

무다짐 콘크리트와 파이프쿨링 시스템을 이용한 초고층 빌딩 매트 기초 시공 사례

- An Application of Non-Vibrating Concrete and Pipe Cooling System on Mat Foundation -



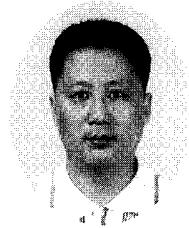
구자종*



김용서**



한형기***



이승훈****



박찬규****

1. 머리말

서울특별시 강남구 도곡동에 위치한 타워팰리스 3차 J.V 현장은 지하 6층, 지상 69층 규모로 높이 263m이며, 공사기간은 2001년 4월에 시작되어 2003년 12월에 완료되는 국내 최고층 주거용 건축물로서 순수 주거 건축물로서는 세계에서 가장 높은 건축물로 기록되고 있다. 또한, 이 건물은 주거용 건물 중 외장이 가장 화려하

고 건축적 조형미가 탁월하며 바닥 면적에 비해 외주부 길이가 상대적으로 큰 건축적 특성을 가지고 있다.

본 프로젝트는 삼성물산(주) 건설부문과 삼성중공업 건설부문의 기술력과 조력을 결합시켜 시너지 효과를 최대로 발휘함으로써, 설계를 진행하면서 2~3개월 정도의 간격을 두고 시공이 따라가는 "Fast Track System"이 적용됨에도 불구하고 세계에서 가장 빠른 공사 속도를

자랑하고 있는 선진 미국과 버금가는 속도인 층당 13.4일(총 33개월)이라는 속도로 빠르게 공사가 추진되어 국내 건축 시공 기술의 발전에 큰 전환점이 되었다. 이 건물의 시행사는 삼성생명이며, 설계는 기본설계의 경우 미국의 SOM사에서, 실시설계는 삼우건축 설계사무소에 의해서 각각 수행되었다.

〈표 1〉은 건물의 개요를 나타낸 것이며, 〈표 2〉는 구조설계기준을 나타낸 것이다.

표 1. 건물 개요

지역 지구	일반상업지구, 도시설계구역		
대지 면적	5,422 평	건축 면적	2,075 평
건폐율	38.15 %	용적율	796.52 %
연면적	67,665 평 (지상 : 43,260 평 / 지하 : 24,405 평)		
층수	Tower(지하 6층, 지상 69층) / 스포츠클럽(지하 1층, 지상7층)		
구조	철골 철근 콘크리트조		
주차 댓수	1,777대 (세대당 2.91대)		
승강 댓수	승객용(17인승) 17대, 비상용 2대, 셔틀용 3대		

표 2. 구조설계기준

구분	세부사항
설계기본풍속	- 30m/sec
지진하중	- 국내기준 (진도 6.0 규모)
철골부재설계	- 국내 강구조 설계기준 + SRC (합성기둥적용)
철근콘크리트 부재설계	- 국내기준(국강강도설계법), ACI 318-95, PCI
콘크리트 강도	- RC Core : 500, 400kgf/cm ² - SRC 기둥 : 800, 600, 400kgf/cm ² - 지상층 슬래브 : 240kgf/cm ² - 기초부 : 400, 300kgf/cm ²
철골강도	- SM 490 (F _y = 3,300kgf/cm ² , TMCP 강)
철근강도	- SD 40 (F _y = 4,000kgf/cm ²)

* 타워팰리스 3차 J.V 현장 부소장

** 타워팰리스 3차 J.V 현장 공사1팀장

*** 타워팰리스 3차 J.V 현장 설비팀장

**** 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원

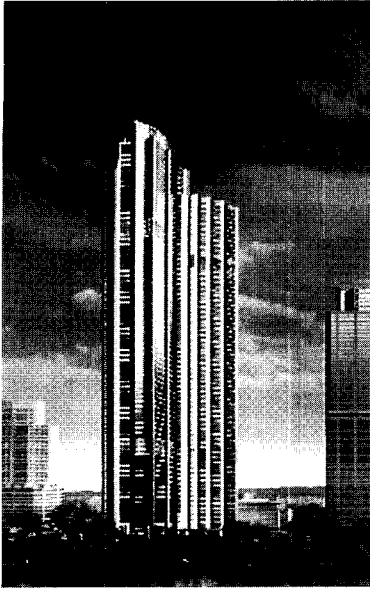


그림 1. 완공후의 조감도

<그림 1>은 완공 후의 조감도를 나타낸 것이며, <그림 2>는 구조개요를 나타낸 것이다.

2. 공사개요

2.1 매트 기초 개요

매트 기초는 75층(지하6층, 지상 69층)구조물의 기초가 되는 구조물로 골조공사의 시작이라 할 수 있다. 설계강도는 400kg/cm²이며, 바닥 면적은 2,320m²(702坪)이고, 높이는 3.5m, 둘레의 길이는 217m에 이르며, 전체적으로 삼각형 모양을 한 대형 매스구조물로서, 매트 기초에 타설 될 콘크리트의 양은 약 8,000m³에 이른다. 매트 기초에 사용된 주요 자재 물량은 <표 3>과 같다.

2.2 매트 기초 적용기술

2.2.1 무다짐 콘크리트

매트 기초의 콘크리트 타설량은 약 8,000m³로서 당일 타설량으로는 국내 최대 규모를 가지고 있기 때문에 타설 효율을 극대화 시킴으로서 약 14시간 내에 8,000m³를 타설 완료하여 소음 규제치가 상대적으로 강한 저녁시간 이전에 모든 타설이 완료될 수 있도록 계획하였다.

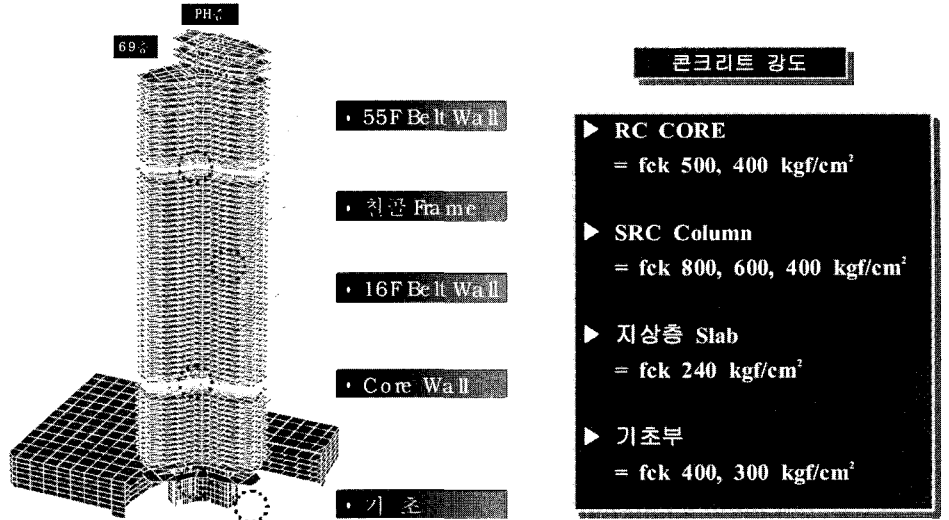


그림 2. 구조 개요

표 3. 주요자재 투입물량

자재명	규격	단위	투입량	비고
철근	SD40, 주근 35D	Ton	1,130	-
콘크리트	20-400-65	m ³	8,000	무다짐 콘크리트
Bar Chair	H-100×100×6×8 등	개소	280	-
Pipe	1인치	m	10,800	SUS 주름관
Filler	THK.20	m ²	805	아티론 보온재

그러나, 일반 콘크리트를 타설 할 경우에는 균등한 높이로 골고루 타설 하여야 재료 분리가 콜드조인트(cold joint)를 방지할 수 있으므로 콘크리트 펌프 카의 붐(Boom) 위치를 자주 이동해야 하며, 또한 펌프 카 1대 당 3~4대의 진동 다짐 장비가 투입되어 다짐 작업을 병행하여야 하기 때문에 콘크리트 타설 시간은 상당히 지연되며, 사전 계획처럼 14시간 안에 콘크리트 타설을 완료하는 것은 거의 불가능하였다. 따라서, 타설 시간을 가능한 한 최소화 하기 위하여 콘크리트의 유동성을 극대화 함으로써 콘크리트 펌프 카의 부하를 줄여 시공 효율을 증대시키며, 진동 다짐이 필요없게 되어 결국 타설 시간을 단축시킬 수 있다는 점을 착안하였다.

이러한 측면에서 당 현장에서는 콘크리트 펌프 카의 붐을 이동하지 않고, 또한 진동 다짐 장비 없이도 콘크리트가 약 20m 정도를 재료 분리 없이 흘러갈 수 있는 초유동 콘크리트를 적용하는 것이 타설 시간을 최대한 단축시키는 최선의 방법이라고 결정하였다. 또한, 진동 다짐을 제

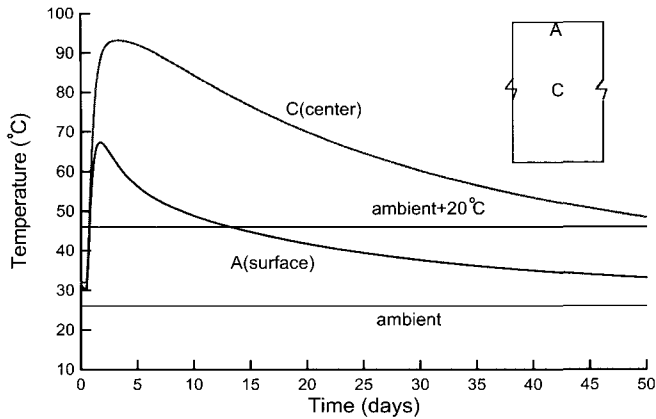
거함으로써 소음 방지로 인한 민원 예방 측면에서도 최선일 수 있다는 판단 하에 무다짐 콘크리트를 적용하기로 결정하였다.

결과적으로 무다짐 콘크리트를 매트 기초에 적용함으로써, 콘크리트 다짐 장비가 필요 없게 되며, 최소 30대 이상의 다짐 장비가 동시에 작동될 때의 소음없이 매우 조용하게 콘크리트 타설을 완료할 수 있었다.

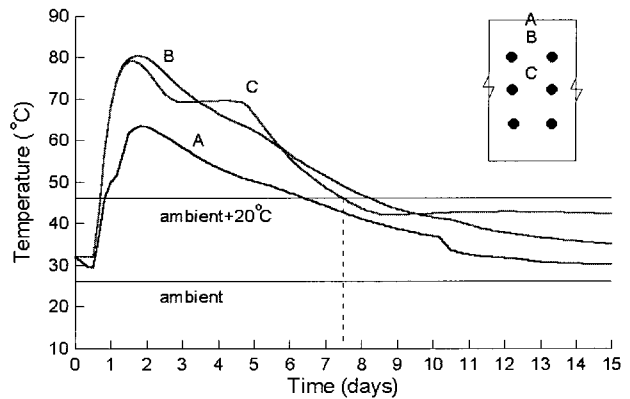
본 콘크리트는 삼성물산(주) 건설부문의 기술연구소의 기술력에 의해 개발되었으며, 향후에도 콜드조인트나 재료분리를 피해야 되는 구조물 및 노출콘크리트 시공 시에도 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

2.2.2 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템 (Closed Pipe Cooling System)

매스 콘크리트에서는 수화열 관리가 매우 중요하다. 당 현장의 매트 기초의 경우 두께가 3.5m이며, 설계강도가 400kg/cm²인 고강도 콘크리트이고, 결합제 방식의 무다짐 콘크리트가 적용되므로 일반 콘크리트에 비해서는 수화열에 의한 온도 상승량이 매우 커지게 된다.



(a) Pipe Cooling을 하지 않은 경우



(b) Pipe Cooling을 하는 경우 (수평방향으로 파이프 배근)

그림 3. 파이프 쿨링 유무에 따른 콘크리트 수화열 해석결과

그러나 이러한 문제는 당 현장에서 또 하나의 당면 문제인 양생기간을 최소화하기 위하여 적용하기로 한 파이프 쿨링 시스템에 의하여 해결될 수 있었다.

사전 수화열 해석결과인 <그림 3>에 의하면 파이프 쿨링 시스템을 적용하지 않았을 때의 매트 기초 중앙부의 온도가 약 93°C까지 올라갔으며, 양생 기간도 50일 이상이나 소요될 것으로 예상되었다. 그러나 파이프 쿨링 시스템을 적용할 경우에는 매트 기초 중앙부의 온도가 80°C정도로 낮아지며, 양생기간도 8일 이내로 줄어 들어 전체공기를 약 1개월 이상 단축할 수 있는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

파이프 쿨링 시스템은 국내에서 주로 댐이나 교각과 같은 토목 현장에서 여러 차례 적용된 사례가 있었으나, 건축 구조물에서는 거의 적용 사례가 없었다. 또한, 토목 현장의 경우 하천수나 지하수 등을 쉽게 확보할 수 있어서 냉각수로 이용하기가 용이한 반면 도심지 건축 현장에서는 냉각수 공급 문제로 인하여 그 적용이 매우 어려운 공법이다. 그러나 당 현장에서는 냉각탑(Cooling Tower)을 이용한 냉각시스템을 구축한 "냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템 (Closed Pipe Cooling System)"을 적용함으로써 대량의 냉각수 공급 문제를 해결한 것이 특징이라 하겠다.

"냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템 (Closed Pipe Cooling System)"은 입출수의 온도, 콘크리트의 내부 온도 등을 계속 측정하여 냉각수의 유입속도, 압력, 유

입수의 온도조절 및 유입시간을 조절하는 등 고도의 기술력과 경험이 필요하며, 이를 데이터베이스화한 프로그램이 절대적으로 필요하다. 당 현장에서 "냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템"을 검토했던 절차는 다음과 같다.

첫째, 매트기초에 대한 수화열 해석으로 가장 적정한 파이프의 간격 및 위치를 설계하였으며, 둘째, 파이프 쿨링 수화열 해석을 통하여 유입수 및 유출수 설계한계 온도를 산정하여 물의 유입속도를 결정하고 총 유입량을 산정하였으며, 세 번째는 냉각기 및 사전 통수시험에 따른 냉각수 통수속도 및 통수량 등의 현장조건을 기준으로 최종의 수화열 해석을 하여 통수속도 및 통수시간 제어값을 검토하였으며, 파이프 쿨링 설계에 대한 신뢰성을 확보하였다. 이후 타설 후의 보온양생기간을 산정하였다.

2.2.3 물류관리시스템

타설 당일 레미콘 4개사의 8대의 배치플랜트로부터 동시에 콘크리트를 생산하였으며, 약 150대의 레미콘 트럭이 현장을 왕복하며 공급하였다. 따라서 각 레미콘 회사별 생산현황, 현장반입현황, 타설 완료현황 등을 실시간으로 파악하여야 만이 생산시의 문제점, 돌발상황 발생여부, 교통상황 등을 적기에 파악할 수 있어 타설 시간이 지연되는 것을 막을 수 있다. 그리고 마지막 타설 물량 조정 시에도 조기에 정확한 운반현황을 파악함으로써 마무리에 필요한 시간을 단축시킬 수 있게 된다.

이러한 현장의 요구 조건을 만족시키기 위하여 당사에서 기계발전 "인터넷을 이용한 물류관리 시스템"을 적용하여 큰 성과를 보게 되었다. <그림 4>는 물류관리 시스템의 개념도를 나타낸 것이다.

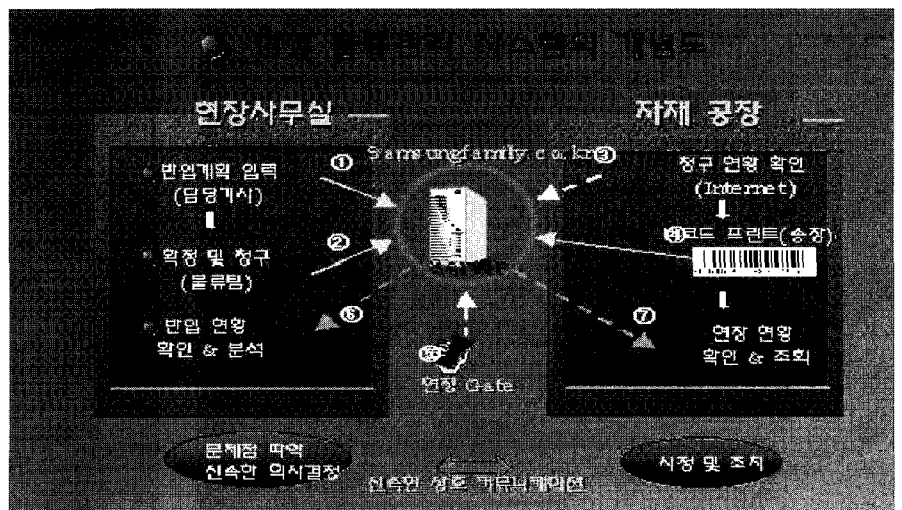


그림 4. 물류관리 시스템의 개념도

3. 무다짐 콘크리트의 제조

3.1 사용재료

고품질의 무다짐 콘크리트 제조를 위해서는 시멘트, 골재, 혼화재 및 혼화제에 대한 사전검토를 통하여 재료 선정 및 관리에 상당한 주의를 기울여야 한다.

(1) 시멘트

무다짐 콘크리트의 경우 시멘트의 품질은 콘크리트의 유동성에 상당한 영향을 미친다. 특히, 시멘트 입자의 분포, 시멘트 페이스트의 유동성, 시멘트의 혼화제 흡착률 등에 따라서 무다짐 콘크리트의 유동성은 영향을 받게 된다. 본 배합에서는 비중이 3.15이고 분말도가 3,200~3,300 cm²/g인 A사의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 물리·화학적 성질은 <표 4>와 같다.

(2) 혼화재

혼화제로는 비중이 2.17이고 분말도가 3,600 cm²/g 전후인 보령산 플라이애쉬를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 <표 5>에 나타낸 바와 같다.

(3) 골재

굵은 골재는 무다짐 콘크리트의 유동성 및 분리저항성에 상당한 영향을 미치기 때문에 골재의 선정에 주의를 기울여야 한다. 굵은 골재는 최대크기가 20mm이며, 비중이 2.6~2.7인 부순 골재를 사용하였으며, 잔골재는 인천 세척사를 사용하였다.

굵은 골재의 경우 25mm 골재를 사용하면 유동성에 영향을 주게 되며, 비중이 높은 (2.70 이상) 골재를 사용하더라도 골재와 페이스트의 비중차에 의해서 골재가 침강하여 재료분리의 가능성이 높아지게 된다. 잔골재는 4개사 모두 세척사를 사용하였다. 본 배합에 사용된 잔골재 및 굵은

골재의 물리적 성질은 <표 6>에 나타내었다.

(4) 혼화제 (고성능 감수제)

무다짐 콘크리트에 사용된 고성능 감수제는 사전에 여러 가지 검토를 통하여 무다짐 콘크리트에 적합한 고성능 감수제를 제조하였다. 본 배합에 사용된 무다짐 콘크리트용 고성능 감수제는 D사 제품인 "2000N" 이며, 그에 대한 물리적 성질 및 화학적 성분은 <표 7>과 같다.

3.2 무다짐 콘크리트 관리기준

무다짐 콘크리트의 관리기준은 표 8과 같다. 무다짐 콘크리트는 생산 후 60분 동안 슬럼프 플로우의 변동이 없으며, 공기량은 생산 초기에 조금 높게 측정되지만 실제 공기량은 생산 후 약 15분 경과 이후에 안정된 값을 나타내어 2~4% 정도의 범위를 나타낸다.

표 4. 시멘트의 물리·화학적 성질

비중	분말도 (cm ² /g)	응결도 (h:m)		화학성분 (%)		강열감량 (%)	안정도 (%)	압축강도 (kg/cm ²)		
		초결	종결	MgO	SO ₃			3일	7일	28일
3.15	3,267	3:55	5:46	2.06	1.89*	0.79	0.06	202	301	416

* SO₃ 함량은 C₃A > 8% 이상일 경우의 값

표 5. 플라이애쉬의 물리·화학적 성질

비중	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	단위수량비 (%)	SiO ₂ (%)	압축강도비 (28일, %)
2.17	3,520	3.2	0.1	97	57	96

표 6. 골재의 물리적 성질

골재 구분	최대 골재크기 (mm)	조립율 (F.M.)	비중	흡수율 (%)
잔골재	-	2.80~2.83	2.62~2.65	0.86~0.98
굵은골재	20	6.46~6.69	2.65~2.68	0.86~0.96

표 7. 고성능 감수제의 물리적 성질 및 화학적 성분

용도	제품명	유형	색상	주성분	고형분	pH	비중
무다짐 콘크리트용	2000N	액상	암갈색	나프탈렌계	35.0%	5.66	1.195

표 8. 무다짐 콘크리트 관리기준

부재 종류	설계 강도 (kg/cm ²)	관정기준					
		Slump Flow (cm)		U형 충전시험 (cm)		공기량 기준	시험 재령
매트 기초	400	초기	60분	초기	60분		
		65±5cm	65±5cm	≥32cm	≥32cm	≥400kg/cm ²	

공기량이 너무 높게 나올 경우에는 콘크리트 타설 후 블리이딩에 의한 레이턴스가 매우 증가하게 된다. 무다짐 콘크리트는 플라이애쉬가 상당량 사용되므로 저발열 콘크리트의 특성을 가지게 되어 압축강도 측정 기준을 재령 56일로 하는 것이 적절할 것으로 판단되었다.

무다짐 콘크리트의 최적 배합을 도출하기 위해서는 기존의 콘크리트 시험 방법과는 달리 슬럼프 플로우 시험, 50cm 도달 속도 및 U형 충전시험이 적용된다. 이외에도 L-Flow 시험 및 V-Lot 시험 등이 있으나 그 동안의 시험 결과에 의하면 슬럼프 플로우 시험, 50cm 도달 속도 및 U형 충전시험 만으로도 무다짐 콘크리트의 물성을 정확하게 판단할 수 있기 때문에 본 배합에서는 L-Flow 시험 및 V-Lot 시험은 배제하였다.

3.3 무다짐 콘크리트 배합설계

본 프로젝트에 적용된 무다짐 콘크리트는 결합재 방식을 사용하였으며, 결합재 방식의 무다짐 콘크리트의 배합설계는 <그림 5>와 같은 순서에 의해서 진행하였다.

<그림 5>에 나타난 순서에 의하여 배합설계를 실시하였으며, 그에 따라 결정된 최종배합비는 <표 9>와 같다. <표 10>은 최종배합에 대한 굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과를 나타낸 것이며, <표 11>은 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다.

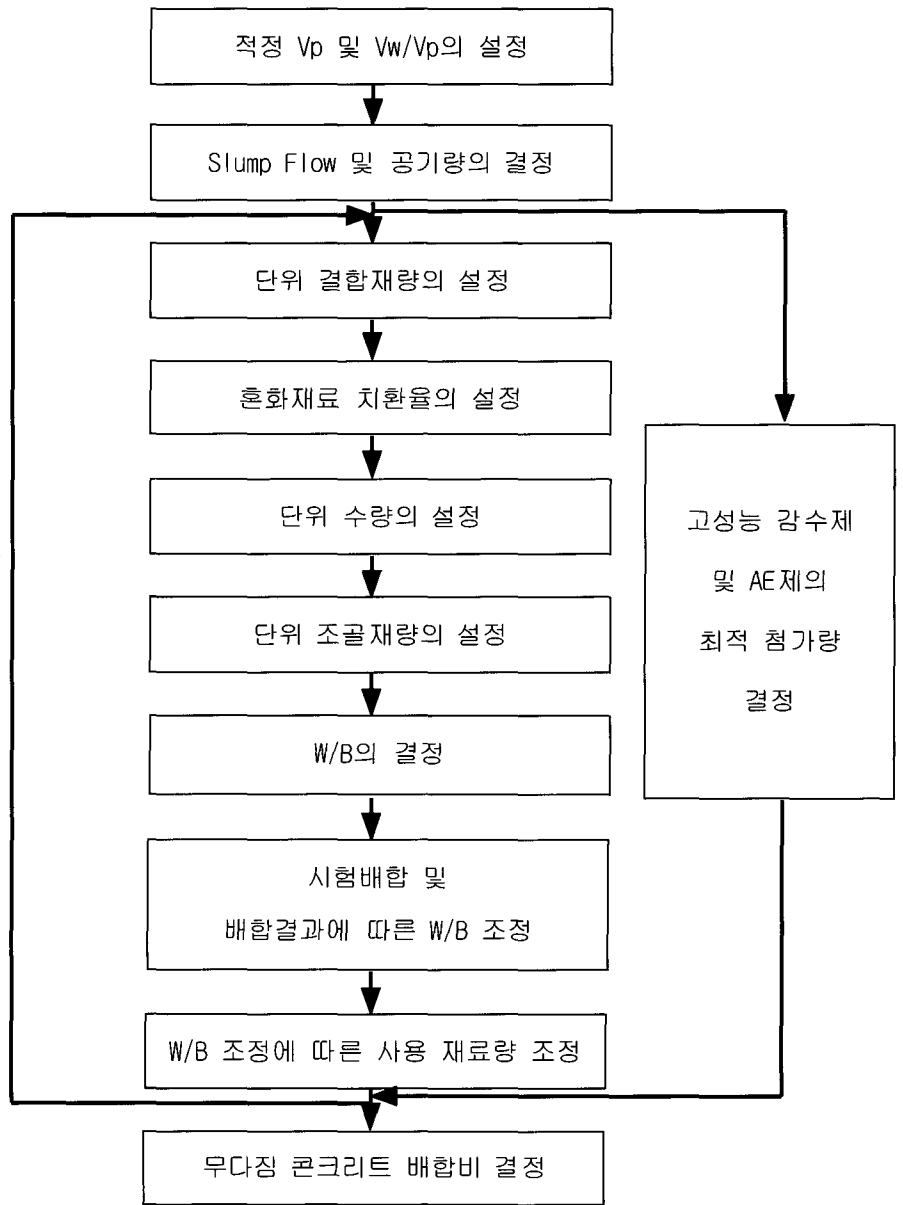


그림 5. 무다짐 콘크리트의 배합설계 흐름도

표 9. 최종배합비

W/B (%)	B	G _v (m ³ /m ³)	S/a (%)	V _p (m ³ /m ³)	V _w /V _p	단위재료량			
						W	C	F/A(B×%)	S.P(B×%)
33.6	515	0.297	51.8	0.181	0.95	173	386	129(25)	1.6

표 10. 굳지 않은 콘크리트의 물성시험 결과

시험 구분	슬럼프 플로우(cm/cm)			50cm 도달시간			U형충전	공기량(%)		온도 (°C)
	0분	40분	60분	0분	40분	60분	60분	0분	60분	
측정값	70/70	69/70	69/70	2.3	3.8	4.2	355	9.6	2.9	27.3

표 11. 압축강도 측정결과

W/B (%)	결합재	G _v (m ³ /m ³)	S/a (%)	F/A 치환율(%)	압축강도 (kg/cm ²)				
					3일	7일	14일	28일	56일
33.6	515	0.297	51.8	25	242	395	477	537	622

4. 무다짐 콘크리트의 시공

4.1 사전 계획

4.1.1 콘크리트 생산 계획

매트 기초의 시공은 약 8,000m³의 콘크리트를 타설하는 대규모 공사로서, 4개 레미콘공장에서 생산 및 공급하였다. 각 사별 생산량은 2,000m³를 기준으로 하였으며, 각 레미콘공장의 배치플랜트를 모두 가동하여 타설 당일은 당 현장의 무다짐 콘크리트만을 생산하도록 하였다. 배치플랜트의 배합시간은 70초로 정하였으며, 시간당 생산량은 최대 30대로 하여 각 공장당 전체 생산시간을 14시간으로 조정하였다. <표 12>는 각 사별 콘크리트 생산 계획을 나타낸 것이다.

4.1.2 콘크리트 시험계획

무다짐 콘크리트의 품질시험은 매 150 m³마다 이루어졌으며, 시험 항목으로는 슬럼프 플로우, 공기량, 염화물 함유량, 콘크리트 온도 등이며 공장 출고 전 및 현장 타설 전에 점검되었다. <표 13>은 현장 및 공장에서의 품질시험 계획을 나타낸 것이다.

4.1.3 레미콘 차량 및 동선계획

매트 기초의 콘크리트 타설에 참여한 4개 레미콘공장은 공장별로 고유의 색깔을 부여하고 매차마다 고유 색깔의 색지에 타설 순서별로 숫자를 명시하여 현장에서 쉽게 육안으로 구분될 수 있도록 하였으며, 또한 타설 지역의 관련 인원 및 제반 색상을 통일함으로써 각각의 차량이 쉽게 자기 타설 지역을 찾아갈 수 있도록 하였다.

레미콘 차량의 동선은 크게 입차와 출차를 분리하여 계획하였다. 입차는 2개소로 나누어 차량의 분산을 유도하였고, 출차는 한 방향으로 유도하여 관리에 편의를 도모하였다. 현장 내부의 타설 위치는 신일과 선일을 Orange Zone 인근의 펌프 카를 통하여 타설 되도록 배치하였고, 아주와 아세이는 Blue Zone과 Green Zone의 펌프 카를 통해 타설 되도록 하였다.

표 12 각 사별 콘크리트 생산 계획

경과 시간	시간 (시)	시간당 생산대수	각사 누적 생산 대수				타설량
			아주	신일CM	선일	아세아	
1	05~06	15(10)	15	10	15	15	330m ³
2	06~07	20(25)	35	35	35	35	840m ³
3	07~08	25	60	60	60	60	1,440m ³
4	08~09	25	85	85	85	85	2,040m ³
5	09~10	30	115	115	115	115	2,760m ³
6	10~11	30	145	145	145	145	3,480m ³
7	11~12	30	175	175	175	175	4,200m ³
Sub Total			1,050m ³	1,050m ³	1,050m ³	1,050m ³	4,200m ³
8	12~13	25	200	200	200	200	4,800m ³
9	13~14	30	230	230	230	230	5,520m ³
10	14~15	30	260	260	260	260	6,240m ³
11	15~16	30	290	290	290	290	6,960m ³
12	16~17	30	320	320	320	320	7,680m ³
13	17~17:30	10	330	330	330	330	7,920m ³
Sub Total			1,980m ³	1,980m ³	1,980m ³	1,980	7,920m ³
14	17:30~19	물량 조정	-	-	-	-	

표 13. 품질시험 항목

구 분		검토항목
공 장	콘크리트 물성검토	슬럼프 플로우, 공기량, 염화물 함유량, 콘크리트 온도, 외기온도
	생산 및 기타검토	몰드 제작 생산시간, 운반시간, 계량오차
현 장	콘크리트 물성검토	슬럼프 플로우, 공기량, 염화물 함유량, 콘크리트 온도, 외기온도
	기타검토	몰드 제작 현장 타설 시간

4.2 매트 기초 타설 결과

매트 기초는 2001년 8월 4일 새벽 5시 45분 첫 타설을 시작으로 하여 약 8,000m³의 콘크리트가 14시간 만에 타설

완료되었다. 시간당 약 570m³의 콘크리트가 타설 되었으며, 펌프 카 1대당 평균 타설 량은 65~70m³/hour 정도였다. <사진 1>은 매트 기초 시공전경을 나타낸 것이며, <사진 2>는 다짐작업 없이 시공되고 있는 모습을 나타낸 것이다.

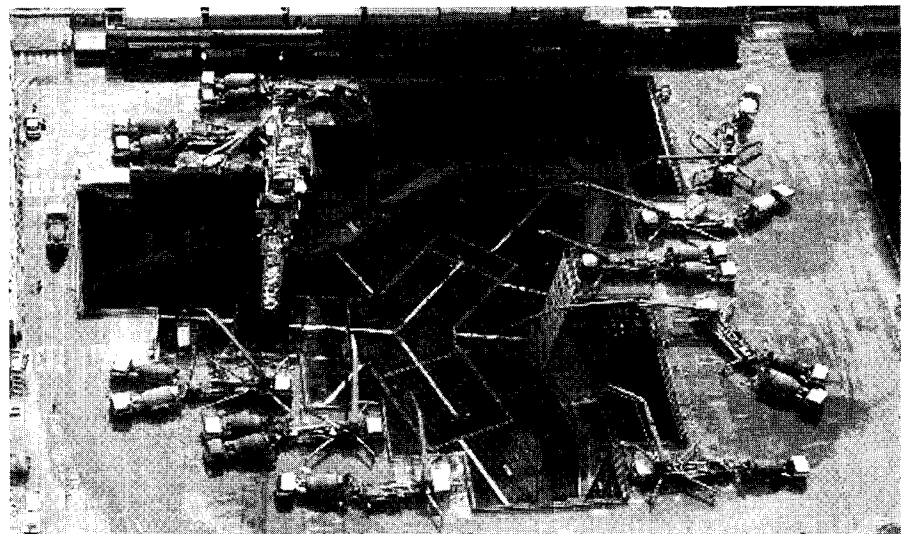


사진 1. 매트 기초 시공 전경

무다짐 콘크리트를 이용한 매트 기초의 타설은 <그림 6>~<그림 8>과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

4.3 현장시험결과

4.3.1 굳지 않은 콘크리트의 시험결과

무다짐 콘크리트의 공장 및 현장에서의 슬럼프 플로우 기준은 $65 \pm 5\text{cm}$ 로서, 4개 레미콘에 대하여 공장 및 현장에서 측정된 슬럼프 플로우 시험 결과는 <표 14>와 같다.



사진 2. 다짐 작업없이 콘크리트를 타설 하는 모습

시간당 타설량

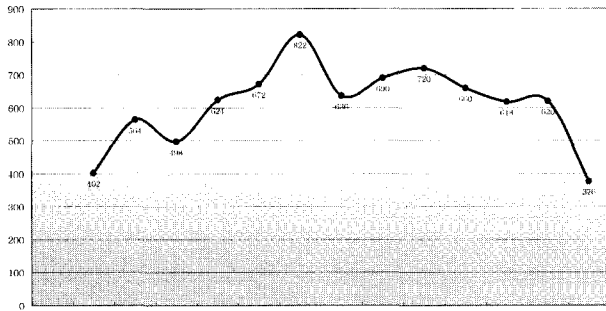


그림 6. 시간당 타설량

누적타설량

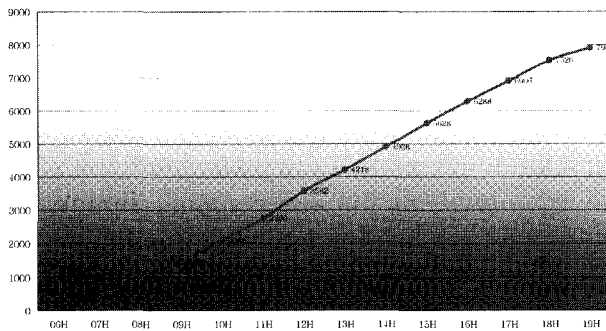


그림 7. 시간대별 누적 타설량

Pump Car 1대당 타설량

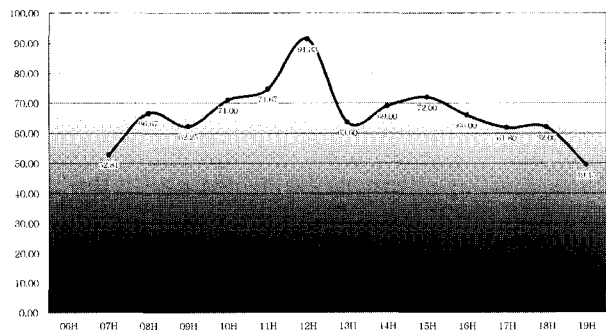


그림 8. 펌프 카 1대당 평균 타설량

표 14. 슬럼프 플로우 시험 결과

구분 (20-400 -65) (8000m³)	슬럼프 플로우 (cm/cm)							
	신일		아주		아세아		선일	
	공장 (0분)	현장 (도착)	공장 (0분)	현장 (도착)	공장 (0분)	현장 (도착)	공장 (0분)	현장 (도착)
1	68*69	69*70	70*69	70*69	70*70	68*67	70*70	70*66
2	68*69	-	69*68	-	70*70	-	70*70	-
3	68*67	-	69*70	-	68*69	-	71*71	-
4	63*63	-	67*68	-	65*65	-	63*60	-
5	65*66	-	69*70	-	65*66	-	70*68	-
6	65*66	-	65*66	-	65*68	-	71*68	-
7	67*67	-	65*66	-	66*68	-	67*68	-
8	68*68	-	64*65	-	68*70	-	71*70	-
9	66*66	-	66*67	-	66*68	-	69*68	-
10	68*68	-	70*69	-	70*70	-	70*70	-
25	68*67	68*69	63*64	68*67	67*68	68*68	64*64	66*68
50	65*64	65*67	67*68	66*66	66*68	67*65	67*64	69*70
75	63*64	63*65	66*65	68*67	67*68	65*66	63*64	70*66
100	67*67	68*67	69*70	66*67	66*68	65*65	64*65	65*63
125	65*65	65*66	64*65	66*65	65*67	65*63	58*59	62*62
150	65*65	66*67	67*68	67*66	67*68	67*68	62*63	64*67
175	66*67	66*65	67*68	67*69	68*68	68*68	64*65	68*68
200	66*67	64*69	70*69	67*66	65*66	62*64	61*63	68*69
225	64*64	64*66	66*67	66*66	65*66	65*66	62*63	67*65
250	66*66	68*69	66*65	67*67	66*67	66*65	63*64	62*61
275	65*64	66*68	68*66	65*66	68*68	69*66		
300	62*62	68*67	65*66	62*65				
325	61*61	66*65	65*64	67*67				
350	63*63	67*66	65*66	-				
375	61*61	68*69						
400	-	67*67						

4.3.2 압축강도 측정결과

무다짐 콘크리트의 압축강도는 재령 56일을 기준으로 하였으나, 결합재 방식의 무다짐 콘크리트의 특성상 설계기준강도 400kg/cm²를 상당히 초과하는 배합이 도출되어 강도 측면에서는 매우 안정적임을 알 수 있었다. <표 15>는 공장 및 현장제작 공시체의 각 사별 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다.

5. 냉각수 순환 파이프쿨링 시스템 (Closed Pipe Cooling System)의 적용

5.1 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템의 개요

일반적으로 매스 콘크리트 부재의 균열 제어를 위한 양생은 보온양생을 기본으로 한다. 그러나 부재의 두께가 클 경우, 양생기간은 매우 증가하여 1개월 이상이 소요되기 때문에 이러한 양생기간은 공사에 상당한 부담이 되며, 경제성 측면에서도 매우 비효율적이다. 따라서 보다 적극적인 양생 기법으로써 파이프 쿨링에 의한 양생 방법이 적용되며, 이 경우 양생기간은 경우에 따라 차이는 있으나 약 10일 정도로 줄어들어 파이프 쿨링을 하지 않은 경우에 비해서 거의 1개월 이상이 감소되어 파이프 쿨링에 소요되는 경비를 감안하더라도 매우 경제적이며, 효과적인 양생 방법이라고 할 수 있다. 이러한 이유로 인해서 타워팰리스 3차 J.V 현장에서는 파이프 쿨링 시스템을 이용한 양생 방법을 택하였으며, 이 중에서도 도심지와 같이 파이프 쿨링에 필요한 엄청난 양의 물을 공급하기 어려운 경우에 대해서 초기 투입 냉각수만 있으면 콘크리트 구조물을 통과한 물을 냉각 탑(Cooling Tower)를 통해 일정 온도 냉각시킨 후 다시 그 물을 이용하는 “냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템(Closed Pipe Cooling System)”을 적용하였다.

표 15. 압축강도 측정결과

공 장	W/B (%)	결합재	F/a (%)	재령별 압축강도 (kg/cm ²)			
				3일	7일	14일	28일
신 일	33.6	515	25	237	274	342	384
아 주				225	359	379	461
아세아				239	318	392	476
선 일				308	374	462	498
공장평균				252	331	394	455
신 일	33.6	515	25	269	341	352	419
아 주				298	375	397	460
아세아				325	406	414	520
선 일				398	459	524	576
현장평균				323	395	422	494

5.2 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템의 적용 검토

5.2.1 수화열 검토

<그림 3>은 파이프 쿨링 시스템의 적용 유무에 따른 수화열 해석 결과를 나타낸 것이다. <그림 3>의 (b)는 파이프 쿨링 시스템을 이용하여 수화열 해석을 실시한 경우로써, 콘크리트의 타설 온도가 32℃일 경우 최대 온도가 81℃ 정도까지 상승하는 것으로 예측되어 파이프 쿨링을 하지 않는 경우에 비해서 약 11℃ 정도 저감된다. 특히, 양생 기간의 경우 파이프 쿨링을 적절히 제어하면 최소 10일 이내의 양생 기간만으로도 균열을 제어할 수 있어 약 30~35일 정도의 공기절감효과를 기대할 수 있다.

다음의 <사진 3>은 매트기초에 설치된 파이프 배관상태를 나타낸 것이다.

5.2.2 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템의 경제성 검토

당 현장에서는 앞서 설명한 것처럼 도심지 공사이기 때문에 지하수도 개발되어 있지 않을 뿐더러 대량의 물이 필요하므로 냉각수를 외부로 배출시키는 기존의 파이프 쿨링 시스템을 적용할 경우 물의 공급에 있어서 상당한 어려움이 예상된다. 따라서 국내에서는 처음으로 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템(Closed Pipe Cooling System)을 적용하여 대량의 물 공급 없이도 충분히 냉각 시스템을 가동함으로써 물 공급에 따른 어려움 및 경제성 측면에서도 상당한 효과를 거두었다.



사진 3. 파이프 배관 전경

〈표 16〉은 당 현장의 경우에 대해서 기존의 파이프 쿨링 시스템과 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템을 적용했을 때의 경제성 비교 결과를 나타낸 것이다.

〈그림 9〉는 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템의 계통도를 나타낸 것이다.

5.3 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템의 적용 결과

파이프 쿨링 시스템의 가동은 콘크리트 타설이 약 40% 진행되었을 때 시작하였으며, 수화열 해석시의 타설 기준시점은 타설 량의 약 60%가 되는 시간으로 하였다. 콘크리트 타설 다음날 부분적으로 초결이 나타나는 지점을 중심으로 보양포(비닐+양생포)의 설치를 시작하였으며, 그 위에 비가 올 것에 대비하여 천막을 설치하였다.

타설 후 52시간까지 1차 통수를 하였으며, 타설 후 96시간에 2차 통수를 재개하였다. 천막으로 인해 콘크리트의 온도가 쉽게 낮아지지 않아 139시간 경과시점에서 통수의 중단과 함께 중앙부를 제외한 천막을 제거하였으며, 24시간 후인 163시간에 제 3차 통수를 시작하였다. 3차 통수의 중단은 타설 후 177시간이 지난 시점인 8월 11일 저녁 10시에 행하여 졌다.

표 16. Open Pipe Cooling System과 Closed Pipe Cooling System의 비교

구분	Open Pipe Cooling System	Closed Pipe Cooling System
1. 냉각수 공급시스템	- 물차 & 저수조 이용	- 냉각탑 이용
2. 시수 사용량	- 시수 8,303ton (냉각후 배수량) - 물차 16대/DAY 임대: 5.5일사용 - 공사비: 62,000,000원	- 시수 20ton (배관내 충수량) - 물차 불필요 - 공사비: 30,000원
3. 장비류	-C/T & PUMP : 미사용 -정유량 V/V(본공사시 재사용) -물탱크(8TON): 5대 추가소요 -공사비: 6,000,000원	-C/T 250R/T 2SET(임대) -PUMP 3SET(본공사시 재사용) -정유량 V/V(본공사시 재사용) -공사비: 9,000,000원
4. 배관공사	-MAIN 관경: 200A -MAIN 배관길이: 470M -배관공사비: 68,000,000원	-MAIN 관경: 100A~200A -MAIN 배관길이: 360M -배관공사비: 50,000,000원
5. 민원발생소지	-있음(40℃이상 방류시 문제발생)	-없음
6. 시공난이도	- 난이(물차 통행 어려움 예상)	- 편리(물차 통행 불필요)
7. 공사비	136,000,000원	59,000,000원
8. 공사비절감액	77,000,000원	

※ 물차 임대료 : 600,000 원/DAY / 수도 요금 : 1,500 원/TON

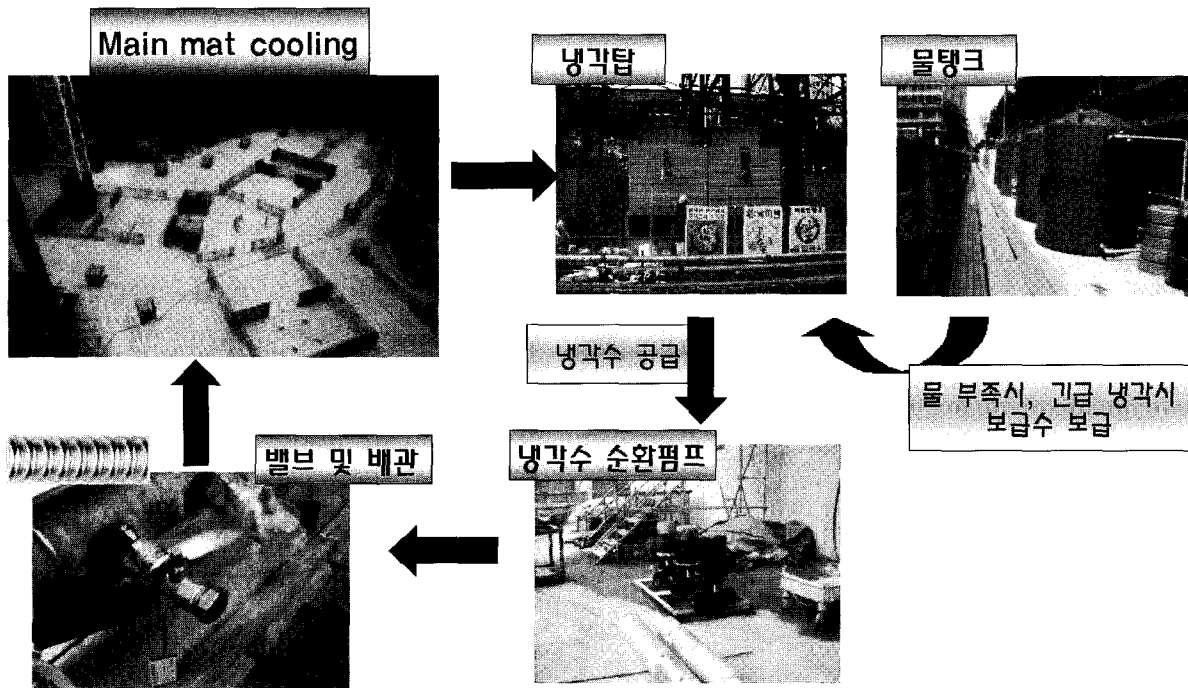


그림 9. 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템의 계통도

마지막으로 8월 12일 오전에 중앙부의 천막을 제거하였으며, 8월 14일 13시에 보양포를 제거함으로써 10일간에 걸친 모든 양생이 종료되었다.

5.3.1 온도계측결과

매트 기초의 온도계측은 크게 3개의 영역으로 나누어 모두 39곳의 계측 포인트에 대해서 계측을 수행하였으며, 각 위치별 최고온도 측정결과는 다음과 같다.

- Green Zone : 88.5℃ (35hr 경과)
- Blue Zone (날개부분) : 84.3℃ (33hr 경과)
- Blue Zone (중앙부분) : 84.6℃ (33hr 경과)

〈그림 10〉은 Blue Zone(중앙부분)에서의 온도계측 결과를 나타낸 것이다.

5.3.2 유입수 및 유출수의 온도계측결과

〈그림 11〉은 유입수 및 유출수의 온도계측결과를 나타낸 것이다. 통수중단시 냉각수 온도는 유입수 30℃, 유출수 42℃로써 온도차(ΔT)는 12℃이었으며, 당초 예상치(유입수 온도 : 32℃, 유출수 온도 : 43.6℃)와 유사한 결과를 보였다. 냉각탑을 사용하는 경우 유입수의 온도는 대체적으로 평균 외기온과 같은 값을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 유출수의 경우 당초에 계획되었던 유출수 설계한계 온도 45℃를 넘지않는 결과를 보였다. 본 현장에 적용된 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템은 도심지 대형 매트기초 공사에 대한 파이프 쿨링 시스템 적용시 표준사항이 될 것으로 사료된다.

6. 맺음말

초고층 빌딩의 대형 매트 기초에 대해서 국내에서는 처음으로 시도된 무다짐 콘크리트와 냉각수 순환 파이프 쿨링 시스템(Closed Pipe Cooling System)을 성공적으로 적용할 수 있었던 것은 타워팰리스

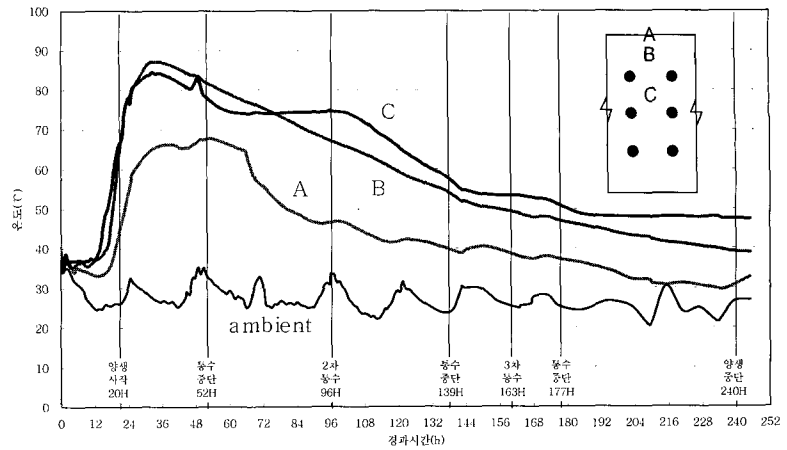


그림 10. Blue Zone(중앙부분)에서의 온도계측 결과

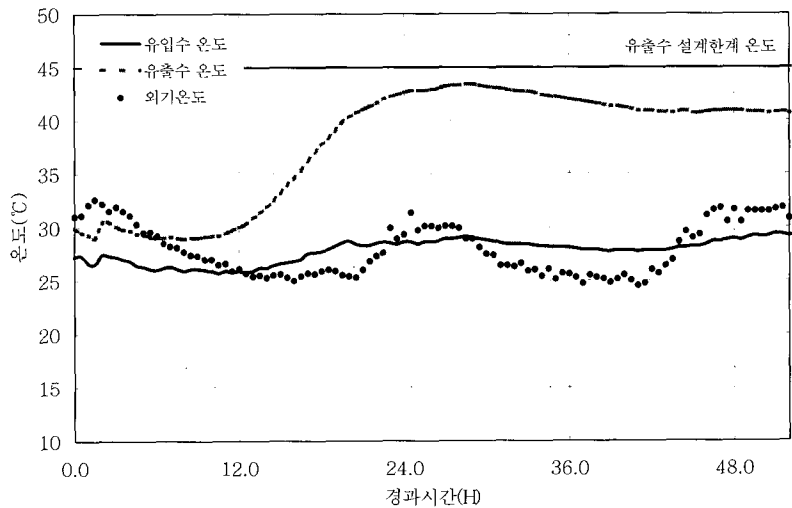


그림 11. 1차 통수중단전 유입수 및 유출수의 온도계측결과

3차 J.V 현장의 전임직원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 발주처, 설계사, 감리단 및 협력사의 철저한 사전 준비와 축적된 기술력의 결과로 사료된다. 본 공사를 성공적으로 끝마치면서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 국내에서는 처음으로 초고층 빌딩의 대형 매트기초에 무다짐 콘크리트를 적용함으로써 시공성이 상당히 개선되어 14시간만에 약 8,000m³의 콘크리트 타설을 완료하였으며, 다짐 작업이 전혀 필요하지 않아 시공 인력이 반이상 절감되었다.

(2) 무다짐 콘크리트는 슬럼프 플로우의 변화가 생산 후 90분까지 전혀 발생하지 않으므로 하절기 시공 시에도 슬럼프 손실이 전혀 발생하지 않았으며, 콜드조인트도 방지할 수 있으므로 고품질 콘크리트

구조물 시공이 매우 용이한 것으로 판단되었다.

(3) 초고층 빌딩의 대형 매트 기초는 단면도 클 뿐만 아니라 콘크리트의 설계강도 또한 높다. 이러한 대형 매스 콘크리트에서 수화열에 의한 부재의 온도를 조기에 제거하기 위한 방법으로 파이프 쿨링 공법이 매우 유효한 것으로 나타났으며, 특히 보온양생 기간이 대폭 절감되어 공기 단축에 큰 기여를 할 수 있는 것으로 나타났다.

(4) 국내에서는 처음으로 냉각수 순환 방식의 파이프 쿨링 시스템을 적용함으로써 냉각수의 공급이 원활 하지 않는 지역에서의 매스콘크리트 수화열 제어에 매우 효과적이었으며, 경제성 측면에서도 매우 유리한 것으로 나타났다. □