

특 집

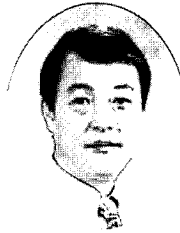
|| 국내 초고층 RC 건축물에 사용된 최신 콘크리트 기술 ||

초고층 RC 건축물의 재료 및 시공기술

- Materials and Construction Technology for Super Tall RC Buildings -



이승훈*
Lee, Seung Hoon



왕인수**
Wang, In Soo



이한승***
Lee, Han Seung

1. 머리말

일반적으로 철근콘크리트(RC)조는 철골(S)조와 비교하여 무게 변형 능력이 작을 뿐만 아니라 공사기간이 길고 공사비용이 많이 든다는 단점 때문에 초고층 건물 구조에는 적합하지 않다고 생각되어 왔다. 그러나, 최근에는 초고층 건축물의 구조설계 및 구조해석 기술 발전에 따라 변형 능력을 확보함과 동시에 고강도 재료 및 경량재료를 사용함으로써 중량을 가볍게 하는 기술이 개발되어 이러한 문제점을 해결하고 있다. 특히, <그림 1>과 같이 각 구조별로 비교한 지상 구조체의 공사기간 비교를 보면 초고층 RC조는 SRC조의 거의 2분의 1이고, S조에 필적하는 공기로 건설되고 있음을 알 수 있다. 또한, <그림 2>는 각 구조별로 지상 구조체의 공사비용을 비교한 것으로, 공사비용 측면에서도 초고층 RC조는 SRC조, S조와 비교하여 장점이 있음을 알 수 있고, 이처럼, 경제성 및 시공성 우위에서 초고층 RC조는 점점 확대될 것으로 전망되고 있다. 특히, 초고층 RC조 건축물은 강풍시의 변형이 S조 보다 작고 진동에 대해서도 유리하므로 우리나라와 같이 초고층 건축물이 주상복합이나 호텔형 초고층에 집중되는 경우에는 초고층 RC조 건축물이 더욱더 확대될 것으로 예상되며, 공기단축을 위한 프리캐스트 공법이나 철골조와의 복합구조로 발전될 가능성이 매우 높다고 판단된다.

본고에서는 이러한 배경 하에, 초고층 RC조 건축물에 적용되

는 핵심기술 중 재료 및 시공측면에서의 건축기술을 개괄함과 동시에, 현재, 국내에서 가장 높은 타워팰리스 III(69층)에 적용된 재료 및 시공기술을 중심으로 그 사례를 서술하고자 한다.

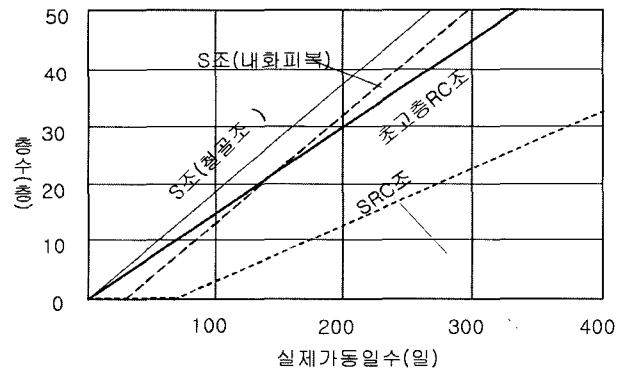


그림 1. 구조형식별 지상구조체 공사기간 비교¹⁾

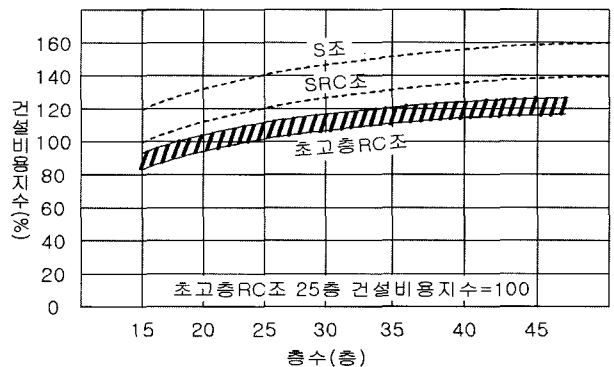


그림 2. 구조형식별 지상구조체 공사비용 비교¹⁾

* 정희원 (주) 삼성물산 건설부문 기술연구소 수석연구원

** 정희원, (주) 삼성물산 건설부문 상무, 타워팰리스III 총괄소장

*** 정희원, 한양대학교 건축학부, 조교수, 공학박사

2. 초고층 RC조 건축물의 재료 및 시공 고려사항

초고층 RC조 건축물을 가능하게 한 요인으로서 ①작은 스펙 ②정형의 평면과 입면 ③기둥 단면 구성의 연구 성과 ④고강도 재료 ⑤철근이음의 합리화 ⑥프리캐스트화 ⑦메커니즘 확보 기술 ⑧프레임 응답해석법의 개발을 들 수 있지만, 이중에서도 고강도 재료의 활용이 매우 큰 요인인 것은 명백하다. 이러한 관점에서 초고층 RC조 건축물에 적용된 고강도 재료의 제반 성질 및 품질확보에 대하여 아래에 나타낸다.

2.1 고강도 콘크리트의 재료와 배합

초고층 RC조 건축물에는 설계기준강도가 42 ~ 60 MPa, 압축강도가 50 ~ 80 MPa, 슬럼프가 21 ~ 23 cm의 고강도 콘크리트가 사용된다. 건물의 층수는 사용하는 콘크리트의 강도에 따라 결정되며 보통 25 ~ 30층에서는 36 ~ 42 MPa, 30 ~ 35층에서 42 ~ 48 MPa, 35 ~ 45층에서 48 ~ 60 MPa 라고 알려져 있으며 보다 고층화하기 위해서는 이 이상의 고강도 콘크리트로 하는 것이 필요하다. 또한, 콘크리트의 고강도화에 따라 병용하는 철근도 고강도화가 되어야 하며, 고강도 콘크리트와 고강도 철근의 사용 범위를 (그림 3)에 나타낸다.

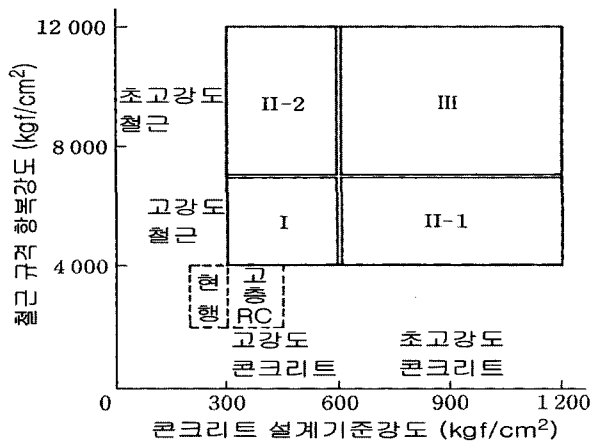


그림 3. 고강도 콘크리트와 재료강도와와의 관계²⁾

한편, 콘크리트용 혼화제의 기술이 진보함에 따라 설계기준강도 80 N/mm²의 현장타설 콘크리트도 실제의 공사에서 적용되기 시작하고 있다. 80 N/mm²까지의 고강도 콘크리트 재료, 배합의 특색으로서 ①조직의 치밀하나 시공성 개선을 위한 실리카 폼을 혼화제로서 사용 ②높은 강도를 얻을 수 있는 석영계, 사함계, 석회암계, 안산암계 등의 쇄석·쇄사 사용 ③물-시멘트(결합재) 25% 이하를 목표로 하는 것 등을 들 수 있다. 한편, 초고층 RC조의 콘크리트 강도는 설계기준강도 60 N/mm²까지가 일반적으로 사용되고 있지만, 선진외국에서는 이미 설계기준강도

100 N/mm²을 사용한 건물도 이미 실현되고 있다. 설계기준강도 60 N/mm²을 넘는 초고강도 콘크리트는 슬림(slim)한 기둥단면으로 RC조의 초고층화, 장스팬화를 가능하게 하고 있으며, 초고강도 콘크리트를 사용한 기둥은 탄성역이 크고 평균전단응력도 10 N/mm² 정도의 수평력에 대하여도 손상이 거의 생기지 않고 매우 우수한 내진성능을 갖고 있다. 또한, 강도가 높음에 따라 콘크리트 단가는 올라가지만 사용량이 줄기 때문에 전체로서 비용 상승 요인으로는 되지 않고 금후, 보급이 더욱 활발할 것으로 예상된다. 특히, 보나 슬래브에 대해서 초고강도화는 필요하지 않고 또한 미장마감이나 양생 등의 시공상 단점을 피하기 위하여 설계기준강도(f'_c)를 42 ~ 48 MPa 정도 이하로 하고 있다. 기둥 콘크리트와 보·슬래브 콘크리트의 강도가 다른 경우는 분리 타설이 필요하게 된다. 한편, 국내에선 초고층 RC조 건축물의 슬래브에 경량 콘크리트가 경량골재가 생산되지 않아 사용되고 있지 않으나, 선진 외국에서는 경량화를 위한 경량 콘크리트의 사용이 일반적이고 이에 따른 장점이 많으므로 금후, 국내에서는 이에 대한 연구 및 실용화를 위한 노력이 필요하다고 판단된다.

2.2 고강도 콘크리트의 제반 성질

고강도 콘크리트 역학적 성질은 이미 잘 알려져 있으나, 균열을 발생시키는 건조수축이나 수화열 균열은 주의해야 하는 요소 중의 하나이다. 또한, 고축력이 작용하는 초고층 RC조 건축물에 있어서는 크리프에 의한 부등축소도 매우 중요한 요소기술 중의 하나이다. 일반적으로, 고강도 콘크리트의 건조수축에 영향을 미치는 요인은 굵은골재의 종류, 물-결합재비, 혼화제의 사용량으로 단위수량은 그다지 큰 영향을 미치는 않는다. 고강도 콘크리트는 건조 초기에 있어서 큰 수축변형을 일으키고 균열일수가 빠르게 되나, 수축저감제의 사용에 의해 균열발생일수가 지연된다. 한편, 결합재량이 많아짐에 따른 수화열에 의한 균열은 특히 고강도 콘크리트에서 제어해야 될 중요한 균열방지대책으로 수화열 발생이 낮은 저발열 재료를 사용하거나, 사용재료의 프리쿨링 및 파이프쿨링, 보온양생 등 수화열에 의한 균열저감을 위한 대책이 반드시 필요하다.

한편, 콘크리트는 상시 작용하는 하중에 의해 크리프 변형이 진행되고, 특히, 초고층 RC조 건축물의 기둥은 상시축력이 크고 건물도 높기 때문에 크리프 변형에 대한 검토가 필요하다. 일반적으로 콘크리트 강도에 관계없이 크리프 변형은 약 1,000 μ 에 달하고 있으며, 시공시의 기둥축력은 작은 하중에서 단계적으로 작용하는 점, 완성 후의 기둥 압축응력은 평균으로 0.2 f'_c 정도인 점, 기둥의 철근이 크리프의 진행을 억제하는 것 등을 고려하면 실제 건물에서는 이 크리프 변형은 상당히 저감하여 생각해도 좋다. 그러나, 높이가 100 m를 초과하는 초고층 RC 건축물은 크리프 변형에 의한 기둥의 연직변형이 수십 mm 이상으로 될

가능성이 있다. 따라서, 인접하는 기둥사이에서 문제로 되는 연직방향의 변형차가 생기지 않도록 상시하중에 의한 압축응력도의 균등화에 주의가 필요하다. 특히, 기둥의 상시 압축응력도가 불균등하여 인접하는 기둥사이에서 연직방향의 축소차가 생기는 경우 및 복합구조기둥(CFT 등)이나 철골계단의 지지기둥 등 강재사용의 기둥과 RC 기둥과를 병용하는 경우에는 크리프 변형의 진행에 따른 응력이행 등을 고려한 검토를 해야만 한다.

2.3 초고층 RC조 구조체의 품질확보

2.3.1 압축강도

설계기준강도는 구조체 콘크리트의 압축강도로서 확보되어야 한다. 기둥 등 단면이 큰 부재에서는 시멘트 수화발열로 인하여 초기에 부재온도가 상승하며, 온도상승은 시멘트량이 큰 만큼 즉 고강도인 만큼 높게 된다. 이 결과, 고강도 콘크리트를 타설한 구조체 내부 강도는 강도관리용 표준시험체와 달리 초기에 높고 장기의 발현이 작게 된다. 이 때문에, 초고강도 콘크리트에 있어서는 사전에 부재모델 등으로 부재강도와 표준 시험체의 관계를 조사하여 배합계획이나 구조체 강도관리에 반영하여야 한다.

2.3.2 균열

초기에 부재가 고온으로 되는 현상이나 다량의 시멘트 수화반응은 콘크리트 경화시에 수축을 일으키며, 기둥 주근에서 양단이 구속된 보 등의 중앙부근 균열발생에 유의해야 한다.

2.3.3 유동성

강도 확보와 동시에 중요한 것은 제조·운반·현장 타설이 가능한 콘크리트의 유동성을 확보하는 것이다. 고강도 콘크리트는 물-시멘트비가 낮고 시멘트량이 많은 배합만큼 콘크리트의 점성이 높게 된다. 이 때문에 고강도로 되는 만큼 믹싱효율이 저하하거나 슬럼프가 작으면 타설이 어렵게 된다(그림 4). 그러므로 고강도 일수록 슬럼프를 크게 설정하지만 점성이 높기 때문에 보통 강도와 같이 골재분리나 블리딩 발생의 위험성은 작다. 설계기준 강도 60 N/mm² 이상의 초고강도 콘크리트에서는 (그림 5)와 같이 슬럼프 플로우를 측정하고 관리하는 방법이 채용되고 있으며, 이러한 고유동성을 갖는 고강도 콘크리트는 고성능 AE감수제의 진보에 따라 제조가능하며, 이 혼화제는 높은 유동성을 장시간에 걸쳐 유지하는 우수한 성능도 갖고 있고 현장 타설 고강도 콘크리트에는 필수불가결한 재료이다. 한편, 혼화제로서 실리카 폼의 사용은 콘크리트 강도를 높일 뿐만 아니라 점성을 저감시켜 시공성을 개선하는 효과도 있고 100 N/mm² 이상에서는 특히, 중요한 혼화제이며, 고강도 콘크리트를 안정적으로 제조하는 데에는 우수한 설비·재료·기술력과 실적을 가진 레미콘 공장의 협력이 중요하며 사전 조사나 시험 믹싱에 의해 KS규격 공장 중에서 선택하는 것이 바람직하다.

2.3.4 운반

콘크리트 펌프를 이용하면 배관 압력부하가 높게 되거나 유동성이 저하하는 것이 있어 사전 실험으로 확인할 필요가 있다. 버켓의 경우는 이와 같은 문제가 적으므로 적용 예도 많이 있다.

2.3.5 타설, 다짐

고강도 콘크리트는 고유동성을 채용하고 있기 때문에 기존 기술로 시공가능하다. 그러나, 밀실한 충진을 확보하기 위하여 (그림 6)과 같이, 기둥을 보 아래까지 타설한 후 보기둥 접합부·보·슬래브 등의 수평부재를 타설 하고 VH 분할타설공법을 채용하는 것이 많다. 또한, 점성이 높기 때문에 타설에 필요한 시간을 길게 하는 것이 좋다.

2.3.6 표면마감, 양생

고강도 콘크리트는 점성이 높아 표면 미장마감이 어렵다. 또한, 블리딩이 거의 없기 때문에 표면이 건조하기 쉽고 플라스틱 균열이 발생하기 쉽기 때문에 살수 등에 의한 습윤양생이 필요하게 된다. 이와 같은 시공사의 단점을 피하기 위하여 기둥에는 설계기준강도 60 MPa 이상의 초고강도 콘크리트를 사용하더라도, 보·슬래브는 설계기준강도 48 MPa 이하로 하는 구조계획이 많이 채용된다. 이러한 경우에 (그림 7)과 같이 강도가 다른 콘크리트를 분리하여 타설 하는 기술이 필요하다.

2.3.7 시공관리체제

고강도 콘크리트의 시공실적이 아직 적으므로 현장 관리자와 콘크리트 제조·운반·타설·마감·품질시험 등을 담당하는 전문공사업자에 의한 시공관리체제를 조기에 설치하고 시험믹싱이나 시공실험을 통하여 기술을 사전에 전달함과 동시에 시공계획의 이해를 높여두는 것이 중요하다.

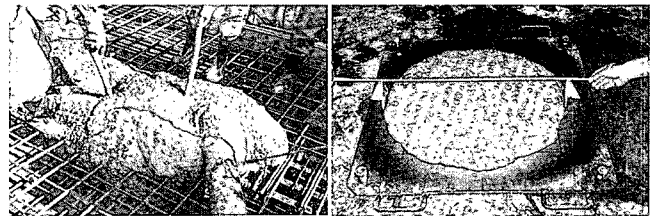


그림 4. 낮은 슬럼프 고강도 콘크리트 슬럼프플로우 측정 광경

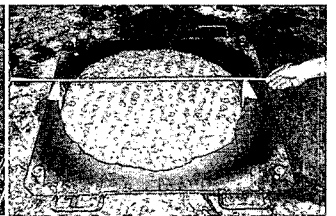


그림 5. 고강도 콘크리트의 타설 상황

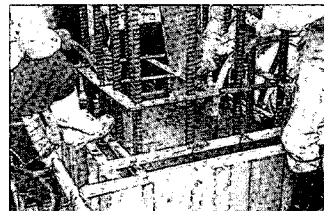


그림 6. 고강도 콘크리트 기둥 타설

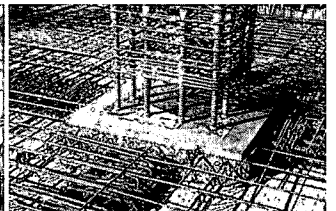


그림 7. 기둥과 보·슬래브 분할타설

3. 초고층 RC조 건축물 시공사례(타워펠리스 III)

3.1 타워펠리스 III 공사 개요

타워펠리스 III 현장은 타워동 지상 69층 + 옥탑 2층의 주상복합건물 1개동과 지상 7층 규모의 스포츠센터 1개동으로 건립되어 지고 있으며, 지하는 6개 층으로 주차장과 기계실 용도로 사용되어지고 있다. 현장의 공사개요는 <표 1>과 같다.

초고층 건축물 시공에서 가장 중요한 요소는 전체공사기간이며, 당 현장에서는 전체공사기간을 33개월로 설정하였고 이를 층당 소요일수로 계산하면 층 당 13.4일이라는 시공속도가 된다. <표 2>의 공정비교에서 볼 수 있듯이 골조공사는 3-일 사이클

표 1. 타워펠리스 III 공사현장 개요

명칭	도곡동 타워펠리스 III 신축공사		
시공자	삼성중공업 + 삼성물산 JV		
용도	아파트(13 Type 480세대), 오피스텔(7 Type 130세대)		
설계사	SOM-기본설계, 삼우-실시설계		
공사기간	2001년 4월~2003년 12월(33개월)		
최고높이	263 m		
지역지구	일반상업지역, 도시설계지역		
대지면적	5,442평	건축면적	2,001평
건폐율	38.15%	용적율	794.88%
연면적	67,620평(지상 43,258평, 지하 24,362평)		
층수	Tower(지하 6층 + 지상 69층) Sports Club(지하 1층 + 지상 7층)		
구조	철골 철근 콘크리트조		
주차대수	1,772대(세대당 2.9대)		
승강기 대수	승객용(17인승 17대), 서틀용 2대 비상용(20인승, 15인승 각 1대)		

표 2 초고층 건축물 공정비교

구분	타워펠리스III	타워펠리스I		트럼프 타워		국내 D사		리버시티 21 N동		Century Park		
		지하	지상	지하	지상	지하	지상	지하	지상	지하	지상	
공사개요	층수	6	75	5	71	2	72	6	52	3	46	
	지하	69	66	70	70	46	46	43	46	54	57	
	PH	2	2	1	3	1	2					
	공사기간(개월)	33	36	31	37	36	38					
지하공정	토공사	전체(월)	5.5	4.5	-	7.0	7.0	4.5				
		층당(일)	28.0	27.5	-	36.5	71.2	36.5				
	기초공사	전체(월)	2.0	2.0	-	1.5	2.0	1.5				
		층당(일)	10.2	12.2	-	7.6	20.3	7.8				
	지하골조	전체(월)	3.0	2.5	-	2.5	5.5	3.0				
		층당(일)	15.3	15.3	-	12.7	55.9	12.7				
토공사 지하골조	전체(월)	10.5	9.0	4.0	11.0	14.5	9.0					
	층당(일)	53.4	54.9	61.0	55.9	147.4	55.9					
지상공정	골조공사	전체(월)	12.0	13.2	15.0	13.5	14.5	22.0				
		층당(일)	5.3	8.1	6.5	9.0	10.3	9.0				
	골조 완료후	마감공사	10.5	13.8	12.0	12.5	7.0	7.0				
		골조 + 마감공사	전체(월)	22.5	27.0	27.0	26.0	21.5	29.0			
	층당(일)	10.0	12.5	11.8	17.2	15.3	17.2					
지하-지상 공사기간 (일/층)	13.4	15.5	13.1	21.7	23.9	20.3						

(3-day cycle)을 달성하여 층 당 5.3일을 기록하였으며, 마감공사를 포함하여 층 당 13.4일의 시공속도는 미국 트럼프 타워(Trump Tower)의 층 당 13.1일에 근접한 것으로 국내 주상복합건물의 마감특성(바닥 온돌마감)을 고려하면 상당히 빠른 시공속도임을 알 수 있다.

이와 같은 공사를 수행하기 위하여 초고층과 관련된 많은 첨단 시공기술과 엔지니어링 요소기술이 적용되었는데, 타워펠리스 III에 적용된 초고층 첨단 시공기술로는 ① 골조공사 및 외벽공사의 3-일 공정을 달성하기 위한 여러 공법 ② 초고층 대규모 현장의 현장관리를 위한 물류관리 시스템과 엔지니어링 측면에서의 요소 기술인 1) 새로운 재료(new material) 측면에서의 무다짐 콘크리트(SCC: Self Compacting Concrete)와 설계기준강도 80 MPa인 초고강도 콘크리트 2) 새로운 시공방법(new method) 측면에서의 국내에서 처음으로 적용된 냉각수 순환형 파이프쿨링 시스템과 Up-Up 공법을 중심으로 소개하고자 한다.

3.2 고강도 콘크리트 타설 장비

Concrete Placing Boom은 KVM 31/27 기종을 사용하였는데, 이동 동선이 가장 적고 타워크레인(tower crane)과의 간섭이 가장 적은 위치를 선정하여 배치하였다. 코어월(core wall)에 climbing shoe를 매립 후 앵커(anchor)로 지지하여 ACS 거푸집과 연결된 climbing unit를 이용하여 매 1개 층마다 상승하며 장비의 상승시간이 짧아 기후, 장비 등 외부의 영향을 받지 않고 상승이 가능하였다.

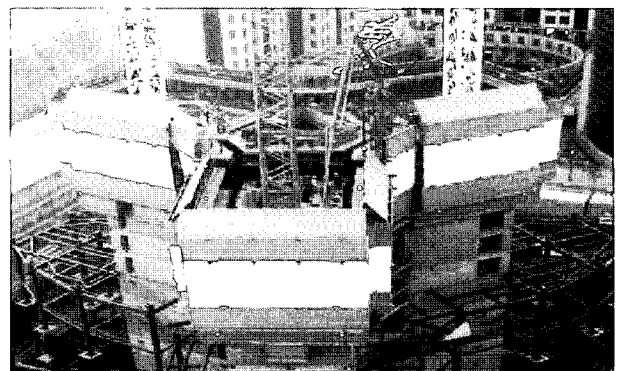


그림 8. Concrete Placing Boom

콘크리트 타설 장비는 장비의 타설 능력, 건물의 높이 콘크리트 슬럼프(플로우), 시간당 타설량, 장비의 효율 등을 기준으로 SCHWING사의 BP8000(초고압용)을 사용하였다. 코어, 슬래브, 벨트월(belt wall), 코어 및 슬래브 장비구간 마감 등 지상층 4-Line을 설치 사용하였고, 동절기에는 전기히팅코일(electric heating coil) 및 아티론 보온재를 이용하여 파이프 보온을 하였으며, 파이프 마모를 검사로 기준 두께 이상 유지하도록 하였다.



그림 9. 콘크리트 펌프

3.3 타워팰리스 III 현장에 적용된 초고층 첨단 시공기술

3.3.1 골조공사 및 외벽공사의 3-일 공정

층 당 소요일수 13.4일의 달성과 골조공사의 층 당 5.3일을 달성하기 위하여 골조공사의 매 단위공정을 3-일 공정으로 진행하였다. 이 3-일 공정을 달성하기 위하여 코어 선행공법과 철골의 S-N 공법, 커튼월(curtain wall)의 Unitize System과 Super Block Unit 공법 등이 적용되었다.((그림 10) 참조)



그림 10. 3-day cycle 개념도

3.3.2 코어 선행공법

타워팰리스 III의 구조형태는 코어가 철근 콘크리트 구조로 되어있고 외주부는 철골철근 콘크리트 구조로 되어있다. 일반적으로 철근 콘크리트 구조는 철골조 구조에 비하여 많은 가설재가 필요하며 현장관리가 어렵고 시공속도도 많이 뒤떨어지는 단점이 있었으나, 이를 극복하기 위하여 V.H 공법(수직, 수평 분리 타설공법) 개념을 적용하였다. 즉, 수직부분인 코어의 빠른 시공을 위하여 ACS 거푸집(Automatic Climbing System Form)을 사용하여 거푸집을 시스템화함으로 유압 잭(jack)과 같은 기계적

인 힘을 활용하여 거푸집 설치 및 해체를 가능하게 함으로써 재래식 거푸집으로 하는 것보다 투입인력의 감소에 따라 노무비가 절감되었고, 또한 거푸집의 반복 사용에 따라 현장관리도 용이해졌으며, 무엇보다도 공사속도를 증가 시킬 수 있었다.

이러한 코어 공사를 골조공사 중 가장 선행하여 시공하고, 선행하는 코어 공정을 집중관리 함으로써 전체공기를 합리적으로 단축하는 것이 가능하게 되었다. 즉, 선행공정의 층 당 소요일수가 공사 진행속도에 큰 영향을 미치므로 당 현장에서는 코어월 조닝(zoning)(Zone A, Zone B)으로 작업량을 배분하고, 철근 선조립 공법((그림 11) 참조)과 P.C Link 빔((그림 12) 참조)을 적용하여 층 별 최단기간인 3-일 공정을 실현하였고, 후속공정도 동일한 속도로 공사를 추진하여 골조공사 전체를 3-일 공정으로 유도하는 초고층 공정관리 기법을 정립하였다.



그림 11. 철근 선조립 공법

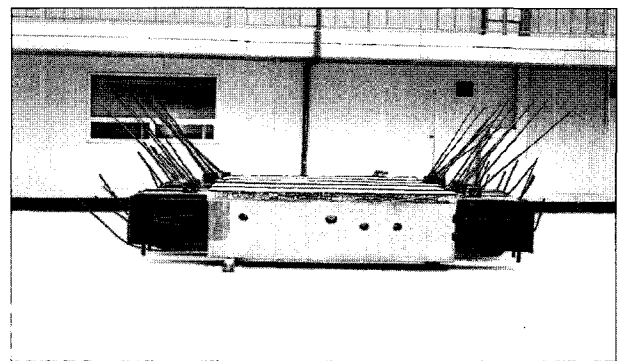


그림 12. PC Link 빔

3.3.3 철골 S-N 공법

당 현장에서는 철골공사에 있어 Spiral N 공법을 적용하였는데, 위의 그림에서 보듯이 각 절의 시작 층을 구역(zone) 별로 다르게 하여 구역마다 설치 층을 다르게 함으로써 구역 단위로 작업을 진행하였다. 이렇게 함으로써 용접 작업을 각 구역 별로 분산시켜 작업효율을 높이고 안전성을 증가시킴과 동시에 구역 별 철골설치, Plumbing, 용접(welding), 데크 플레이트(deck plate) 판개 등이 동시에 작업 가능하게 하였다. 무엇보다도 이 공법에서 중요한 것은 보와 데크 플레이트는 절 단위로 설치하지

않고 층 별 마감함으로써 철골설치 층 하부에 데크 플레이트가 설치되어 있으므로 철골 작업자의 안전성 증가와 함께 작업자 투입계획 수립이 용이하게 하였다.

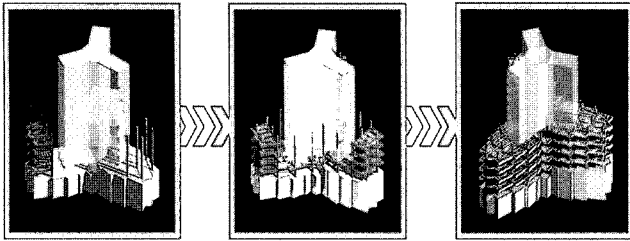


그림 13. 철골 S-N 공법 개념도

3.3.4 Curtain Wall Unitize System

유닛 시스템(unit system)은 재래의 Knock-Down 방식과는 달리 공장에서 가공, 조립, glazing 과정을 거쳐 unit로 완성하여 현장에 반입하며, 현장에서의 작업은 반입, 양중, 설치의 과정만 거치면 되는 공법으로 현장의 작업을 최소화하고 대부분의 작업이 공장에서 이루어지게 되므로 현장에서 요구하는 1층 3-일 공정을 달성하게 되었고 소요품질을 확보하게 되었다.

3-일 공정을 유도하기 위하여 수평적으로는 평면적으로 3개의 조닝을 통하여 3개 팀을 운영하였고, 수직적으로는 준별로 층수를 달리하여 설치함으로써 3-일 공정을 가능하게 하였다. 한편, 당 현장에서는 내화피복보다 커튼 월을 선시공하여 가설비용을 절감하였고 Up-Up 공법으로 아웃리거(out rigger) 부위를 후속 공사로 유도하여 공기단축에 기여하였다.

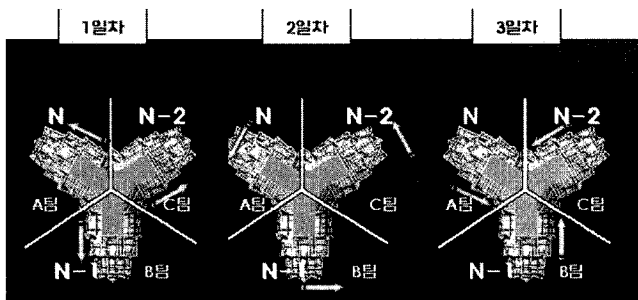


그림 14. Curtain Wall Zoning

3.4 물류관리 시스템

초고층 건축물 시공의 성패는 얼마나 원활하게 물류를 이동 시키느냐에 있다. 적은 관리 인력과 협소한 부지의 대규모 건설공사에 있어 'Just in Time'의 실현이 무엇보다도 중요한 요소라고 할 수 있다. 지금까지의 물류 시스템은 현장까지의 물류관리에 중점을 두었다면, 당 현장에서는 현장내부의 물류의 흐름에 대한 파악이 가능한 시스템으로 발전시켰다. 당 현장에서 적용한 물류관리 시스템은 바코드(bar code)를 이용한 자재관리 시스템(그림 15) 참조).

카드를 통한 인원관리 시스템, 통분관리 시스템, 양중관리 시스템, 작업일보 시스템, hoist운행 시스템, 색상계획과 부재코드 시스템을 통한 자재관리 등이 있다.

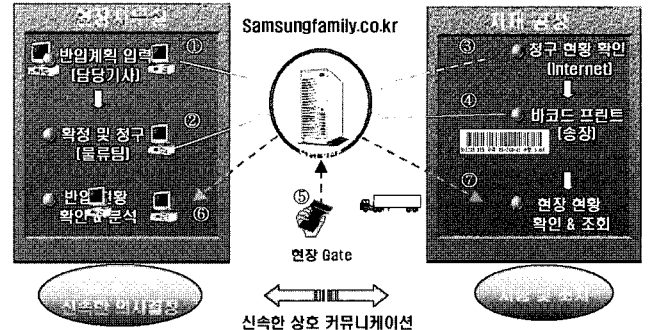


그림 15. 물류관리 시스템

3.5 타워팰리스 III 현장 적용 초고층 엔지니어링 시공기술

3.5.1 New Material

① 무다짐 콘크리트(SCC)

무다짐 콘크리트(SCC : Self Compacting Concrete)는 고유동성을 가지고 있어 별도의 진동다짐기를 투입하지 않고서 콘크리트를 재료분리 없이 밀실하게 타설 할 수 있는 콘크리트를 이르며, 일반 콘크리트에 비하여 단위체적당 시멘트가 많아 수화열이 많이 발생하는 경향이 있음에도 불구하고 본 콘크리트를 당 현장의 매트(mat) 기초에 적용하였다. 약 8,000 m³의 콘크리트를 14시간 이내에 타설을 완료하기 위해서는 펌프카 10대와 30여대의 진동다짐기가 사용되어야 했고, 이것은 주변의 많은 민원을 초래할 것으로 예상되었다. 또한 3.5m 높이의 기초를 타설하기에는 어려움이 예상되어 약 6개월간의 개발과정을 통하여 무다짐 콘크리트를 개발, 적용하였다.

표 3. 무다짐 콘크리트 배합표

호청강도	20-40-65	
W/B(%)	33.6	
Gv(m ³ /m ³)	0.297	
Sa(%)	51.8	
단위재료량 (kg/m ³)	B	515
	W	173
	C	386
	F/A	129
	Ad(%)	8.24(1.6)

무다짐 콘크리트는 고성능 AE감수제 등을 이용하여 유동성을 크게 확보한 콘크리트로 유동성 및 충전성이 증가되어 시공 후 결함 최소화로 향후 하자 발생을 최소화 할 수 있었고 콘크리트 마감면의 향상을 가져올 수 있었다.

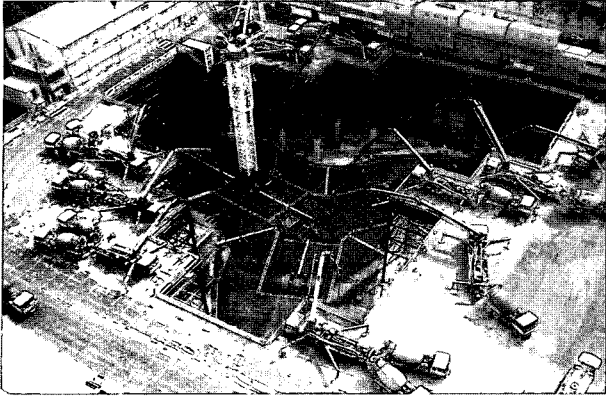


그림 16. 매트 기초 타설 전경

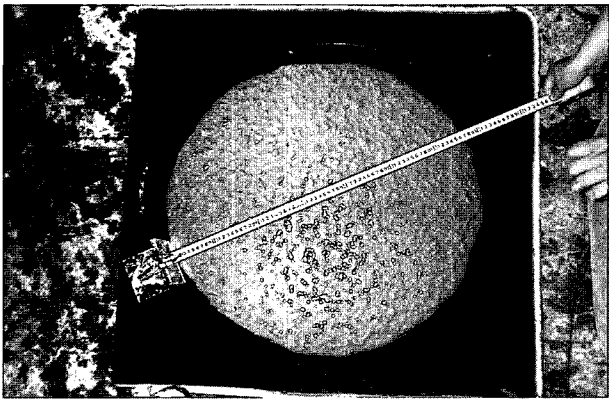


그림 17. 무다짐 콘크리트의 슬럼프 플로우

② 초고강도 콘크리트³⁾

당 현장에 적용된 고강도 콘크리트의 강도는 코어 부위에 50 MPa, 40 MPa 그리고 초고강도 콘크리트로 기둥 부재에 80 MPa가 적용되었다. 국내 최고 수준인 설계기준강도 80 MPa인 초고강도 콘크리트의 적용은 초고층 빌딩의 공사에 반드시 필요한 기술로서 실리카 폼을 사용하여 강도발현이 용이하도록 하였다. 또한 초고강도 콘크리트를 사용함으로써, 초고층 건축물에서 피할 수 없는 기둥 축소(column shortening)를 최소화하여 코어 부위와 기둥 부위간의 부등축소(differential shortening)를 줄이고 기둥 단면적 축소와 철골량 축소를 통한 원가절감을 달성할 수 있었다. <표 4> 및 <표 5>는 고강도 콘크리트 및 초고강도 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다.

표 4. 고강도 콘크리트 배합표

호칭강도	20-50-23	20-40-21	
W/B(%)	29.5	32.9	
Gv(m ³ /m ³)	0.357	0.348	
s/a(%)	40.74	44.70	
단위재료량 (kg/m ³)	B	580	510
	W	171	168
	C	493	434
	F/A	87	76
	Ad(%)	9.86(1.7)	9.18(1.8)

표 5. 초고강도 콘크리트 배합표

호칭강도	20-80-21	20-60-23	
W/B(%)	24.9	28.0	
Gv(m ³ /m ³)	0.34	0.36	
s/a(%)	41.5	39.0	
단위재료량 (kg/m ³)	B	650	625
	W	162	175
	C	500	531
	S/F	52	
	F/A	98	94
	Ad(%)	16.9(2.6)	15.0(2.4)

3.5.2 New Method

① 냉각수 순환형 파이프쿨링 시스템⁴⁾

균열의 한 원인인 수화열에 의한 온도 상승량을 최소화하기 위하여 콘크리트 내 배관을 설치하고 냉각수를 통수시켜 온도 상승을 억제하는 시스템인 냉각수 순환형 파이프쿨링 시스템을 개발하여 적용하였다. 당 현장은 매트 기초(mat foundation)의 깊이가 3.5 m로서 거대한 매스 콘크리트이다. 따라서 수화열에 의하여 기초 중앙부의 최고 온도가 93°C까지 올라가고 양생기간(콘크리트 내부 온도와 대기온도간의 차이가 20°C 이내가 되는 시점)이 약 50일 이상 소요될 것으로 예상되어 전체공기에 큰 영향을 미치게 되었다. 이 문제를 해결하기 위하여 냉각수 순환형 파이프쿨링 시스템을 적용하였는데 최대 온도를 83°C로 제어 가능하였고 양생기간도 10일 정도만 필요하게 되어 약 40일의 공기단축을 실현 할 수 있었다.

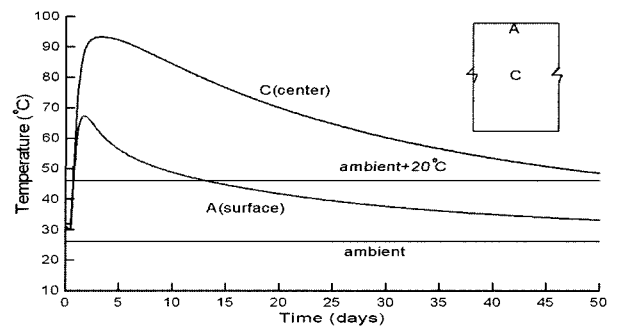


그림 18. 파이프쿨링 미적용시

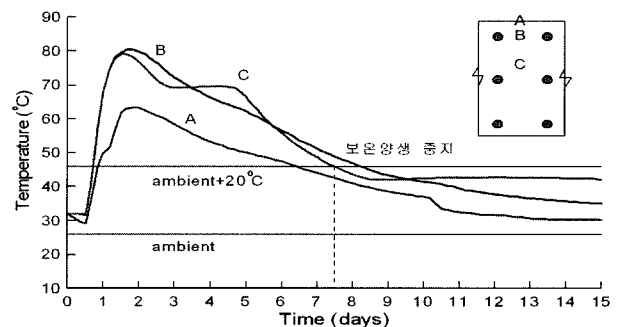


그림 19. 파이프쿨링 적용시

시스템 검토 절차는 1) 수화열 해석으로 적정 파이프의 간격 및 위치 설계 2) 유입수 및 유출수의 설계한계온도를 산정하여 물의 유입속도를 결정하고 총 유입량 산정 3) 현장조건을 기준으로 수화열 해석, 통수속도 및 통수시간 제어값 검토 4) 타설 후의 보온 양생기간 산정 등이다.

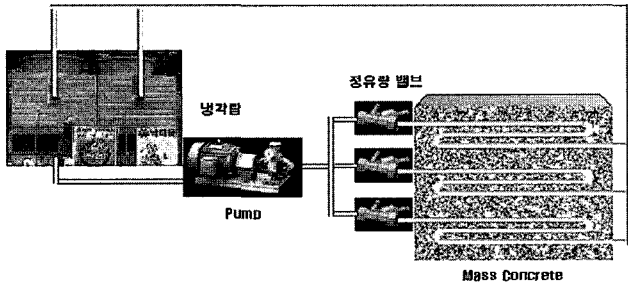


그림 20. 파이프쿨링 시스템 개념도

② Up-Up 공법

당 현장의 초고층 구조형식 중 아웃리거의 구조형식으로 풍하중과 지진하중과 같은 횡력은 건물 중심에 있는 철근 콘크리트 구조로 되어 있는 코어월과 16층, 55층에 있는 벨트월(belt wall)에 의해 견디게 되며, 철골철근 콘크리트 구조로 되어있는 외주부 기둥은 건물의 중력하중에 견디게 설계되어 있다. 이 벨트월은 9.6m의 높이와 800mm의 두께로 외주부를 따라 콘크리트 벽으로 구성되어 있어 순차적으로 시공하는 방법으로는 5개월의 공기가 소요

되게 되어 있어 전체공정에 영향을 미치게 되었다. 따라서 Non 기준층인 이 벨트월 층은 표준공정대로 진행이 어렵기 때문에 이를 스킵(skip)하고 상층부공사를 일정대로 진행하며, Non 기준층인 16층, 55층은 별도의 공정대로 진행하는 Up-Up 공법을 적용함으로써 약 5개월(2.5개월 × 2개 층)의 공기단축을 실현하였다.

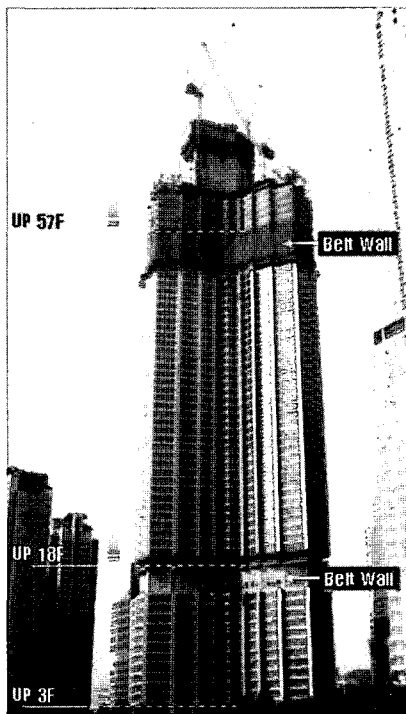


그림 21. Up-Up 공법 개념

③ ACS Form⁵⁾

코어 선형공법으로 층 당 3-일 공정을 실현하기 위해서는 ACS 거푸집이 사용되었고, 이 ACS 거푸집은 크레인의 지원 없이 거푸집 자체에 부착되어 있는 유압 잭을 이용하여 상승하는 시스템으로 유압 잭은 콘크리트 벽에 매립된 앵커에 지지되게 되어 있다. 따라서 거푸집의 상승속도는 콘크리트의 초기강도 발현과 상당히 밀접한 관계를 가지게 된다. 콘크리트 타설 후 14 ~ 16시간 후 탈형하여 거푸집이 상승하게 되어 있으므로 이때의 콘크리트 강도가 8MPa 이상이 되어야 거푸집 상승이 가능하다.

4. 맺음말

본고에서는 최근 국내에서도 활발하게 추진되고 있는 초고층건축물을 대상으로 초고층 RC조 건축물에 적용되는 핵심기술 중 재료 및 시공측면에서의 첨단 건축기술을 개괄함과 동시에, 현재, 국내에서 가장 높은 타워팰리스 III(69층)에 적용된 재료 및 시공기술을 중심으로 그 사례를 서술하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 초고층 RC조 건축물은 건축 계획, 구조, 재료 및 시공, 설비, 기계 등 모든 첨단 기술이 집약되어 실현된다는 것을 알 수 있었고, 이러한 첨단기술은 실제 국내 건설현장에서도 적용되어 검증이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

초고층 건축물은 보통 1일 유동인구가 4 ~ 5만, 공사비용이 약 5억 달러(US), 현시점의 최첨단 건축기술이 집약되는 고부가가치 산업임을 감안하면 국가에서도 전략적인 접근으로 지원하는 대책이 필요하다고 판단되며, 또한, 건설회사에서도 연구자에 의하여 개발된 첨단 건축재료 및 시공기술을 초고층 건설현장과 과감하게 적용하여 실용화하는 노력이 필요하다. 이러한 관점에서, 초고층 건설산업은 국가의 전략적 산업이자, 관련 건설산업을 선도하는 성장동력으로써 국내의 우수한 시공인력 및 선도 연구자들의 끊임없는 도전을 기원하는 바이다. □

참고문헌

1. 前田祥三, “超高层RC造の構造特性と構造計画”, 建築技術, 2002. 7.
2. 강훈, “고강도 콘크리트 제조 및 생산, 고강도 콘크리트 제조/설계/시공 기술”, 2002년도 제3회기술강좌, 한국콘크리트학회, 2002. 10
3. 김규동, “초고층 빌딩 적용을 위한 설계기준강도 800 kgf/cm² 고강도 콘크리트의 개발”, 2002 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집.
4. 박찬규, “냉각수 순환 형태의 파이프 쿨링 공법을 이용한 매스 콘크리트 수화열 제어”, 2001 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집.
5. 권상문, “초고층 건축물 시공을 위한 ACS Form 시공기술”, 2001 한국건축시공학회 학회지.
6. 신성우 외, “한국초고층건축포럼 제3차 심포지엄 논문집”, 한국초고층건축포럼, 2003.
7. 이한승 외, “건설산업 경쟁력 강화와 콘크리트 품질향상을 위한 국제 세미나”, 대한건축학회 국제세미나 논문집, 2003. 1.