

# 무다짐 콘크리트를 이용한 높이 40m CFT 기둥의 시공

## Practical Use of Self Compacting Concrete to be filled inside the Steel Tube Columns

김규동<sup>\*</sup> 김한준<sup>\*\*</sup> 손유신<sup>\*\*\*</sup> 이승훈<sup>\*\*\*\*</sup>  
Kim, Gyu Dong Kim, Han Joon Sohn, Yu Shin Lee, Seung Hoon

### ABSTRACT

The structure of Tower Palace III Sports Center building was designed as concrete Filled Steel Tube(CFT) Column and the filled-in concrete was designed as high compressive strength of 500kgf/cm<sup>2</sup>. The self compacting concrete(SCC, non-vibrating concrete) with 65±5cm flow must be applied to this case for filling the CFT by injecting the concrete from the column bottom. Laboratory tests and pilot productions of batcher plant were performed for optimum mix design and the full scale Mock-Up test was performed to check the applicability of the construction method. As a result, we observed that good quality SCC and the pressure change of concrete pump normally used domestically. Based on these results, we have constructed 20~40m height CFT columns successfully.

### 1. 서론

도시의 사무실 및 상업용 건물은 지가의 상승 및 용지난으로 인해 한정된 부지를 효율적으로 사용하기 위해서 고층화되는 경향이 있으며, 초고층 건축물에서는 용도의 다양화, 복합화, 외장의 기대감 등으로부터 종래의 구조적 제약조건을 극복하고 장스팬 가구 및 공간의 효율적 이용을 가능하게 하는 구조형식이 연구개발되고 있다. 이러한 여건 하에서 고축력 및 고연성의 기둥에 대한 설계 및 시공이 요구되고 있으며, 이에 가장 적합한 구조요소라 할 수 있는 콘크리트 충전강관기둥 (Concrete Filled Steel Tube Column:CFT Column)에 대한 관심이 고조되고 있다

CFT 기둥은 강관의 구속효과 (Confinement Effect)에 의해 충전된 콘크리트의 내력상승과 충전 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 보강효과에 의해 부재내력이 상승하고 뛰어난 변형성능을 발휘하게 된다. 이에 따라 종래의 초고층 건물에 비해 기둥간격을 크게할 수 있으므로 유효공간을 넓게 할 수 있고, 일반 구조체에 비해서 기둥의 강성이 높고 태풍 및 지진시의 움직임에 대한 사용성의 개선도 가능하다. 또한, 시공 시 강관은 거푸집 역할을 함으로 기둥부재의 철근 및 거푸집공사가 배제되어 인건비의 절감 및 시공 공정 측면에서의 공기단축이 가능한 장점을 가지고 있다. 특히, CFT 기둥에 작용하는 축하중의 대부분을 콘크리트가 부담하게 되므로 이러한 CFT 기둥의 장점을 극대화하기 위해서는 보통강도 콘크리트 보다 는 고탄성의 고강도 콘크리트를 사용하는 것이 유리하게 된다.

이러한 CFT기둥의 시공은 일본, 동남아 등의 외국에서 다수의 적용실적을 찾을 수 있지만, 국내에서는 그 적용실적이 전무하고, 시험시공과 같은 수준의 미미한 실정이었다. 그러나 당사가 시공하고 있는 도곡동 타워팰리스 3차 J.V현장 스포츠동의 기둥구조는 최고높이 40m의 CFT기둥으로 설계하였으며, 현재 그에 대한 시공을 완료한 상태로써 국내최초로 설계·시공된 CFT 기둥으로서 그 의의를 찾을 수 있겠다.

\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원

\*\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 주임연구원

\*\*\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원

\*\*\*\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 수석연구원

당 현장의 CFT 기둥 시공은 하부압입공법을 적용하고자 하였으며, 이를 위해 재료분리 저항성, 유동성 및 충전성이 우수한 무다짐콘크리트(자체다짐, Self Compacting Concrete, SCC)를 사용하도록 계획하였다. 본 연구에서는 최고높이 40m의 CFT기둥에 적용할 무다짐 콘크리트의 최적배합설계 도출을 위해 수행된 일련의 실험과정과 원활한 현장품질관리를 위해 실시한 시공관리 자료를 정리하였으며, 본 연구결과를 통해 향후 CFT 기둥을 적용할 경우에 있어서의 재료·시공적 기술에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. CFT기둥용 무다짐 콘크리트의 배합설계

### 2.1 개요

당 현장의 CFT기둥에 적용되는 무다짐 콘크리트는 설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트로서 기존의 무다짐 콘크리트 시공자료를 근거로 적절한 배합변수를 설정하여 실내배합과 레미콘 시험생산 등 일련의 실험과정을 수행하고, 그 결과를 근거로 하여 소요의 재료분리 저항성, 유동성 및 충전성을 만족하는 최적배합을 도출하고자 하였다.

### 2.2 실험계획

#### 2.2.1 무다짐 콘크리트의 품질관리 기준

CFT 기둥의 원활한 현장시공을 위해 무다짐 콘크리트가 만족해야 하는 품질관리기준을 설정하였으며, 표 1에 나타내었다. 표 1의 시험항목 중에서 CFT 기둥의 하부압입시공에 따른 충전성 확보를 목적으로 U형 충전높이 기준을 320mm 이상이 되도록 관리하였다.

표 1. 무다짐 콘크리트 품질관리 기준

| 구분                         | 시험항목                               | 기준값     |
|----------------------------|------------------------------------|---------|
| 경화 콘크리트                    | 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> ) : 재령56일 | 500     |
| 굳지 않은 콘크리트<br>(경시변화 : 60분) | 슬럼프 플로우 (SF,cm/cm)                 | 65±5    |
|                            | 50cm 플로우 도달시간 (sec)                | 4~10    |
|                            | V-lot 유하시간 (sec)                   | 10~20   |
|                            | U형 충전높이 (mm)                       | 320 이상  |
|                            | 공기량 (%)                            | 3.0±1.0 |

#### 2.2.2 실험변수

사용재료는 수도권 레미콘사에서 일반적으로 사용하는 재료를 사용하였으며, 기존의 시공 및 배합자료를 근거로 하여 소요의 유동성, 충전성 및 재료분리저항성 등의 품질기준을 만족하기 위한 각각의 배합변수별 적정배합범위를 설정하여 실험을 계획하였다. 이를 정리하면 표 2와 같다.

표 2 배합변수별 적정배합 범위

| 구분          | 적정배합 범위    |
|-------------|------------|
| 단위수량 (W)    | 165~180    |
| 물-결합재비(W/B) | 30.0~32.0% |
| 잔골재율(S/a)   | 49.0~51.0  |
| 혼화재료(FA)    | 15~25.0    |
| 분체체적(Vp)    | 0.180 이상   |
| 분체/물 체적비    | 0.90 이상    |

### 2.3 실내배합

#### 2.3.1 실내배합 계획

실내배합에서는 기존의 시공자료와 표 2의 배합변수별 적정배합범위에 근거하여 예비실험을 실시하였고, 이를 통해 결정된 단위수량, 결합재량, 혼화재료 치환율 및 단위수량의 적정범위를 기초로 분체체적(Vp)과 물/분체 체적비의 범위를 변수로 하여 실내배합을 계획하였으며, 표 3에 그 배합표를 나타내었다.

표 3에서 알 수 있듯이 물-결합재비는 31.0%, 단위수량 170kg/m<sup>3</sup>이상의 범위에서 잔골재율의 변화와 고성능감수제의 종류 등을 변수로 하여 실내배합을 실시하였으며, 그에 대한 물성시험을 실시하였다.

표 3 실내배합표

| No.  | W/B(%) | Vp    | Vw/Vp | S/a(%) | 단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |         |        |
|------|--------|-------|-------|--------|-----------------------------|-----|---------|--------|
|      |        |       |       |        | W                           | C   | F/A(%)  | S.P(%) |
| No.1 | 31.0   | 0.191 | 0.92  | 49.5   | 175                         | 480 | 85(15)  | N-2.0  |
| No.2 |        | 0.195 | 0.90  | 49.9   |                             | 452 | 113(20) | N-2.0  |
| No.3 |        |       |       | 50.8   |                             |     |         | N-2.0  |
| No.4 |        | 0.198 | 0.90  | 48.7   | 178                         | 459 | 115(20) | N-1.8  |
| No.5 |        |       |       | 49.5   |                             |     |         | N-1.8  |
| No.6 |        | 0.195 | 0.90  | 49.9   | 175                         | 452 | 113(20) | P-1.0  |
| No.7 |        | 0.198 | 0.90  | 49.5   | 178                         | 459 | 115(20) | P-1.0  |

\* S.P제 구분 : N(나프탈렌계), P(폴리카르본산계)

2.3.2 실내배합 결과

표 3의 배합에 의한 실험결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에 나타난 바와 같이 대부분의 배합에서 초기 및 60분 경시변화 후의 유동성 및 충전성 관리기준을 만족하고, 기준재령인 재령 56일의 압축강도 결과도 배합강도를 만족하는 양호한 실험결과를 나타내었다.

표 4 물성시험결과 (실내배합)

| No.  | 슬럼프플로우 (cm/cm) |       | 50cm플로우 도달시간(sec) |     | 공기량 (%) |     | V-lot (sec) | U형충전고 (mm) | 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|------|----------------|-------|-------------------|-----|---------|-----|-------------|------------|-----------------------------|-----|-----|
|      | 0분             | 60분   | 0분                | 60분 | 0분      | 60분 | 60분         | 60분        | 7일                          | 28일 | 56일 |
| No.1 | 66/67          | 62/63 | 3.8               | 6.7 | 4.2     | 2.4 | 13.8        | 340        | 464                         | 604 | 699 |
| No.2 | 66/65          | 64/64 | 4.5               | 6.2 | 4.5     | 3.1 | 12.7        | 345        | 471                         | 618 | 717 |
| No.3 | 67/66          | 65/65 | 4.4               | 5.3 | 4.9     | 3.7 | 13.4        | 350        | 459                         | 611 | 715 |
| No.4 | 68/68          | 66/65 | 2.8               | 4.6 | 4.7     | 3.1 | 11.7        | 350        | 468                         | 599 | 708 |
| No.5 | 67/68          | 67/67 | 3.7               | 4.1 | 4.8     | 3.2 | 10.4        | 355        | 474                         | 618 | 723 |
| No.6 | 63/63          | 66/65 | 4.8               | 3.8 | 3.1     | 3.5 | 11.9        | 350        | 465                         | 602 | 718 |
| No.7 | 65/66          | 66/66 | 4.5               | 5.4 | 3.2     | 3.3 | 12.4        | 355        | 475                         | 615 | 720 |

표 4에 나타난 실험결과에서 단위수량 178kg/m<sup>3</sup>인 배합이 175kg/m<sup>3</sup>인 경우에 비해 다소 양호한 충전성능을 보였으며, 육안상의 고찰에서 나프탈렌계 고성능감수제를 사용한 경우가 폴리카르본산계 고성능감수제를 사용한 경우보다 다소 높은 점성을 가지는 것으로 나타났다.

실내배합 결과 모든 배합이 품질기준을 만족하였지만, 충전성이 양호하고 슬럼프플로우 유지성능이 우수한 No.7배합이 당 현장의 무다짐 콘크리트배합으로 가장 적절한 것으로 판단되었다.

2.4 레미콘 Pilot Test 결과

레미콘 Pilot Test는 실내배합 결과에서 결정된 No.7 배합을 대상으로 2개 공장에서 실시하였으며, 레미콘 생산업체에서의 사용재료에 의한 물성변화와 그 특성을 분석하고, 실제 레미콘 공장에서의 시험생산을 통해 실내배합과의 차이점을 보정하여 최적배합을 도출하고자 실시하였다. 표 5에서 알 수 있듯이 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 충전성 결과 및 경화 콘크리트의 압축강도 측정결과는 양호한 것으로 나타났다.

표 5 물성시험결과 (레미콘 Pilot Test)

| 구분  | 슬럼프플로우 (cm/cm) |       | 50cm플로우 도달시간(sec) |     | 공기량 (%) |     | V-lot (sec) | U형충전고 (mm) | 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|-----|----------------|-------|-------------------|-----|---------|-----|-------------|------------|-----------------------------|-----|-----|
|     | 0분             | 60분   | 0분                | 60분 | 0분      | 60분 | 60분         | 60분        | 7일                          | 28일 | 56일 |
| A 사 | 65/66          | 67/66 | 4.8               | 4.7 | 2.9     | 3.1 | 11.8        | 355        | 425                         | 554 | 641 |
| B 사 | 67/67          | 67/68 | 4.7               | 4.5 | 3.1     | 3.0 | 10.9        | 355        | 405                         | 543 | 616 |

## 2.5 최적배합 도출

CFT 기동용 무다짐 콘크리트에 대한 실내배합 및 레미콘 Pilot Test 결과를 근거로 하여 당 현장에 공급할 최적배합을 도출하였으며, 현장 시방 배합표를 표 6에 나타내었다.

표 6 현장 시방 배합표

| 규격            | W/B(%) | S/a(%) | 단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |         |            |
|---------------|--------|--------|-----------------------------|-----|-----|---------|------------|
|               |        |        | W                           | B   | C   | F/A(%)  | S.P.(%)    |
| 20-500-65(SF) | 31.0   | 49.5   | 175                         | 574 | 459 | 115(20) | 6.03(1.05) |

## 3. 실물모형실험(Mock-Up Test)

실물모형실험은 도출된 최적배합을 대상으로 현장의 시공상황과 동일한 조건하에서 하부압입시공함으로써 CFT 기동용 무다짐 콘크리트의 현장적용 시 발생할 수 있는 문제점을 사전에 해결하고 효율적인 품질관리가 가능하도록 하고자 실시하였다.

### 3.1 Mock-Up Test 계획

Mock-Up Test에 사용된 CFT 기동 실험체의 치수는 □700×700×25×22,000(mm)으로서, 적용된 다이어프램은 두께 22mm의 내다이어프램으로 중앙에 직경 350mm의 원형구멍을 뚫어 20%의 개구율을 가지는 형식과 십자형 내다이어프램 2가지를 적용하였다. 그리고 콘크리트의 충전상태를 확인하기 위하여 실험기둥의 한면에 일정간격으로 직경 10mm의 충전확인구멍을 설치하였다. 콘크리트 펌프카로부터 시험체까지의 배관길이는 약 50m이며, 그림 1은 Mock-Up Test 시험체의 치수 및 전경을 나타낸 것이다.

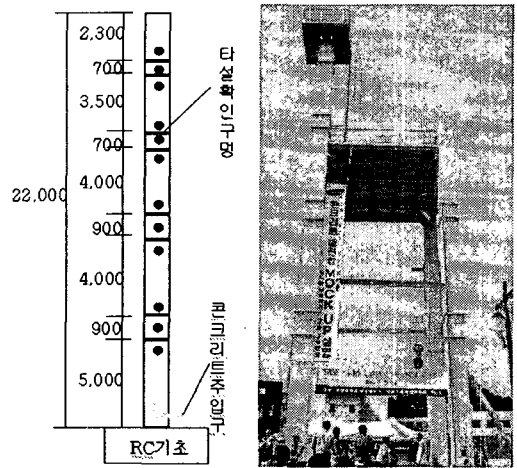


그림 1 Mock-Up Test 시험체 및 전경

### 3.2 Mock-Up Test 실험항목

Mock-Up Test는 레미콘 생산에서부터 타설까지의 일련의 과정에 대한 실물실험으로서 운반에 따른 굳지 않은 콘크리트의 물성변화에 대한 고찰과 현장 타설에 따른 시공성 평가를 목적으로 표 7의 세부항목별 현장실험을 실시하였다.

표 7 Mock-Up Test 실험항목

| 실험구분          | 세부실험항목  |
|---------------|---|
| 무다짐 콘크리트 물성시험 | - 굳지 않은 콘크리트 물성 고찰<br>· 플로우(경시변화)<br>· U형충전<br>· 압송전후의 물성변화<br>- 경화 콘크리트 압축강도 측정<br>· 재령 7, 28, 56일 |
| 현장 시공성 평가     | - 타설소요시간 측정<br>- 콘크리트 타설 펌프압력 평가  |

### 3.3 Mock-Up Test 결과

#### 3.3.1 무다짐 콘크리트 물성시험결과

무다짐 콘크리트의 생산으로부터 현장까지의 운반시간은 약 1시간이 소요되었으며, 현장 도착 시에 물성시험을 실시하고, 하부압입시공을 완료한 후 상부에서 콘크리트 시료를 채취하여 물성시험을 실시하였다. 표 8에 무다짐 콘크리트의 물성시험 결과를 정리하였다.

표 8 물성시험결과 (Mock-Up Test)

| 구분            | 슬럼프플로우 (cm/cm) |       |       | 50cm플로우 도달시간(sec) |     |     | 공기량 (%) |     | U형충전고 (mm) | 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|---------------|----------------|-------|-------|-------------------|-----|-----|---------|-----|------------|-----------------------------|-----|-----|
|               | 공장             | 압송전   | 압송후   | 공장                | 압송전 | 압송후 | 공장      | 현장  |            | 현장                          | 7일  | 28일 |
| 20-500-65(SF) | 68/67          | 68/68 | 66/65 | 4.8               | 4.7 | 5.5 | 3.6     | 2.4 | 350        | 499                         | 613 | 652 |

표 8에서 알 수 있듯이 현장 도착시의 굳지 않은 콘크리트 물성시험 결과는 품질기준을 만족하는 양호한 결과를 나타내었으며, 경화 콘크리트의 압축강도 또한 기준 재령인 56일에 652kgf/cm<sup>2</sup>로서 설계기준강도를 상회하는 양호한 결과를 나타내었다. 또한 무다짐 콘크리트의 압송 전후 물성변화 고찰에서도 거의 물성변화가 없는 것으로 나타나 높이 22m의 CFT 각형강관 기둥의 하부압입시공에 대한 시공성을 충분히 확보하는 것으로 판단되었다.

### 3.3.2 무다짐 콘크리트의 현장 시공성 평가

무다짐 콘크리트의 현장 시공성을 평가하기 위해 타설속도와 콘크리트 펌프의 압력을 측정하였으며, 그 결과를 표 9에 나타내었다. 타설속도는 약 2m/min으로 타설하였고, 펌프 압력은 펌프에 부착된 압력계지와 배관 파이프에 2개의 압력계를 설치하여 측정하였으며, 표 9에서와 같이 타설속도가 2m/min일 때 20m높이에서 130bar정도의 압력이 소요되어 유동성과 충전성이 확보된다면 국내에서 사용되고 있는 펌프를 사용하여도 압송에는 문제가 없을 것으로 판단되었다.

표 9 22m CFT기둥의 펌프 압력측정결과

|      |       |        |        |
|------|-------|--------|--------|
| 타설높이 | 3m    | 10m    | 20m    |
| 펌프압력 | 30bar | 100bar | 130bar |

## 4. CFT 기둥용 무다짐 콘크리트의 시공

### 4.1 현장 시공계획

당 현장 CFT 기둥은 총 43EA로서 그림 2와 같이 총 4차에 걸쳐 타설하였으며, 기둥의 배치, 차수별 기둥 높이 및 배관길이 등을 표 10에 정리하여 나타내었다.

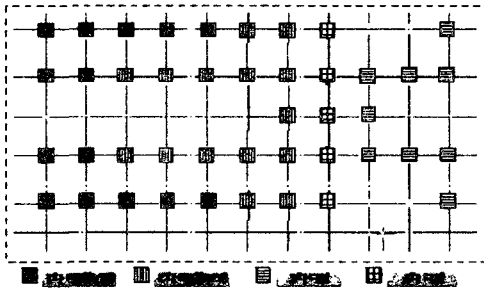


표 10 CFT기둥 타설차수별 규격

| 구분                   | 1차 타설 | 2차 타설     | 3차 타설     | 4차 타설     |
|----------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| 기둥높이(m)              | 17.1  | 17.1~24.9 | 27.6~31.8 | 40.2~43.2 |
| 배관길이(m)              | 110   | 100       | 70        | 50        |
| 타설량(m <sup>3</sup> ) | 122   | 160       | 120       | 97        |

\* 기둥규격 : □ 700×700(mm)

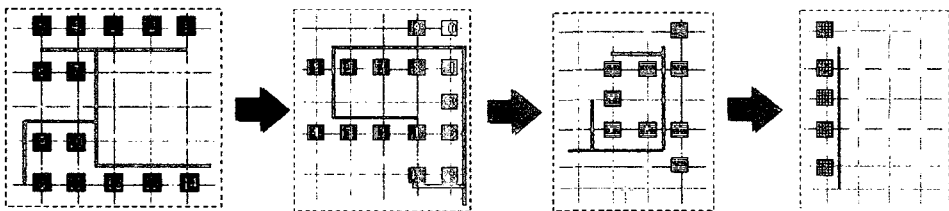


그림 2 현장 타설 CFT기둥 배치 및 차수별 타설위치

### 4.2 CFT기둥 현장 시공결과

#### 4.2.1 무다짐 콘크리트 물성시험 결과

무다짐 콘크리트는 2개 업체에서 공급하였으며, 물성시험결과를 표 11에 정리하였다.

표 11 물성시험결과 (CFT)

| 구분            | 슬럼프플로우 (cm/cm) |       | 50cm플로우 도달시간(sec) |     | 공기량 (%) |     | U형충전고 (mm) | 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|---------------|----------------|-------|-------------------|-----|---------|-----|------------|-----------------------------|-----|-----|
|               | 공장             | 현장    | 공장                | 현장  | 공장      | 현장  | 현장         | 7일                          | 28일 | 56일 |
| 19-500-65(SF) | 65/66          | 65/65 | 4.5               | 4.7 | 3.6     | 2.4 | 350        | 489                         | -   | -   |

표 11에서 알 수 있듯이 현장 도착시의 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 충전성은 양호한 것으로 나타났으며, 압축강도 발현측면 에서도 재령 7일에 설계기준강도의 97.8%인 489kg f/cm<sup>2</sup>로서 기준재령에 충분히 설계기준강도를 만족할 것으로 판단된다.



그림 3 콘크리트 하부압입시공전경

#### 4.2.2 CFT 기둥의 현장타설 결과

시공계획에서 언급한 바와 같이 Zoning을 통해 4차에 걸쳐 현장 타설을 실시하였으며, 무다짐 콘크리트의 소요 물성을 확보하고, 타설속도를 약간 저하시킴과 동시에 하부층 CFT 철골기둥의 보강작업을 실시하여 최고 높이인 43.2m의 CFT기둥도 어려움 없이 무다짐 콘크리트의 타설을 완료하였다. 현장 시공결과로서, 타설속도 및 펌프압 측정결과를 표 12에 요약하였으며, 표 12에서 알 수 있듯이 높이에 따라 차이는 있지만 1.0m/min 전후의 속도로 타설할 경우 콘크리트 펌프의 압력은 80~120bar 전후로서 충분한 시공성이 확보되는 것으로 판단되었다. 그림 3 및 그림 4는 현장 타설전경을 나타낸 것이다.

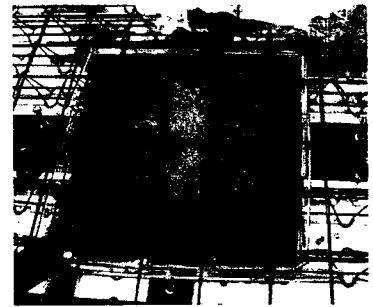


그림 4 상부 Over Flow 전경

표 12 CFT기둥 현장타설속도 및 펌프압력 측정결과

| 구분             |     | 1차 타설   | 2차 타설   | 3차 타설   | 4차 타설   |
|----------------|-----|---------|---------|---------|---------|
| 평균타설속도 (m/min) | 하부층 | 1.02    | 1.15    | 0.97    | 1.25    |
|                | 상부층 | 0.97    | 0.95    | 0.86    | 0.82    |
| 펌프압력 (bar)     | 하부층 | 80~100  | 80~100  | 90~110  | 60~90   |
|                | 상부층 | 100~120 | 100~130 | 110~130 | 100~120 |

### 5. 결론

도곡동 타워팰리스 3차현장 스포츠동에 국내최초로 적용되는 CFT기둥의 무다짐 콘크리트에 대한 최적배합설계를 실시하고, 현장타설을 성공적으로 완료하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) CFT 기둥의 하부압입시공을 위한 무다짐 콘크리트의 최적배합설계 결과로서 실내배합 및 레미콘 시험생산 결과 양호한 유동성 및 충전성을 확보하였으며, 압축강도 발현특성 또한 양호한 것으로 나타났다.
- (2) 도출된 최적배합을 대상으로 현장 Mock-Up Test를 실시하였으며, 운반에 따른 경시변화, 압송 전후의 물성변화는 크지 않고 양호하였으며, 압송에 따른 펌프압력은 타설속도가 2.0m/min일 때 130bar로 측정되어 국내에서 일반적으로 사용하는 장비로 충분히 시공성이 확보되는 것으로 판단되었다.
- (3) 현장 타설은 높이별로 Zoning을 하여 4차에 걸쳐 실시되었으며, 공급된 무다짐 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 물성과 경화 콘크리트의 압축강도는 품질기준을 만족하였다. 또한, 타설에 따른 펌프압력과 타설속도 등의 시공성 측면에서도 1.0m/min 전후의 타설속도일 때 100bar 전후의 펌프압력이 작용하여 충분한 시공성을 확보하여 성공적으로 타설을 완료하였다.

#### 참고문헌

1. 안종문, 신성우, 전상우, 김진호 "고유동 콘크리트를 사용한 22m 콘크리트 충전 각형강관기둥의 시공성능시험", 콘크리트 학회지, 제14권 6호, 2002.11
2. 윤영수, 이승훈, 원종필, 장일영 "Practical Use of High Strength and High Flowable concrete to be filled inside the Steel Tube Columns", High Strength Concrete, 1998.12
3. 吉岡伸明, 新居健一, 柳田克己, 百瀬晴基 "CFT コンクリート 14000㎡, 高さ250mへの 挑戦", 日本 콘크리트 工學會誌, Vol 41, No.1, 2003.1