

기둥수축에 대한 보정과 계측사례 연구

-말레이시아 KLCC건물-

A Study of Monitoring and Compensation for Column Shortening

-KLCC in Kuala Lumpur, Malaysia-



박복만*



이동렬**



김경준***



염경수****

1. 머리말

현시점을 기준으로 지구상에서 가장 높은 건물의 기록(지상 450m,기초에서 471m)을 보유하고 있는 말레이시아의 KLCC¹⁾건물은 최상부 철골 Pinnacle 을 제외한 철근콘크리트 구조체(Corewall 및 기둥)만의 높이(지상 380.155m)에서도 당분간 깨지기 힘들어 보이는 최고의 높이를 유지하고 있다.

이에 공사책임자인 당사에서는 초고층 고강도 콘크리트 건물의 기둥수축(Column Shortening-여기서는 Core Wall을 포함한 모든 수직 구조부재의 수축을 말함)에 대한 문제를 주요 기술과제로 인식하고 자체적으로 변위를 계측함과 동시에 현장에서 취한 공시체에 대하여 콘크리트의 시간 종속적인 재료특성에 대해서도 계측을 실시

하였다.

위의 변위에 대한 계측결과는 실질적인 공사 Schedule, 하중 재하 이력, 현지의 환경적 요인, 그리고 계측된 콘크리트 재료 특성값 등을 반영하여 계산한 이론적인 수축값, 그리고 원설계자가 제시한 보정값과 함께 비교되었다. 이에 대한 분석결과는 앞으로의 초고층 고강도 콘크리트 건물에 대한 설계와 시공분야에서 참고가 될 만한 귀중한 자료라고 생각되어 본 건물의 적용 사례를 소개하고자 한다.

2. 기본개념

기둥수축이란 물체가 압축을 받아 길이가 줄어드는 것으로 구조설계를 전문으로 하지 않은 일반인에게도 낯설지 않은 현상이다. 구조물에서 사

* 정회원, 명지대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 삼성물산건설부문 건축기술팀 부장

*** 삼성물산건설부문 PBCom 현장소장

**** 삼성물산건설부문 건축기술팀 과장

1) KLCC는 Kuala Lumpur City Center의 약자로서 이 중 KLCC건물은 중앙에 위치한 지상 92층 규모의 Petronas Tower를 말함.

용되는 구조부재는 탄성체의 성격을 가지고 있으며, 이에 따라 하중을 받으면 그 크기에 비례하여 변형량이 증가한다고 하는 Hook의 법칙을 이용하여 변형량을 계산할 수 있다.

이러한 기둥부재의 수축현상은 고강도재료의 사용과 함께 건물이 초고층화하면서 그 중요성이 커지고 있다. 예를 들어, 80층 규모의 철골건물의 경우에는 예상되는 수축량이 약 180에서 260mm 정도에 이르게 된다. 이때 각각의 기둥의 수축량과 그 상대적인 차이는 각 기둥의 응력 수준(stress level)에 비례하므로 구조해석을 통하여 예측이 가능하며, 이에 대한 문제점을 파악하고 그 보정방법을 설정하는 작업도 어렵지 않은 편이다.

그러나 콘크리트의 경우는 탄성체이면서도 재료의 특성에 의하여 수축의 양상이 복잡해지고, 그 변형량을 예측하는 것도 쉽지 않다. 여기서 재료의 특성이란 Shrinkage와 Creep을 말하는 것으로 이 둘은 환경적인 요인, 특히 상대습도에 의해 많은 영향을 받는다는 점에서 공통점을 가지며, Creep은 재하된 하중의 크기에 영향을 받는다는 점에서 탄성수축과 유사한 성격을 가진다. 예를 들어, 80층규모의 철근콘크리트 건물에서 예상되는 탄성수축량은 약 65mm 정도에 지나지 않으나, 종국적인 전체수축량은 Creep과 Shrinkage로 인하여 약 180~230mm에 이르는 것으로 알려지고 있다.

수축량의 계산을 위해서는 현지의 환경조건을 반영한 재료의 특성값과 시공 Schedule에 따른 재하이력이 필요하다. 즉 구조설계자는 건물 입지에 따른 환경요인을 반영하면서 시공에 대한 Guide Line도 설정을 해야한다.

기둥수축이 건물의 모든 기둥에 동일한 정도로 발생한 경우에는 수평구조부재에 강제응력을 발생시키지 않고, 다만 Partition, Cladding(Curtain wall), 설비용 Pipe 또는 건축마감재등과 같은 비구조 요소에 영향을 미친다. 그러나 기둥간의 수축량에 많은 차이가 있을 때는 일체화된 보에 부재각을 발생시키고 슬래브가 뒤틀리게 되며, 비

구조요소 역시 슬래브의 기울어짐으로 파손될 수 있다.

따라서 이와 같은 문제점들을 예측하고 이에 대한 해결 방법을 찾는 것이 기둥수축에 대한 보정설계이다. Partition은 습기에 의하여 팽창할 수 있고, Curtain Wall은 태양열에 의해서 수축 팽창을 계속하며, 설비 Pipe는 고온의 내용물에 따라서 신장될 수도 있다. 이와 같은 요소간의 상대적인 변형들은 비구조요소의 접합부에 Stress의 유발없이 변위가 허용되도록 Detail을 고려하여 해결한다. 구조요소의 경우, 절대적인 수축량의 보정을 위해서는 예상되는 수축량에 따라 의도적으로 기둥높이에 덤을 주며, 기둥간의 상대적인 수축량 차이로 인한 기울음(Tilting)은 역으로 Camber를 주어 해결한다.

3. 본 건물의 구조

3.1 기초

뿔목형식의 Mat기초로서 40~105m에 이르는 장방형 마찰말뚝 104개가 4.5m 두께의 Mat기초를 지지하는 구조이다. Mat기초는 1994년 2월 44시간에 걸쳐 연속 타설되었다.

3.2 골조 구성

지하6층, 지상92층의 Tower와 지상45층의 Bustle로 구성되며, Concrete Core와 Concrete Cylindrical Tube가 조합된 구조형식으로 27만ton의 수직하중과 풍속 126km/hr의(초속 35m)수평하중으로 인한 45만t-m의 Overturning Moment를 지지하고 있다.

건물의 중간층을 기준으로 하여 Tower의 Ring Frame(Tube로 가정)과 Core의 횡방향 강성을 비교하면 8:2 정도로 Tube강성이 크나, Tube가 실제로는 Solid하게 충실된 단면이 아니고 전단에 의한 변형이 발생하므로 Tube의 강성 비중이 이보다는 작다고 볼 수 있다.

기둥 : 원형기둥으로서 최하층부터 상층으로 진행하면서 Tower의 경우 2.4m에서 1.2m까지,

Bustle의 경우 1.5m에서 1.0m까지 직경이 변한다. Tower의 각각의 기둥은 거의 같은 수준의 축하중을(각 기둥당 대략 9,000t에 이룸) 지지하며, 이로 인한 기둥간의 수축량도 비슷한 수준이 되어 상대변위를 최소화하고 있다.

Core Wall : 구성이 거의 정사각형의 형상을 이루며, 최하층부터 상층으로 진행하면서 750mm에서 350mm까지 두께가 감소하고 Core의 크기도 줄어든다.

Outrigger Girder : Tower의 38~40층(기계실)에는 Core의 네모서리에서 방사형으로 RC Outrigger Girder가 설치되어 있다. 부재의 크기는 폭이 600~1500mm이고(Tapered) 춤은 1200mm(38,40층), 1500mm(39층)로서 일반적으로 초고층 구조형식에서 주요 횡방향 지지요소로서 사용되는 수준의 하중을 분담한다고 보기는 어렵다.

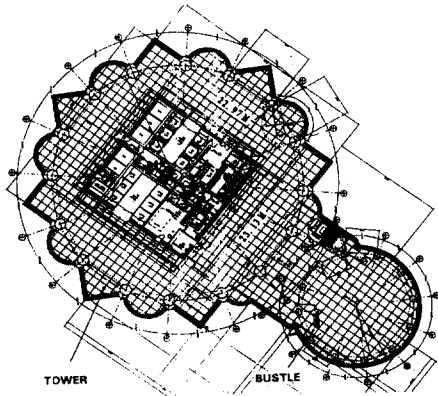
Concrete 압축강도 : 저층부에서 고층부로 진행하면서 강도를 증가시키며, Cubic Test로 800,600,400kg/cm²의 강도를 사용하였다.

3.3 Typical 평면

그림1 참조

3.4 입면 및 단면

그림2 참조



바닥면적 : 2169 m²
 Tower Tube 기둥중심간 직경 : 46.24m
 Bustle Tube 기둥중심간 직경 : 20.098m
 Core 외치수 : 23.13m x 22.97m

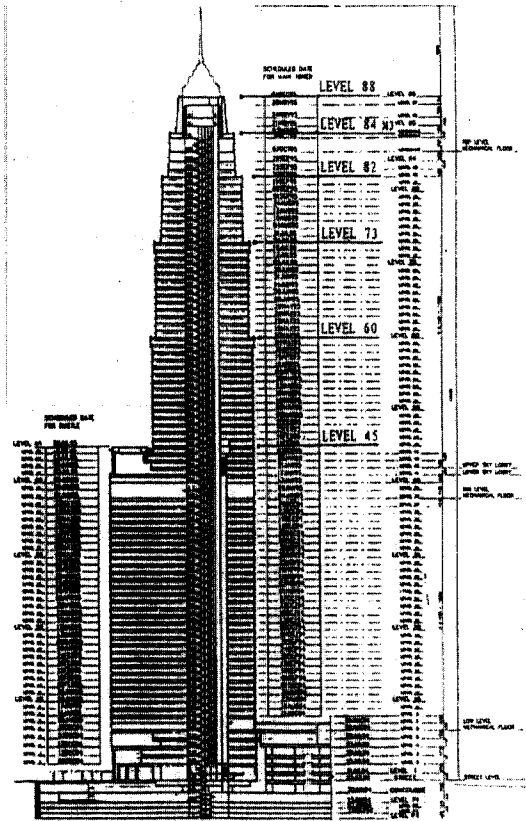
그림 1 Typical Plan

4. 보정

4.1 보정의 개념

보정이란 수직부재가 장기적인 수축변형후에 설계된 높이에 근접하도록 하고 수직부재간에 발생하는 상대적인 변위가 허용치 이내가 되도록 함으로서, 수축에 의하여 복층형 승강기의 운행이나 Curtain Wall의 시공 및 유지, 내부간막이의 설치등에 미치는 영향을 방지하기 위한 것이다.

이는 마치 각각의 주행능력과 목표거리가 다른 장거리 주자들을 그 출발선을 적절히 조정함으로써 목표로 하는 시점에 모든 주자들이 근소한 차이로 목표점에 도착하도록 경기를 조작하는 것과 유사하다.



층수 : 지하6층, 지상92층
 높이 : 지하21m, 지상 451.9m

그림 2 단면도

즉 각각의 층을 그 타설시점과 동시에 출발한 주자라고 생각한다면, 이들은 미래의 목표시점에 그 층의 높이가 설계층고에 근접하도록 미리 수 mm의 덤을(Additional Height) 줌으로서 출발 지점을 뒤로 옮겨 놓은 것과 같은 것이다.

덤(Additional Height)을 얼마나 주어야 할 것인가는 수축의 Speed(주행능력)와 타설후 목표시점 까지의 시간(목표거리)에 따라서 정해진다.

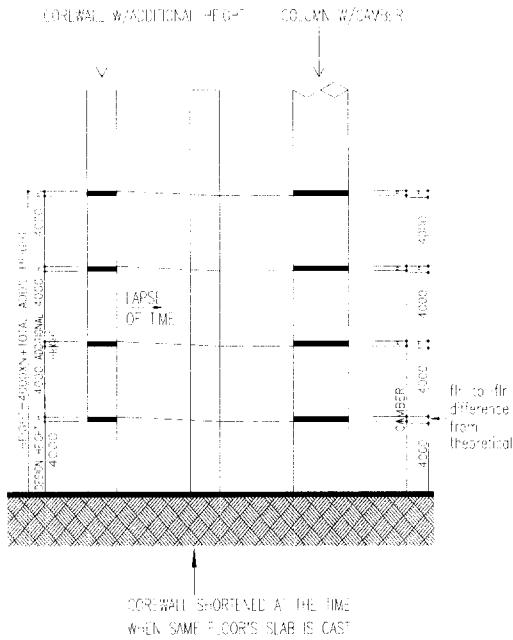


그림 3 보정의 개념

이의 해석을 위한 계산식들은 현재 많은 전문지에서 다루어지고 있다. 계산식 중에서 비탄성축소량을 좌우하는 계수들을 보면 상대습도, 체적대표면적비, 철근비, 타설후 경과시간 등이며, 특별히 재하하중에 영향을 받는 Creep의 경우에는 타설 후 종속되는 사하중과 활하중의 재하시 재령과 재하시간이 계수로 포함된다. 위의 각 계수들은 부재가 가지고 있는 Property에 따라서 적절히 계산될 수 있으나, 이 중 상당히 중요한 인자 중 하나인 상대습도는 건물이 위치한 지역의 환경적인 특성으로서 이의 설정을 위한 특별한 주의가 필요하다고 본다.

4.2 원설계자의 보정안

4.2.1 골조공사에 대한 지침

본건물의 구조설계는 Thornton-Tomasetti가 수행하였다. 이들의 구조설계안은 하중이력을 좌우하는 골조공사 진행순서에 대하여 다음과 같이 시공지침을 제시하였다.

1단계

1) 어느 부분이 선시공되더라도 Core와 Ring Frame의 층수는 5개층 이상 차이가 나지 않도록 한다.

- 실제로는 건물 완공시까지 항상 Corewall이 선행되었다.

2) 바닥슬래브의 시공은 Core나 Ring Frame 중 늦은 공정보다 5개층 이상 처지지 않도록 한다.

3) 커튼월은 설치층 바닥슬래브의 강도가 설계강도의 75%에 도달한 이후에 편리한 시간에 설치할 수 있다.

4) 예상시공 상태

Tower Core는 19층에 도달한다.

Tower Ring Frame은 14층에 도달한다.

바닥 슬래브는 9층에 도달한다.

Bustle의 시공은 시작되지 않는다.

- 실제의 시공은 위의 Guide Line에서 크게 벗어나지 않았다.

2단계 (Tower와 Bustle 동시시공)

1) Bustle의 시공은 Tower 1개층당 2개층의 속도로 시공될 수 있으나, 동일층의 경우 Bustle 바닥의 시공은 어떠한 경우에도 Tower 바닥의 시공보다 1주일 이상 늦어야 한다.

2) Skybridge를 지지하는 28,29층 Cantilever의 콘크리트 타설은 그층의 바닥슬래브의 강도가 설계강도의 75%에 도달한 이후에 실시한다.

3) Bustle 바닥슬래브는 Bustle Rin Frame보다 6개층 이상 늦지 않아야 한다.

- 실제의 시공은 위의 Guide Line에서 크게 벗어나지 않았다.

3단계 (Set Back층의 시공)

1) Tower의 Transition이 일어나는 57~60, 70~73, 79~82층의 바닥슬래브 타설은 건너뛸 수 없고, Ring Frame 보다 2개층 이상 늦어져서는 안된다.

- 이 지침은 기둥의 경사로 인한 수평력의 영향을 고려한 것이다. 실제로는 Ring Frame의 타설을 위한 System Form의 간섭으로 위의 지침을 만족시키기 어려웠으며, 감리측의 승인을 통하여 조정되었다.

2) 콘크리트 Frame이 끝나는 84M2층의 슬래브강도가 설계강도의 75%이상에 도달하기 까지 상층의 Steel Frame 바닥슬래브는 타설되지 않아야 한다.

3) Pinnacle의 시공은 88층까지의 모든 슬래브가 타설되고 75%의 설계강도에 도달한 이후에 시작할 수 있다.

- 실제의 시공은 위의 Guide Line에서 크게 벗어나지 않았다.

4단계 (Tower의 완공과 Outrigger 시공)

1) Skybridge Leg는 Tower 내부슬래브가 최소 44층까지 타설되고 설계강도의 75%에 도달한 후에 설치될 수 있다.

- 실제로는 Tower의 바닥슬래브가 56층에 도달한 후에 Skybridge가 시공되었다.

2) 38~39층의 Outrigger Girder와 Post의 형틀작업은 편리한 시간에 할 수 있지만, 콘크리트의 타설은 수축변위를 허용할 수 있도록 88층까지의 커튼월을 포함한 모든 구조하중이 작용한 이후에 타설되도록 한다.

- 실제로는 시공자 입장에서 공정상의 문제점을 제기하여 60층 바닥슬래브까지 시공된 시점에서 Outrigger를 타설하였으나, 이때 기둥쪽 단부에는 약 1m 구간의 Blockout을 두어서 Corewall과 기둥이 연결되지 않은 상태로

(철근만 배근된 상태) 88층까지의 골조시공이 완료될 때까지 방치하여 그 사이에 발생하는 기둥간의 불균등침하를 허용하게 하였다.

3) Pinnacle Mast는 하부의 Pinnacle Frame을 가설구대로 이용하여 설치할 수 있다. 이때 마스트의 최상층부분이 먼저 조립되고 Jacking System을 이용하여 상부로 들어 올린 후 다음 부분이 조립되는 방식으로 설치되어야 한다.

4.2.2 층별 보정값 설정

1) 본 건물에 적용된 최초의 보정값은 골조공사 착수후 2년(예상 골조공사 기간)을 목표시점으로 하여 설정되었다. 따라서 건물 완공후 시간이 경과하면 건물의 높이는 보정된 값 이상으로 수축되어 설계높이보다 작아지게 된다. 이와 같이 설정한 이유는 비탄성축소는 타설후 초기에 그 효과가 가장 뚜렷하여 그 후에 발생하는 축소량은 크지 않다고 판단했기 때문이라고 생각된다.

2) 1)과 같이 설정한 보정값은 추후에 그 목표시점을 20년으로 수정함으로써(20년후 기준층 높이가 4000mm가 되도록 함) 그 보정값이 전체적으로 증가하였다. 이러한 목표시점의 수정은 지하층이 이미 시공된 시점에서 이루어졌기 때문에 수정된 값은 지상1층부터 적용되었다.

4.2.3 보정 상세표

표1 보정상세표 참조

4.3 보정의 현장적용

4.3.1 보정 방법

1) 보정은 Corewall을 기준으로 이루어진다. 이는 건물의 Corewall이 선시공되리라는 점을 고려한 것이다.

표 1 보정상세표

| LEVEL BEING BUILT | ADDITION TO CORE HEIGHT | TOWER COLUMN VS. CORE | BUSTLE VS. TOWER COL. | LEVEL BEING BUILT | ADDITION TO CORE HEIGHT | TOWER COLUMN VS. CORE | BUSTLE VS. TOWER COL. |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 84M3 | 6.0 | 25 | | 40 | 6.0 | 35 | 0 |
| 84M2 | 6.0 | 26 | | 39 | 7.0 | 35 | 1 |
| 84M1 | 6.0 | 26 | | 38 | 7.0 | 34 | 2 |
| 84 | 6.0 | 27 | | 37 | 7.0 | 34 | 3 |
| 83 | 6.0 | 28 | | 36 | 7.0 | 33 | 4 |
| 82 | 6.0 | 29 | | 35 | 7.0 | 33 | 5 |
| 81 | 6.0 | 29 | | 34 | 7.0 | 32 | 6 |
| 80 | 6.0 | 30 | | 33 | 7.0 | 32 | 7 |
| 79 | 6.0 | 31 | | 32 | 7.0 | 31 | 8 |
| 78 | 6.0 | 31 | | 31 | 7.0 | 31 | 9 |
| 77 | 6.0 | 32 | | 30 | 7.0 | 30 | 10 |
| 76 | 6.0 | 32 | | 29 | 7.0 | 30 | 10 |
| 75 | 6.0 | 33 | | 28 | 7.0 | 29 | 10 |
| 74 | 6.0 | 33 | | 27 | 7.0 | 29 | 10 |
| 73 | 6.0 | 34 | | 26 | 7.0 | 28 | 10 |
| 72 | 6.0 | 34 | | 25 | 7.0 | 28 | 10 |
| 71 | 6.0 | 35 | | 24 | 7.0 | 27 | 10 |
| 70 | 6.0 | 35 | | 23 | 7.0 | 27 | 10 |
| 69 | 6.0 | 35 | | 22 | 7.0 | 26 | 10 |
| 68 | 6.0 | 35 | | 21 | 7.0 | 26 | 10 |
| 67 | 6.0 | 35 | | 20 | 7.0 | 25 | 10 |
| 66 | 6.0 | 35 | | 19 | 7.0 | 24 | 10 |
| 65 | 6.0 | 35 | | 18 | 7.0 | 22 | 9 |
| 64 | 6.0 | 35 | | 17 | 7.0 | 21 | 9 |
| 63 | 6.0 | 35 | | 16 | 7.0 | 20 | 8 |
| 62 | 6.0 | 35 | | 15 | 7.0 | 19 | 8 |
| 61 | 6.0 | 35 | | 14 | 7.0 | 17 | 7 |
| 60 | 6.0 | 35 | | 13 | 7.0 | 16 | 7 |
| 59 | 6.0 | 35 | | 12 | 7.0 | 15 | 6 |
| 58 | 6.0 | 35 | | 11 | 7.0 | 13 | 6 |
| 57 | 6.0 | 35 | | 10 | 7.0 | 12 | 5 |
| 56 | 6.0 | 35 | | 9 | 7.5 | 11 | 5 |
| 55 | 6.0 | 35 | | 8 | 7.5 | 10 | 4 |
| 54 | 6.0 | 35 | | 7 | 7.5 | 10 | 4 |
| 53 | 6.0 | 35 | | 6 | 7.5 | 9 | 4 |
| 52 | 6.0 | 35 | | 5 | 7.5 | 8 | 3 |
| 51 | 6.0 | 35 | | 4 | 7.5 | 7 | 3 |
| 50 | 6.0 | 35 | | 3 | 7.5 | 6 | 3 |
| 49 | 6.0 | 35 | | 2 | 7.5 | 6 | 2 |
| 48 | 6.0 | 35 | | 1 | 7.5(6.5) | 5 | 2 |
| 47 | 6.0 | 35 | | | | | |
| 46 | 6.0 | 35 | | GROUND | 7.5(5.0) | 4 | 2 |
| 45 | 6.0 | 35 | | CONCRS | 7.5(3.5) | 3 | 1 |
| 44 | 6.0 | 35 | | P1 | 7.5(3.5) | 2 | 1 |
| 43 | 6.0 | 35 | | P2 | 7.5(3.5) | 2 | 1 |
| 42 | 6.0 | 35 | | P3 | 7.5(3.5) | 1 | 0 |
| 41 | 6.0 | 35 | | P4 | 7.5(3.5) | | |

2) Corewall의 시공은 4.2.3에 제시된 대로 해당층의 추가 타설높이 만큼 더하여 Corewall Sliding Form에 표시를 하고 이에 맞추어 타설을 한다.

3) 이렇게 타설된 Corewall에는 Form의 탈형후 가능한 빠른 시간에 기준점을 설정하고, 이를 근거로 추후에 시공되는 그 층의 Tower Column에 Camber를 적용한다. 즉 Column의 보정은 Corewall에 종속적이며, 그 층의 Corewall에 비하여 Camber 만큼 높게 타설한다. 따라서 시공시에 Tower의 바닥슬래브는 항상 Corewall쪽으로 기우는 경사를 가져서 강우로 인해 유입된 물은 Corewall 주변에 모이는 현상이 발생하였다.

4) Bustle Column의 경우는 먼저 시공된 Tower Column(Bustle에 면한 기둥)을 기준으로 Camber를 적용한다. 즉 Bustle Column의 보정은 Tower Column에 종속적이다.

5) 3) 및 4)와 같이 할 경우, Column의 추가 타설량은 Corewall의 타설 후 그층 Column의 타설시점까지 Corewall이 얼마나 수축하는가에 따라 변화하므로 정확한 값을 알 수 없다.

6) 이와 같은 이유로 골조공사를 위한 시공지침이 제시되어 Corewall을 기준으로한 Column의 보정량이 일정한 범위에 있도록 조정되었다.

7) Camber의 값이 변화할 경우는 점진적으로 하되 2mm/층 이하로 한다.

8) Corewall은 5개층 마다 그 추가분을 합하여 설정값과 비교한 후 차이가 있을 경우 상부층에 반영하되 이때의 수정치는 2mm/층 이하가 되도록 한다.

9) 8)과 같은 5개층 단위의 측량은 2개층 혹은 3개층 구간씩 겹치치면서 상부로 진행한다. 즉 0~5층의 측량 후에 3~8층, 5~10층, 8~13층, 10~15층 등의 순서로 측량과 수정을 해나간다. 5개층 타설기간 동안에도 수축이 발생하겠으나 그 영향은 미미하다.

10) Corewall에 있는 각종 개구부는 설계된 위치에 두고 추가타설분(Additional Height)은

개구부위 Lintel Beam에 적용한다.

4.3.2 보정을 위한 Survey System

1) Shortening은 콘크리트 타설후 즉시 발생하기 시작하므로 이의 관측을 위해서는 탈형후 가능한 한 빨리 Marking을 실시한다.

2) Corewall의 타설후 Form이 탈형되면 Floor level(FFL)에서 위로 1m 부근에 못을 박아놓고, Precise Level과 Invar Staff를 사용하여 하부층의 기존 못을 기준으로 새못의 주두부에 기준점을 표시한다. 이때의 측량오차는 10개층당 1~2mm 정도이다.

3) Tower 기둥의 경우는 임의의 층 기둥의 50% 정도가(16개중 8개 기둥) 탈형된 이후에 2개의 기둥에 못을 박고 기준점을 못의 주두부에 표시한다. 이때에 Corewall과 기둥간에 camber를 적용한다.

약 15~20일 후에 그층이 바닥슬래브가 타설되면 접근이 자유로워지므로 모든 기둥에 기준점을 표시한다.

4) Bustle의 경우는 Form을 탈형하자마자 전 기둥에 접근이 용이하므로 모든 기둥에 FFL+1m의 기준점을 표시한다.

이때 Tower의 15,16,1,2번 기둥의 기준점으로부터 Camber를 적용한다.

5) 모든 측량은 태양열에 의한 영향을 배제하기 위하여 오전 6시에서 9시 사이에 실시한다.

5. 계 측

5.1 현장 측량을 통한 계측

5.1.1 측량 방법

1) 기둥수축을 파악하기 위한 정밀수직거리의 측량은 오차조정을 거친 출자를 각층의 Core내부 및 기둥진면에 각각 4개씩 슬래브에 설치한 Blockout을 통하여 늘어뜨림으로서 실시하였다.

2) 공사가 진행되면서 출자를 사용하기가 어려워져 수직도 측량을 위해 사용한 Air Duct를

이용하였다.(Core내부의 계단실중 Bustle쪽의 계단실에 위치한 Air Duct가 84M2층까지 막힘 없이 연속된다.)

3) 전자식 거리측정기를 Air Duct 위치의 최하층 (P4 Level : 지하6층) 바닥에 설치하고 해당층에는 Precise Prism를 놓아서 측정하였다.

4) Core와 Tower Column은 L2,L30,L60,L84의 4개층을 표본으로 하고 Bustle Column은 L2,L20,L30,L41을 표본으로 하였다.

5) 수축값은 측정별 평균치를 취하였으므로 측정위치별 Shortening양의 차이와 건물 기움현상의 영향은 배제하였다.

6) 최종 현장측량은 88층(최상층) 바닥슬래브 타설을 완료한 96년1월에 실시되었다.

표 2 측량을 통한 수축결과

| Tower Column | | Location(기둥번호) | | | |
|--------------|----------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Disance | Duration | 13 | 10 | 7 | 2 |
| P4`CC | 30-8-94~ 22-1-96 | -10.2 | -10.8 | -10.3 | -10.4 |
| P4~L2 | 30-8-94~ 22-1-96 | -16.3 | -13.6 | -15.8 | -16.0 |
| P4~L10 | 7-11-94~ 22-1-96 | -27.6 | -26.8 | -24.0 | -28.6 |
| P4~L20 | 30-12-94~ 22-1-96 | -43.4 | -40.0 | -39.0 | -46.1 |
| P4~L30 | 29-1-95~ 22-1-96 | -54.7 | -50.2 | -49.5 | -54.0 |
| P4~L41 | 15-4-95~ 22-1-96 | -56.0 | -52.4 | -50.7 | -59.1 |
| P4~L50 | 9-6-95~ 22-1-96 | -39.1 | -29.4 | -30.4 | -39.1 |
| P4~L60 | 11-9-95~ 22-1-96 | -39.1 | -35.3 | -34.8 | -38.3 |
| P4~L70 | 11-9-95~ 22-1-96 | -41.1 | -38.4 | -36.7 | -40.6 |
| P4~L80 | 9-11-95~ 22-1-96 | -18.2 | -17.2 | -15.2 | -15.5 |
| P4~L84M2 | 23-12-95~ 22-1-96 | -15.7 | -14.2 | -15.1 | -13.9 |

5.1.2 측량결과

표2는 Tower부의 측량결과임. 위의 표에서 50층에서 70층사이의 결과를 보면 Bustle측 기둥의 수축값이 대체로 많다.

5.2 Strain Guage를 통한 계측

본 건물에는 총100개의 Strain Guage가 매설되었으며, Interval을 설정하여 Strain의 변화 값을 읽음으로서 특정층의 기둥수축량을 측정하였다.

5.2.1 계측 GUAGE의 설치

1) 장비의 구성

Guage Element(GEOKON VCE-4200)

-Material : Stainless Steel buna N

-Overall Dimension (L*Dia.) :153*19(mm)

-Range : 3000 microstrain

-Typical Frequence Datum : 800Hz.Cable

-Material : 4 Conductor-shielded 22 guages vinyl jacket

-Size : 4.7mm

Vibrating Wire Readout(GEOKON GK-403)

-Excitation Range : 400Hz.~6000Hz.

-Measurement Resolution : 0.25 μ s/255

-Timebase Accuracy : 0.01%

2) 설치 위치

그림4 참조

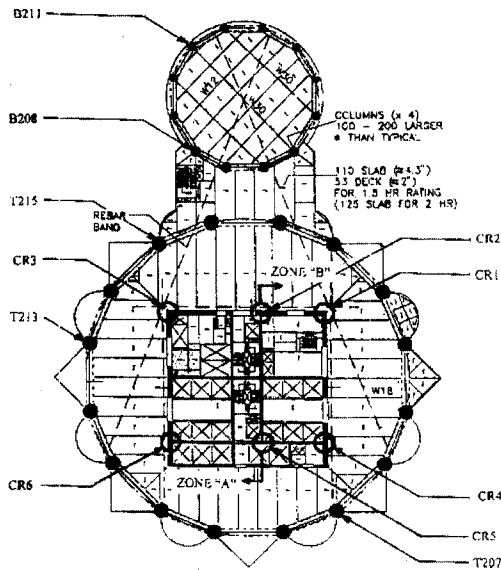
3) 층별 설치 현황 (총 100개)

| 설치층 | Core | Tower column | Bustle Column |
|--------|------|--------------|---------------|
| Street | 6개 | 3*3=9개 | 2*3=6개 |
| L19 | 6개 | 3*3=9개 | 2*3=6개 |
| L38 | 6개 | 3*3=9개 | |
| L45 | 6개 | 3*3=9개 | |
| L58 | 6개 | 3*3=9개 | |
| L65 | 6개 | 3*3=9개 | |
| | 34개 | | |

4) 설치 방법

- Guage를 사진2와 같이 철사를 이용하여 철근에 고정시킨다.

- 측정용 Cable을 보호용 PVC Tube속에 넣고 콘크리트 타설높이 이상이 되도록 연장하여 철근에 고정시켜 둔다



T: Tower, B: Bustle CR: Corewall
 -T213은 Tower #2의 13번 기둥을 말함.
 -기둥의 번호는 1시 방향의 기둥을 1번으로 시계방향으로 순차적으로 설정 된다.

그림 4 Guage 설치위치

- 이때 Cable과 근접한 위치에 PVC Pipe를 설치하되 상단은 타설높이 위로하고 하단은 매립되도록 한다.
- Form이 탈형되자마자 타설 높이 위로 고정시켜 둔 Cable을 PVC Pipe를 통하여 Pipe 하단의 Exit로 내보낸다.
- 위와 같은 방법으로 각각의 위치에서 나온 Cable은 그 층의 슬래브가 타설된 후 Core 내부의 전기실로 모아서 Terminal Box에 고정해 둔다.

5) 계측Guage의 손상방지

당현장의 경우 하루 출력인원은 대략 1500명에 이르며 출신국으로 따지면 5~6개국이 된다. 또한 여러 공종의 종사자들이 동시에 작업을 하므로 서로의 작업이 간섭될 경우는 그 자리에서 협의하여 조정하는 것이 보통이다.

계측 Guage는 설치된 후에 콘크리트 속에 매입되어 있어 보이질 않고 또한 측정용 Cable도

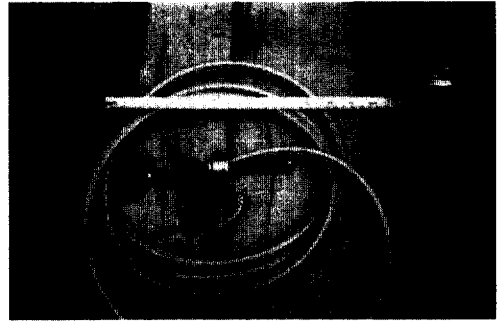


사진 1 Guage & Cable

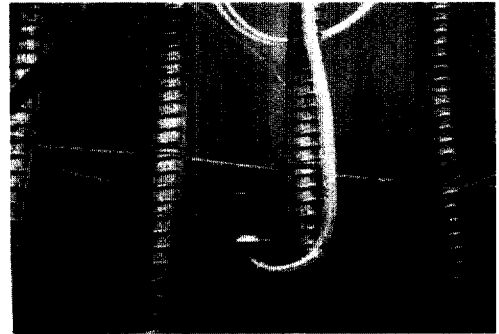


사진 2 Guage 설치현황

접근성을 위하여 길게 늘어뜨려 놓게 된다.

그러나 계측담당자는 측정시에만 현장에 있게 되므로 다른 작업자들에 의해 Guage나 Cable이 손상될 수 있다.

본건물에서는 19층 Corewall의 보수작업을 위하여 coring을 하는 과정에서 2개의 Guage가 손상되었고, 간혹 Cable이 잘린 경우도 발생하였다. 이와 같은 사고 이후에는 설치위치를 크게 표시하고 주의문을 써놓아 더 이상의 유사한 사고는 발생하지 않았으나, 원인을 알지 못하는 손상을 입은 경우도 다수 발생하여 그 총수는 10개에 이른다.

이는 총 100개의 10%에 해당하는데, 측정을 위한 일련의 수고와 비용 그리고 이들 자료가 가지는 가치를 고려하면 막대한 손실이라 하겠다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 각 공종의 관리자에게 측정작업에 대하여 인식을 시킴과 동시에 설치후의 관리에 보다 주의해야 하겠다.

5.2.2 측정

1) 측정원리

- 5.2.1.4)와 같이 설치된 Guage Element속에는 임의의 세기로 인장된 Wire가 있으며, 여기에 cable을 통하여 전기충격을 줌으로서 진동을 일으킨다.
- 진동수는 Guage가 수축한 정도(Wire가 느슨한 정도)에 따라 다르게 되며, 이는 기타 줄을 Tuning할 때와 같이 줄의 팽팽한 정도에 따라서 진동수와 음의 높이가 다른 것과 같은 이치이다.
- 이때에 발생하는 진동수는 Readout을 통하여 자동적으로 Strain값으로 변환된다.
- 수축량은 Guage의 설치 후 가능한 한 빠른 시간내에 초기값을 읽고, 정해진 시간 간격을 두고 계측함으로써 이때의 Strain값의 변화양을 가지고 구한다.

2) 측정간격

아래 표 참조

| 타설후 경과시간 | 계측 시간 간격 |
|----------|----------|
| 0 ~ 7일 | 12시간 |
| 7 ~ 28일 | 매일 |
| 1달 ~ 6달 | 매5일 |
| 6달 ~ 1년 | 매달 |
| 1년 ~ | 매3달 |

최초의 계측은 접근이 가능한 가장 빠른 시간에 실시한다. 계측은 현장 접근성의 문제로 인하여 위에서 제시한 대로 정확히 실시하지 못하는 경우가 종종 발생하였으나 그 차이는 길어도 2일 이내로 실시되었다.

5.2.3 측정결과

그림5 측정결과 및 해석결과 Graph 참조.

5.2.4 측정결과에 대하여

측정결과 Graph에 나타난 수축량의 변화추이를 보면 대체로 초기에 수축량이 갑작스럽게 증가하는데 이는 탄성계수가 타설 후 초기에 상당히 작기 때문으로 판단되며 그후에 발생하는 수

축량의 감소현상은 탄성계수의 회복과 더불어 수화열의 증가로 인한 부피의 팽창성에 기인한다고 보고있다. 그 외에 Graph의 Curve에서 발견되는 갑작스런 변화나 예측Graph와의 편차는 실제 하중의 재하이력 조건이 예측값 해석에 적용된 조건과 상이함으로 인하여 발생된 것으로 판단되나 보다 자세한 분석은 당사에서 수행하고 있는 연구논문을 빌어 나타내기로 한다.

6. 해석을 통한 수축값 예측

6.1 축소량 해석

당사에서는 본건물에 대하여 구조해석을 통하여 수축량을 예측하였으며, 이 결과는 위에서 거론된 보정값 및 측정값과 비교되었다.

당사의 해석에서는 Fintel et al.의 모델이 사용되었으며, 전체 축소량은 탄성수축, Creep 및 건조수축과 관련된 세 부분으로 구분하여 해당 층 콘크리트 타설 전과 후의 경우로 산정된다. 해석Model에 사용되는 콘크리트의 제계수, 즉 탄성계수, 극한크립변형도(Specific Creep), 및 극한건조수축변형도 등은 현장에서 실시된 실내시험 결과를 근거로 하여 설정되었다.

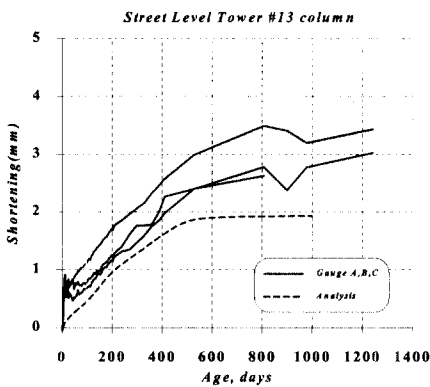
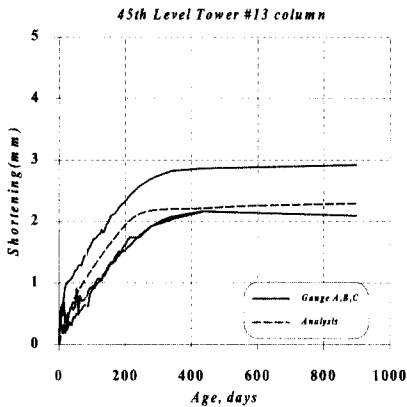
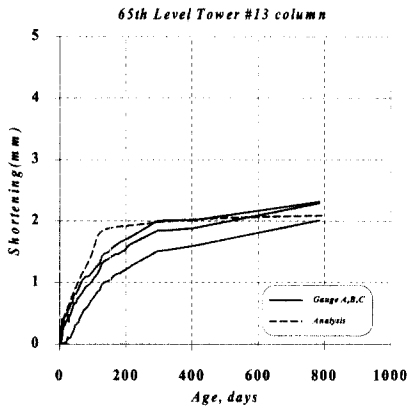
여기서 한가지 중요한 점은 위의 계수들은 콘크리트의 강도가 동일하다고 하더라도 공사지역에 따라서 현지의 재료특성 및 배합에 따라서 실내시험의 결과가 상이하다는 것이다. 따라서 구조설계자가 보다 정확한 보정안을 작성하기 위해서는 현지에서 작성된 동일한 강도에 대한 실험 Data를 입수해서 설계에 반영해야 할 것으로 생각된다.

본 고에서는 위의 해석과정이나 연구결과는 논문형식으로 전문기술지에 발표할 예정이므로 이의 해석과정에 적용된 식이나 전제조건, 입력값들은 생략하고 그 결과만을 나타내었다.

6.2 해석결과

그림5 측정결과 및 해석결과 Graph 참조.

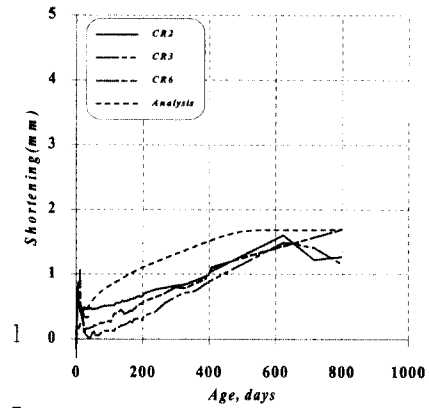
Column #213



7. 수축값의 비교

위에서 열거한 바와 같은 여러 가지 수축값, 즉 Strain guage에 의한 계측치(Measured), 해석치(Analysis), 그리고 원설계자 (Thornton & Tomasetti)가 제시한 보정치(T&T)등을 비교하면 표3과 같다.

Corewall zone A street level



Corewall zone B street level

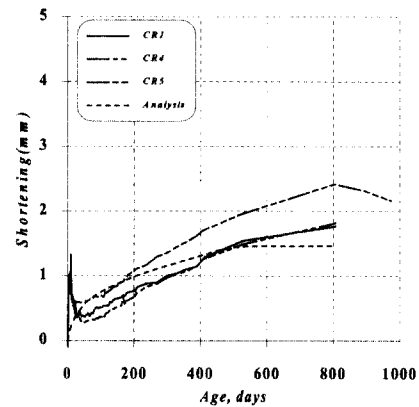


그림 5 측정결과 및 해석결과 Graph

표3에 나타난 결과를 보면 측정치와 해석치는 근소한 차이를 보이는 반면에 원설계자의 보정치는 차이를 보이고 있다. 이는 실제적인 하중의 이력과 현지의 환경조건, 재료의 물성치등의 계산시 원설계자가 적용한 조건과 상이하기 때문으로 판단된다. 실제로 팔조 및 Curtain wall공사와 분리하여 발주된 내부 Interior (Tenant work) 공사가 지연됨으로서 적재하중의 적용이 지연되었으며, 현지의 상대습도도 계산시 적용조건인 80%를 상회하고 있다.

단, 위의 비교표에서 현장 Survey를 통한 직접측량값은 위에서 열거한 여러 수축치와 같이 1 개층 단위로 결정된 값이 아니기 때문에 제외하였다. 그러나 여기서 한가지 아쉬운 점은 공사초

기부터 측량 System을 위의 값들과 비교될 수 있는 방식으로 실시하였다면 측정치, 예측치, 그리고 보정치등과 보다 구체적인 비교가 가능하고 기동수축의 이해를 위하여 도움이 될 수 있었으리라는 생각이다.

표 3 수축 결과 비교

| Level | Tower Column #13 | | |
|------------------|------------------|---------------|------------|
| | Measured (mm) | Analysis (mm) | T & T (mm) |
| 1 | 2.90 | 1.95 | 4.30 |
| 19 | 2.80 | 1.93 | 4.30 |
| 38 | 1.90 | 2.34 | 3.50 |
| 45 | 2.30 | 2.20 | 2.00 |
| 65 | 1.80 | 2.00 | 2.00 |
| Bustle Column #8 | | | |
| 1 | 2.53 | 2.29 | 4.60 |
| 19 | 1.97 | 1.82 | 4.80 |
| Corewall Zone A | | | |
| 1 | 1.45 | 1.80 | 3.50 |
| 38 | 2.80 | 0.91 | 3.00 |
| 58 | 1.20 | 0.82 | 2.00 |
| 65 | 1.45 | 0.89 | 2.00 |

8. 맺음말

국내에서 기동수축에 관한 문제가 구조설계의 한 항목으로 인식된 것은 그렇게 오래되지 않았지만, 고강도 콘크리트가 초고층구조용 재료로서 그 구조적인 우수성과 경제성이 널리 인식되고 그 사용이 빈번해지면서 그 중요성을 더하고 있다. (근래에 동남아에서 추진되고 있는 몇몇 초고층 건물에서도 수직부재를 고강도 콘크리트와 철골을 복합적으로 사용하여 설계되고 있음.)

따라서 근래에 들어 전문 기술지에서 이를 주제로 한 연구결과가 많이 다루어지고 있는 것은 이에 대한 관련분야의 관심을 반영하고 있다고 생각된다.

이에 본고에서는 연구소나 학계에서 발표되는 전문적인 연구성과가 아니라 국내 건설사에 의하여 시공된 최고층 콘크리트 건물에서 기동수축과

관련한 업무를 수행하면서 겪었던 실제 사례를 소개함으로써 관심을 가지고 있는 분들이나 장차 유사한 Project에 참여할 구조담당자에게 도움이 되고자 하였다.

기동수축의 문제는 건물의 기능성과 안정성에 모두 영향을 미치는 중요성을 가지고 있지만 그 현상은 오랜 시간에 걸쳐 진행되므로 건물의 설계에서 이를 적당히 반영하지 않았다고 하더라도 사용자는 이로 인한 하자를 사전에 인식하기 어려우며, 건물의 사용 중에 심각한 피해를 볼 수도 있다. 따라서 대체로 50층 이상이라고 일컬어지는 초고층 콘크리트구조물의 설계에서는 이에 대한 적절한 보정 방법과 더불어 시공지침을 제시하는 것이 구조설계의 필수사항이라 하겠다.

또한 단일 콘크리트재료로 사용되던 기동부재는 현재 다양한 방식으로 철골과 혼합하여 각각의 잇점을 최대화하는 추세이나 현재까지 이러한 합성구조의 수축에 대해서는 단순히 철근비의 변수로서 해석시에 반영되고 있으며 아직까지 실제 적용을 통한 경험과 해석자료가 충분하지 못한 실정므로, 앞으로 이에 대한 실험과 연구가 계속되기를 기대해 본다.

참 고 문 헌

1. 삼성건설 건축사업본부 말레이시아 KLCC현장 "Malaysia KLCC 기술자료집 1권 공사개요 및 현장관리"
2. 김원상, 오정근, 조한욱, 염경수, 이동렬, "KLCC 건물의 기동축소량에 관한 연구"
3. Mark Fintel, S.K.Ghosh, and Hal Iyenger, "Column Shortening in Tall Structures- Prediction and Compensation "
4. 송하철, 유은종, 정석창, 주영규, 박찰림 "초고층 콘크리트 건물의 기동 축소량 효과"
5. RANHILL BERSEKUTU SDN BHD, Thorton-Tomasetti, "Petronas Tower2 and Skybridge Structural Dwg, Tower 2Erection & Survey Notes" 