



02

초고층 건축에서의 콘크리트 시공기술

Engineering of Concrete Work for Super Tall Building

이태왕 Lee Tae-Wang
롯데건설 월드타워 기술팀
대리

김영태 Kim Young-Tae
롯데건설 월드타워
RC팀장

신진웅 Shin Jin-Woong
롯데CP 고층건축팀
책임연구원

황원순 Hwang Won-Soon
한진정보통신
팀장

1. 머리말

롯데월드타워는 지상 123층, 지하 6층 규모로 판매시설, 업무시설, 호텔, 오피스텔, 갤러리 및 전망대로 구성되어 있으며, 최고높이는 555m로써 현재 공사가 진행 중인 국내 최고층 건물이다(사진 1).

월드타워의 골조 공사공법은 초고층 건축물의 공사공법으로 주로 적용되는 코어 월 선행공법을 채택하였으며, 선행되는 코어 월과 이를 추종하는 외주부 슬래브로 구성되고, 선행구간과 후행구간과의 층간 격차는 약 6~9개층을 유지하며 진행하였다.

코어 월 선행공법의 적절한 수행을 위해서 각 구간들은 작업조건 및 작업량의 효율성에 의한 수직 및 수평으로 여러 개의 작업 Zone으로 분할되었으며, 정밀한 일정관리로 진행되는 각각의 구간별 공정 요구사항을 만족시키기 위한 4대의 고압콘크리트 펌프와 이를 통하여 코어 월로 공급된 콘크리트를 원하는 타설 위치로 적절히 분배할 수 있도록 3대의 CPB(Concrete Placing Boom)를 설치하였다. 후행으로 진행되는 외주부, 메가기둥 및 코어내부로의 효율적 압송을 위하여 7개의 고압배관 라인을 운용하였다.

본 기사에서는 월드타워 프로젝트에 적용된 RC공사 요소기술을 기술하고, 초고층 RC공사의 정밀시공을 위한 GNSS(Global Navigation Satellite System)/경사계를 활용한 측량시스템, 고강도 콘크리트 초고층 압송을 위한 장비 선정과정 및 현장관리방안을 소개하고자 한다.

2. RC공사 계획

2.1 개요

월드타워의 MAT 기초의 물량을 제외한 전체 콘크리트 계획량은 약 20만 m³에 달한다. 전체 프로젝트의 공사기간 중 골조공사의 층당 공사 사이클은 최대 3-Day Cycle의 진행이 요구되어 졌으며, 랜턴부를 제외한 RC 구조부의



사진 1. 공사 전경

최대 타설 높이는 514 m로써 이의 효과적인 공사수행을 위해서 적절한 용량의 콘크리트 펌프 및 배관계획이 수립되었고, 코어 월 선행공법을 수행하기 위한 CPB가 적용되었다. CPB의 상승시 T/C의 양중부하를 발생시키지 않기 위하여 CPB on ACS 시스템 방식을 적용함으로써 브래킷 방식에 비하여 인양시간과 T/C의 양중부하를 줄여 T/C의 여유 자원을 본구조물 공사에 배정할 수 있도록 계획하였다.

2.2 공사를 위한 Zoning 계획

2.2.1 지하층 Zoning

월드타워 현장은 고층부의 코어 월 선행공법의 조기 안정화를 위하여 지하 6층부터 ACS 거푸집을 셋팅하였고, 코어 월 3개층 선행 이후시점에서 외주부의 슬래브를 후행으로 추종하였다. 외주부 슬래브는 작업량 분산 및 공기단축을 위하여 4개의 작업 Zone으로 분할하였고 구간별 타설 사이클을 조정함으로써 Zone간의 수축대(Shrinkage Strip)의 효과를 얻을 수 있도록 하였다.

지하층의 구조는 순수 RC조로 설계되어있고, 롯데월드몰(저층부 쇼퍼몰)과는 Delay Joint로 연결되며, 골조공사의 완료시점에서 추후 폐합되도록 계획되었다. 지하층의 콘크리트 타설은 일반적인 52 m급 이동식 펌프카를 이용하였으며, 고압 펌프의 본격적인 배치 및 가동은 Pumping Station의 위치 이동을 최소화하여 운영할 수 있도록 코어 월이 지상 5층에 도달하는 시점으로부터 착수하였다.

2.2.2 지상층 Zoning

지상층 구간은 순수 벽체선행공법을 적용한 코어 월(2-Zone), 메가컬럼(8EA 4-Zone)과 이를 후행으로 추종하는 외주부(4-Zone)로 각각 Zoning하였으며, 타설 장비의 효율성을 고려하여 4대의 고압 펌프와 3대의 CPB를 가동하였다. 메가기둥과 외주부 슬래브는 시공 중의 하중을 지탱하는 구조적인 연관성을 가지고 있어서 메가기둥 2개를 그룹핑하여 외주부 1개 Zone의 타설과 동시에 강도를 분리하여 타설을 실시하였다.

2.3 CPB on ACS 시스템 공법

지상층은 높이에 따른 타설 효율을 고려하여 지상 5층 타설 시점에서 CPB를 도입하였다. CPB란 지상의 콘크리트 배관을 통하여 압송된 콘크리트를 Tubular Mast에 설치된 붐을 조정하여 고층부에서 원하는 콘크리트 타설 위치에 직접 압송이 가능하도록 하는 장치를 말한다. CPB가 주로 적용되는 경우는 초고층 대형공사, 층고가 높은 건물, 코어 월 선행공법 적용시 VH 분리타설공법이 적용되는 현장 등에 주로 적용되며, 고정방법 및 운영방법에 따른 일반적인 분류법은 <그림 1>과 같다.

월드타워에 설치한 3대의 CPB는 고정식 마스터 형태로 설치되었으며(9 m×3 EA), 자동 상승되는 ACS 시스템을 이용하여 매층 타설후 1개층마다 코어 월의 ACS 시스템과 함께 인상하였다. CPB는 벽체두께 2 m에 이르는 거대 코어 월(35 m×35 m×2 m)의 타설을 위하여 붐길이 32 m 이상의 기중선정이 요구되었으며, 기존 발생되었던 국내 CPB의 사고사례를 검토하여 ACS 시스템을 이용한 상승 방식을 계획하였다.

코어 월의 ACS 시스템과 별도로 독립된 CPB 전용 시스템으로 계획하여 문제발생시 범위를 CPB 장비로 국한할 수 있도록 설계하였으며, 코어 월 ACS 시스템과의 가동중의 간섭을 고려하여 Counter Weight가 없는 기중을 선택하였다.

국내에 그 설치사례가 많지 않은 CPB on ACS 시스템 방식은 코어벽체에 지지되는 가설장비(Tower Crane, Hoist)들과 가동반경 내에서의 간섭발생이 최소화 되도록 배치하였으며, 공사가 상층부로 진행될수

구분	Core Wall 내부	Slab 중앙	Core Wall 외벽
설치 방법			
장점	<ul style="list-style-type: none"> ·작업범위 최대 활용 가능 ·Core Wall 선행시 최적 방법 ·Jack Up 시간 절약 가능 (Auto Climbing System 적용) 	<ul style="list-style-type: none"> ·일반 건축에 적용유리 ·공사비 절감 가능 ·사용용이 및 안전작업 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ·작업범위 최대 활용 가능 ·Core Wall 선행시 적용방법 ·Core Wall 내부에 설치 불가능시 적용방법
단점	<ul style="list-style-type: none"> ·매층 Core Wall 내부에 4개의 Opening Hall 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ·Core Wall 선행시 적용불가 ·매 층 Slab Opening Hall 필요 ·Jack Up 후 Opening Slab 폐우기 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ·공사비용 과다 ·Jack Up 시간 과다 소요 ·Embed Plate 사전 매입 필요 ·설치,해체 작업 시 위험 과다

그림 1. CPB 설치형태

록 큰 영향을 미치는 바람은 최대 평균풍속 164 km/hr에서도 안전한 시스템으로 설계하였다. 또한 지표면과 3°의 경사도를 이루고 있는 코어벽체의 경사면을 따라 수직을 유지하며 안정적인 인상작업이 가능하도록 CPB on ACS 시스템에는 2개의 이동식 조절 프레임을 설치하여 CPB Mast 경사각도의 조정이 가능하도록 계획하였다(그림 2).

2.4 양생계획

80 MPa의 초고강도 콘크리트가 타설되는 코어 월과 메가기둥은 4-Day Cycle로 진행되는 공정계획상 ACS 거푸집의 탈형과 후속작업을 위해 16시간 이내의 조기강도 발현이 필요하며, 적절한 범위 내에서의 균열이 제어되어야 한다. 코어 월 및 메가기둥의 ACS 거푸집에는 자동제어되는 가열 코일을 24시간 가동함으로써 적절한 수화열 제어와 콘크리트 내외부의 온도차로 인한 균열을 방지하였다. 또한 타설면의 상부에는 매회 타설후 버블 시트를 이용하여 외기와 접하는 부위의 보양조치를 실시하였다.

3. GNSS/경사계를 이용한 고정밀 수직도 관리

3.1 개요

초고층 빌딩은 크레인 작업, 바람의 영향 및 자중 등에 의하여 항상 크고 작은 거동을 하는데, 이 거동 중인 빌딩에서의 정밀 측량은 매우 어려운 일이다. 종래 광학측량만으로는 시공시 오차의 누적으로 인하여 빌딩이 기울

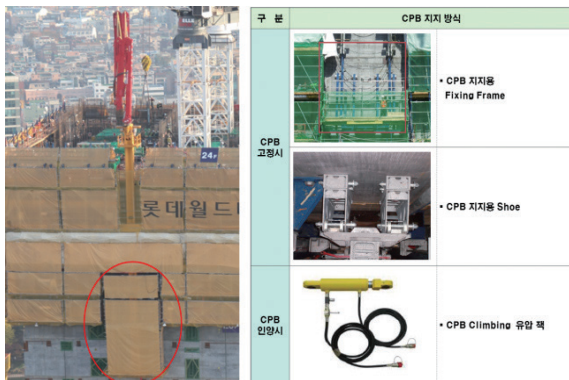


그림 2. CPB on ACS 의 가동

어 질 수 있으므로 초고층 빌딩의 수직도 관리 기술은 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

3.2 시스템 구성 및 운영

고정밀 수직도 관리를 위한 GNSS/경사계 시스템 구성은 <그림 3>과 같이 송파구청 옥상에 상시관측소 1개, 코어 월 ACS 상단부에 이동국 GNSS 3개, 경사계는 약 20층 마다 1개를 설치, 총 8개를 설치하였다(사진 2, 3).

GNSS 데이터 수신은 타워의 거동이 최소인 새벽 시간대(5시 ~ 7시) 또는 점심 시간대를 이용하였으며, 수신간격 1초, 정적측량 방식으로 약 1시간 동안 하였다. 경사계는 24시간 데이터를 수집할 수 있는 상시 센서로 1초마다 수신하였으며, 이 데이터는 기준점 좌표의 수평 위치 이동량을 나타낸다. GNSS는 최상층부 콘크리트 표면에 기준점 설치 및 수직도 관리를 위하여 ACS 상단부에 3개를 설치하고, 송파구청 옥상의 상시관측소와 상대측위 방법에 의하여 기준점의 좌표를 산출하였다.

<그림 4>는 GNSS 데이터 수신 현황을 나타낸 것으로 데이터 품질에 영향을 주는 위성개수, 다중경로오차, 싸이클슬립, 정밀도저하율(DOP) 등을 검토 하였다.

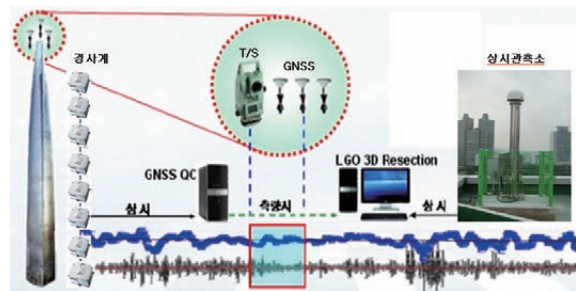


그림 3. GNSS/ 경사계 시스템 구성도



사진 2. GNSS 안테나

사진 3. 경사계

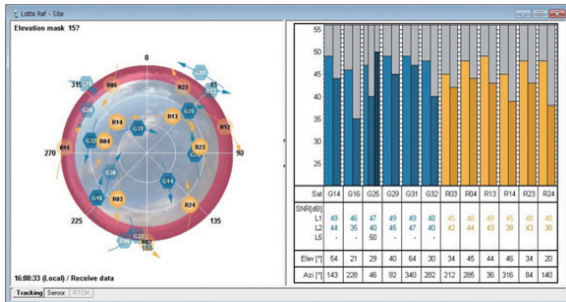


그림 4. GNSS 데이터 수신 현황

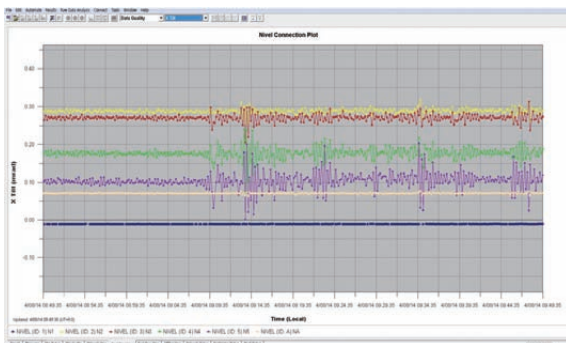


그림 5. 경사계별 데이터 수신 현황

(그림 5)는 경사계별 데이터 수신 현황을 나타낸 것으로 1초마다 타워의 거동을 감지해 유선으로 서버실 워크스테이션에서 데이터를 수집하여 관리하고 있다.

4. HPC 콘크리트 고층부 압송 기술

4.1 개요

최근 500 m 이상급 초고층 건축시 상부에 고강도 콘크리트를 목표 토출량 및 타설시간을 확보하기 위한 압송 계획으로 직접 압송(Direct Pumping) 기술을 적용이 활발해지고 있다. 그런데 이러한 기술 적용하기 위해서는 압송시 콘크리트의 특성뿐만 아니라 콘크리트 수직 압송 높이에 따른 고압 펌프(High Pressure Pump) 및 고압 배관(High Pressure Pipe)에 대한 결정이 최초 시공계획 작성시 선결되어야 한다.

4.2 압송장비 및 배관결정

압송장비, Burj Khalifa 압송계측 사례 및 압력부하 예측 프로그램 결과를 바탕으로 롯데월드타워에 사용

하기 위한 기본 장비 Lay-out을 검토하였다.

롯데월드타워는 골조 최고 압송높이 512 m, 최고강도 80 MPa의 고강도 콘크리트를 적용하며, 타설계획으로 직접 압송시 최상층부에서 시간당 최소 25 m³ 이상 압송이 가능해야 하는 시공조건이다.

해외 600 m급 압송결과를 분석한 결과 고압펌프에 걸리는 최대 압력은 최대 300 bar 내외, 이때 배관에 걸리는 압력은 최대 200 bar 정도인 것으로 나타났다.

따라서 직접 압송을 위한 장비 사양으로 고압펌프의 경우 <표 1>과 같이 장비 최대압력 360 Bar, 엔진출력 571kw급 초고압 펌프가, 고압배관의 경우 <표 2>와 같이 내경 5 inch(Φ125 mm), 허용 내압 200 bar 이상의 두께 8.8 mm의 고압배관이 필요할 것으로 검토되었다.

특히 300 m 이상 60 MPa급 고강도 콘크리트가 적용되는 코어 월의 경우 배관 내 압력 증가 및 토출효율 저감이 우려되어 배관압력을 저감시킬 수 있도록 <표 2, 3>과 같이 허용내압 250 bar 이상의 두께 11 mm의 6 inch 배관을 추가로 계획하였다.

표 1. 초고압 펌프 사양

구분	내용	
펌프	이미지	
	장비명	BSA14000SHP-D
	장비압력	최고 360 bar
	엔진출력	571 Kw
	제조사	Putzmeister(Germany)
실적	Burj Khalifa	

표 2. 고압배관 사양(5 inch)

구분	내용	
5 inch	이미지	
	내경	125 mm
	두께	8.8 mm
	허용 내압	Max. 200 bar
	테스트 압력	About 400 bar
	적용 부재	수평 부재(Slab)
	제조사	Putzmeister(Germany)
실적	Burj Khalifa	

표 3. 고압배관 사양(6 inch)

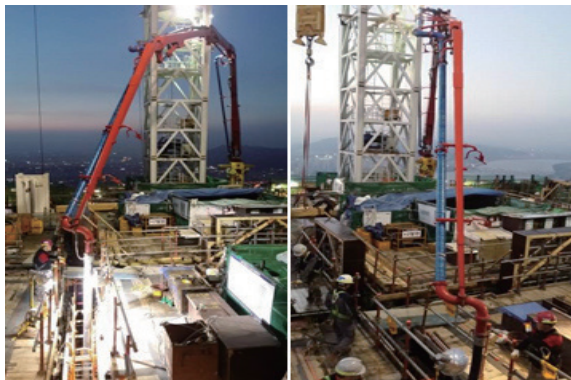
구분		내용
6 i n c h	이미지	
	내경	150 mm
	두께	11.0 mm
	허용 내압	Max. 250 Bar
	테스트 압력	About 500 Bar
	적용 부재	수직 부재(CPB)
	제조사	Putzmeister(Germany)
	실적	Burj Khalifa

4.3 현장 압송관리

지하 6층 코어 월 골조공사를 55 m 고압 펌프카로 고강도 콘크리트를 타설 시작한 이후, 지상 4층부터 <사진 4>와 같이 고압펌프 및 CPB를 활용하여 콘크리트 압송을 수행하였다. 특히 고압 펌프의 경우 코어 월 수직부재 CPB 타설용으로 2개, 기타 외주부 및 코어내부, 메가컬럼 및 기타 콘크리트 타설용으로 2개씩 총 4



(a) 고압 펌프 배치 전경



(b) CPB 설치 일례

사진 4. 고압 펌프 및 CPB 일례

대 펌프를 운영하고 있다. 실제 현장 타설관리에 있어서 고강도 콘크리트의 물성 차이에 따른 장비 이상유무 및 돌발상황을 방지하기 위하여 반입된 콘크리트에 대하여 전수 물성검사를 실시하였다.

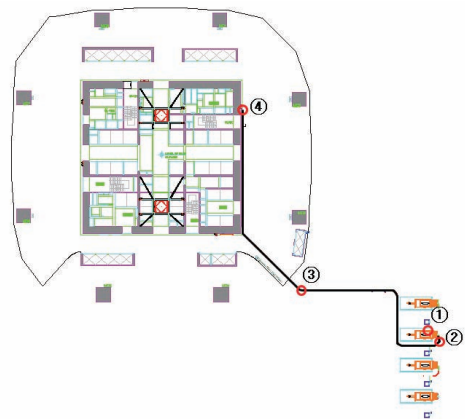
초고압 장비 및 고압배관의 압력 및 사용중 내구성에 기인한 고압배관의 두께 마모율 등과 같이 장비 운영을 위해 필요한 압송변수에 대해 매 5개 층마다 <그림 6>과 같이 지속적인 압력계측 및 배관 두께 측정 모니터링을 실시하고 있다.

이를 바탕으로 장비 유압 셋팅의 변경 시점, 5 inch에서 6 inch 배관으로의 교체 시점 및 장비 소모품에 대한 교체 시기 등을 결정하는데 활용하고 있다.

5. 맺음말

본 기사에서는 롯데월드타워 프로젝트의 초고층 RC 공사 요소기술과 GNSS/경사계를 활용한 정밀 측량시스템, 초고층 고압펌프에 대해 개략적으로 기술하였다.

초고층 구조물의 구조형식에 따라 골조공사의 공법은 지속적으로 개발이 필요한 사항이며, 국내 초고층 기술의 성장에 따라 공법의 최적화, 표준화 및 장비의



(a) 계측기 설치위치




(b) 배관 두께측정

그림 6. 배관 압력 및 두께측정

국산화 작업이 필요하다고 판단된다.

초고층 구조물의 정밀시공을 위한 측량기술 또한 토목기술과 건축의 초고층 기술을 융합하여 GNSS, 경사계, 가속도계, 측량기기 등을 활용한 표준화된 측량 시스템 개발이 필요하다. 나아가 측량시스템과 초고층 구조물의 건전성을 실시간 모니터링 할 수 있는 SHM과 연계하는 것 또한 필요한 과제로 판단된다.

향후 초고층 구조물의 시공기술 발전을 위해 설계사, 구조전문가, 시공사, 전문 ENG. 업체, 시공 전문업체 등이 참여하는 통합 엔지니어링 활동이 활성화 되어야 할 필요가 있으며, 유기적인 협업관계와 체계적인 시스템 구축이 요구된다고 판단된다. 

담당 편집위원 : 김재요(광운대학교) kimjyo@kw.ac.kr



이태왕 대리는 동양대학교 건축공학과 박사과정에 재학 중이며, 2012년부터 롯데건설 콘크리트 기술팀에서 근무하고 있다. 주요 담당 업무는 펌프압송 및 고강도 콘크리트 현장 품질관리를 담당하고 있다.

wang0306@lottenc.com



김영태 팀장은 아주대학교 건축학과를 졸업하였고, 목동 하이패리온현장(1999)과 서초슈퍼빌현장(2003) 등 국내의 300m급 타워의 공사담당을 거쳐 2010년부터 현재까지 잠실 제2롯데월드의 월드타워현장에서 RC팀장 업무를 수행하고 있다.

siteplan@lottenc.com



신진웅 책임은 동명대학교 건축공학과를 졸업하였고, 포스코건설에서 초고층 현장 공사기술업무를 수행하였으며, 현재 롯데 CP프로젝트 고층건축팀에서 공사기술 업무를 수행하고 있다.

woongs@lotte.net



황원순 팀장은 명지대학교 토목공학과에서 측량 및 GIS 전공으로 박사학위를 취득한 후 현재 한진정보통신에서 근무하고 있으며, 롯데월드타워 확인측량 팀장 업무를 수행하고 있다.

whwang@hist.co.kr