를 근거로 배합인자를 최적화하여 레미콘 시험생산을 실시한 후, 현장 Mock-Up Test를 거쳐 최종적으로 배합을 결정하였으며, 각 재료별 최적 배합범위를 표 6에 정리하였다.



4.2 유동 특성

C80A는 수직부재용 콘크리트 중에서 역학적 특성과 수축변형 특성이 가장 우수한 콘크리트로서, 당초 26층까지 설계되었지만, 구조적 안정성과 이점을 극대화하기 위해 펌프 압송이 가능한 높이까지 적용 되도록 계획하였다. 이를 위해 현장 도착 플로우를 550±75mm로 관리하였으며, 압송 높이에 따른 손실폭을 고려하여 그 관리기준을 차별화함으로써 타설 시의 원활한 시공성을 확보하도록 하였다. 사진



1은 펌프 압송직전의 C80A 플로우 전경이며, 사진 2는 실구조물과 동일한 조건에서 실시한 현장 실물도형실험(Mock-Up Test)전경을 나타낸 것이다.

표 5 배합변수별 적정범위 선정

항 목	품질관리기준	배합 인자
압축강도	재령 56일 80MPa	W/C, M/S량
고탄성 콘크리트	재령 90일 43.8GPa	석회암골재, W/C
조기강도 확보	재령 12시간 10.0MPa	화학 혼화제, M/S량
수화열 저감	2.1m 기둥 중심부 75℃	단위 시멘트량, 온도
유동성	플로우(550±75mm)	화학 혼화제, 혼화제, S/a
건조수축량	재령 28일 0.04%	단위수량, 분체량, S/a
압송성	B2~L26, 시공성 확보	단위 시멘트량, S/a
서중 콘크리트	타설온도 31℃	Chiller & Ice Plant, 온도

4.3 역학적 특성

C80A 콘크리트에 요구되는 역학적 특성은 층당 3일 공정을 위해 필수적인 조기강도, 기준재령에서의 압축강도 및

표 6. C80A 최적 배합도출을 위한 적정 재료량 범위

배합명	W/C	최적 배합 단위재료량 (kg/m ³)								
		W	OPC	PFA	M/S	20mm	10mm	부순모래	D.Sand	AD
T-C80A-20	0.27~0.28	130~140	360~400	60~80 (15%)	40~50 (10%)	560~600	300~340	560~600	320~340	5.0~6.0

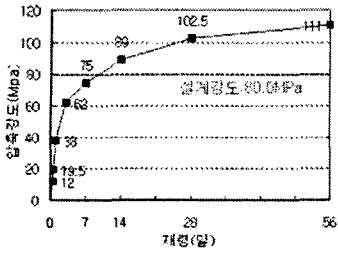


그림 2. 압축강도 측정결과(C80A)

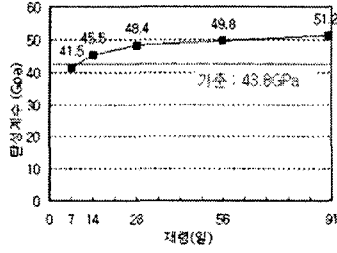


그림 3. 탄성계수 측정결과(C80A)

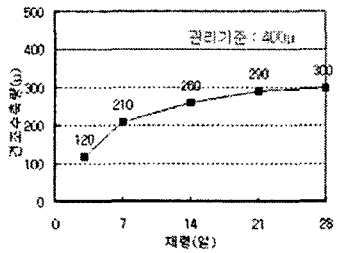


그림 4. 건조수축 측정결과(C80A)

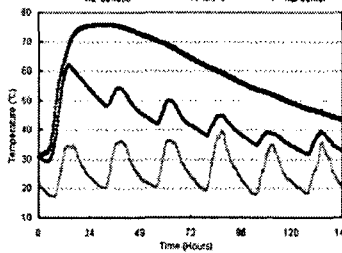


그림 5. 수화열 측정결과(2.1m, C80A)

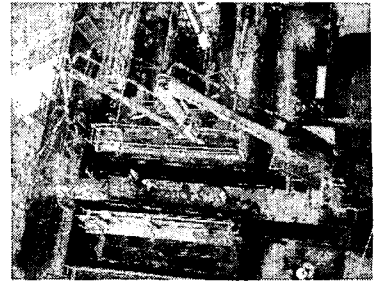


사진 3. C80A 타설전경(CPB)

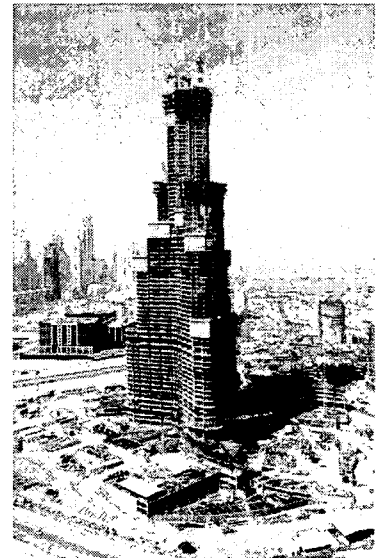


사진 4 현장 전경 (06년 9월, 72층)

탄성계수로 구분된다. 조기강도 발현을 목적으로 촉진형 혼화제의 선정실험과, M/S(실리카흙) 및 PFA(플라이애쉬)의 치환율 실험을 통해 재령 12시간에 10.0MPa를 만족하도록 하였으며, 기준재령에서의 압축강도 또한 배합강도 및 설계기준강도를 상회하는 것을 확인할 수 있었다. 탄성계수의 경우도 석회암 골재와 혼화재료 치환율의 최적화를 통해 시방기준을 모두 만족하는 안정적인 결과를 도출하였다. 그림 2~3은 C80A의 압축강도 및 탄성계수 측정결과를 도식화한 것이다.

4.4 수화열, 수축 특성 및 압송성

그림 3 및 4에 나타난 바와 같이 본 배합설계과정을 통해 도출된 최종 배합은 건조 수축량 기준과 수화열 품질기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 고층부 압송성 평가를 목적으로 600m의 수평배관 시뮬레이션 실험을 수행하였고, 그 결과는 실 구조물에서의 콘크리트 압송 시 품질관리에 활용되고 있다.

5. 결 론

"T-C80A-20"콘크리트는 2005년 4월 16일 첫 타설을 실시하여 현재(지상 80층)까지 약 65,000 m³정도가 Tower부의 수직부재에 적용되었다. 현장 적용결과, 역학적 특성 측면에서 재령 28일의 압축강도는 평균 98.8MPa, 탄성계수는 평균 47.8GPa로서 상당히 우수한 것으로 나타났으며, 유동성 측면에서도 현장 도착플로어가 580~650mm의 범위를 유지하면서 고층부 압송 후에도 플로우 500mm 이상의 시공성을 확보하는 것으로 나타났다. 사진 3은 CPB(Concrete Placing Boom)을 이용한 링 코아빌 타설 전경을, 사진 4는 현장 전체 전경을 나타낸 것이다.

참고문헌

1. "Concrete", BS EN 206-1:2000, British Standards Institution, 2004.
2. "Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete", ACI 363.2R-98