超高層 建物의 鐵骨工事
(목동 현대 하이페리온 신축공사 현장 사례 중심)

1. 목동 현대 하이페리온 신축공사

조충홍*

김인기**

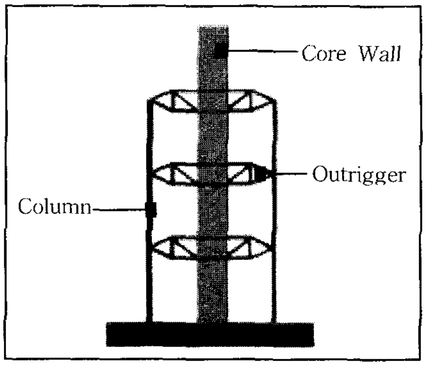
1.1 일반 사항

예제의 프로젝트는 서울시 양천구 목동에 위치한 면적 24,324m² 일원의 부지에 최고 69 층의 아파트 2 개 동, 59 층의 오피스텔 1 개 동, 그리고 백화점 1 개 동으로 구성된 주상복합 건축물을 건립하는 공사로서 건축면적 14,361m², 건축연면적 385,298m²이다. 공사가 완료되면 국내에서 가장 높은 253.6m의 주상복합 건축물이 동 부지에 위치하게 된다.

사업주는 한무쇼핑(주)이며, 공사 기간은 1999년 11월부터 2003년 6월까지이다. 기본 설계는 현대건설 종합건축설계실(현 큐브엔지니어링)이, 본 설계는 예 종합건축사 사무소에서, 구조설계는 큐브엔지니어링(주)과 동양구조안전기술(주)이 OAP의 컨설팅을 받아 수행하고 있으며 현대건설(주)이 시공을 담당하고 있다.

1.2 철골공사 개요

본 프로젝트는 Core Wall 선행 공법을 채택하였으며 선행하는 철골 공사는 프로젝트 전체적인 공정상 Critical Path로서 중요한 관건이라 하겠다. 특히 RC Core와 이에 접합되는 각 벨트 층의 아웃리거-트러스(Outrigger- Truss) 설치 공사는 필수적인 선행공정으로서, 이러한 공정이 지연되면 이와 연관한 일련의 Cycle 공정도 지연될 수밖에 없다. 따라서 층수가 많은 초고층 건축에서는 계획된 Cycle 공정의 준수가 가장 중요한 공정관리의 대상이 되겠다.

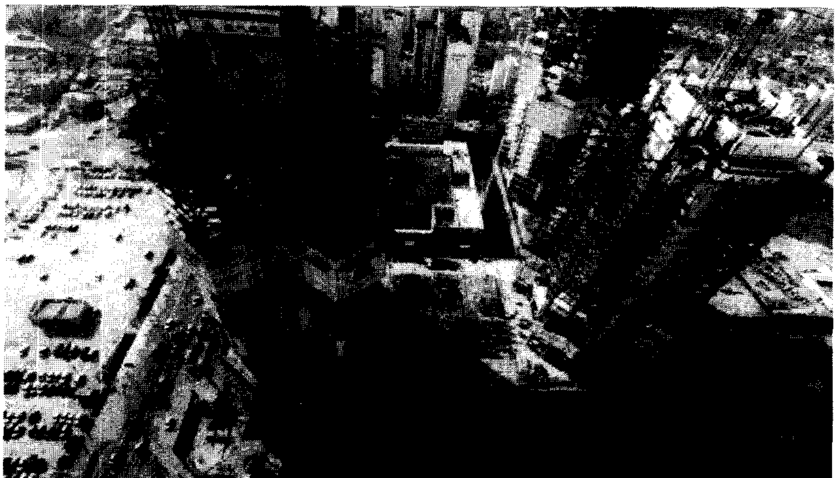


<그림 2> 구조 시스템

1.3 구조설계 개요

1.3.1 구조 시스템

예제의 프로젝트에는 구조 계획상 중앙에 위치한 RC Core와 주변의 SRC 기둥이 조합된 중앙 코아 시스템이 채택되었고 각 동별 2~3 개 소에 벨트 층을 계획하여 횡력의 전달을 해결하였다. 벨트 층을 구성하는 아웃리거-트러스와 트랜스퍼-트러스(Transfer-Truss)는 강재로 구성된다. 주 구조 콘크리트는 고강도(f_{ck} =500kg/cm²)이며, 주 구조용 강재는 등급 SM490의 TMCP(Thermo Mechanical Control Process)강을 사용하였다(강재의 용접성과 강도 증가). 철골 부재 접합은 Bolting과 Welding을 병용하였다. 용접



<그림 1> 목동 현대 하이페리온 현장

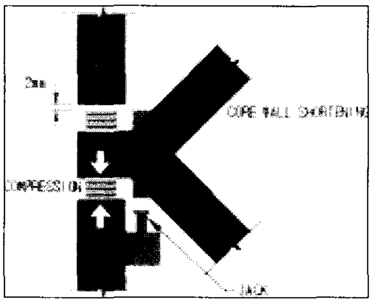
* 한국건축시공학회 부회장, 현대건설(주) 부사장
** 큐브엔지니어링(주) 구조사업부장, 건축구조기술사

에는 CJP(Complete Joint Penetration Groove Weld), PJP (Partial Joint Penetration Groove Weld)를, 부위별로 병용하였으며 기둥의 현장용접에는 25% Metal Touch를 도입하였다.

1.3.2 기둥 부등축소(Column Differential Shortening)

초고층 건축물 시공과정 및 시공 후에 시간경과와 함께 RC 코아와 외부 강재기둥 간에 주로 층하중에 의한 부등축소(Differential Shortening)현상 때문에 발생하는 기술적 문제는 설계와 시공에서 해결하여야 할 중요한 숙제 중의 하나이다.

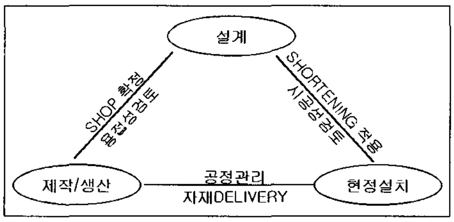
강재는 하중에 의한 탄성축소 때문에 줄어들며 RC 코아는 하중에 의해 탄성축소 뿐만 아니라 Creep와 Shrinkage 때문에 줄어든다. 일정한 하중 하에서 축소량 변화율은 시간 경과와 함께 완만한 감소를 보인다. 따라서 철골 기둥은 철골 기둥 설치 이후 예상되는 상기한 부등축소량을 고려하여 제작할 필요가 있으며 RC 코아나 철골기둥에 대한 아웃리거-트러스 접합방법과 최종접합(용접 또는 볼트접합) 시기를 조정하여야 한다. 접합방법과 그 접합시기가 부적절한 경우, 부등축소에 의한 부가응력이 발생하여 구조물이 영향을 받게된다. 본 프로젝트에는 이를 해결하기 위해 Delay Joint와 Adjustment Joint(그림 3 참조)를 연구하여 도입하였다.



<그림 3> Adjustment Joint 개념

2. 철골공사 운영체계

예제의 프로젝트에는 설계와 시공을 병행하는 Fast-Track 기법이 도입되었다. 특히 Critical Path인 철골공사에는 그림 4와 같은 TFT(Task Force Team)를 운영하여 집중관리하고 있다. 이것은 제안된 공기준수, 요구되는 설계변경과 작업변경에 대한 적의대처, 목표한 품질확보, 원활한 공정진행 등을 위한 효율적인 철골공사 운영체계 중의 하나이다. 예제 프로젝트 현장은 이러한 운영체계를 통하여 설계변경에 기인하여 요구되는 원자재 재발주와 제작변경의 부담을 최소화하는 방안을 모색하고, Deck, RC 구조물 공사, 외벽공사 등의 타공사와 간섭관계를 사전 검토하여 불필요한 공정지연 사유를 초기에 차단하는 등 설계, 제작/생산, 현장시공에 이른 일련의 과정에서 단위 조직간 원활한 커뮤니케이션 수행역할을 하는 등 효과적인 성과를 거두고 있다.



<그림 4> 초고층 철골공사 현장 TFT

3. 철골공사 시공관리

3.1 자재 발주

TMCP강은 발주로부터 입고까지 약 2.5~3개월이 소요되었다. 원자재발주에서 POSCO로부터 원자재입고에 이르는 공기를 참고용으로 표 1에 나타내었다. 자재발주는 확정된 기본설계도를 참조한 Cutting Plan에 근거하였다.

3.2 TMCP강 철골의 공장제작

Built-Up 단면 제작으로부터 Built-Up 단면을 사용한 주기둥 및 벨트 층 트러스 가공에 이르기까지, 부재를 구성하는 TMCP강판(40mm~80mm)간 그리고 부재간 공장이음과 접합은 X-홈 접합 및 이음으로서 SAW(Submerged Arc Weld)이기 때문에 상당량의 용접열에 의한 변형을 최소화할 수 있는 용접순서를 확립함은 물론 후판인 관계로 저온균열방지를 위한 예열작업을 통하여 안정된 용접품질을 확보하여야 한다.

제작된 Built-Up 부재의 가공과 절단은 자동 Conveyor System Line상에서 N/C Drill 및 Band Saw Cutting 가공으로 각 부재, 특히 트러스 접합부의 정밀도 및 직각도를 확보할 수 있었으며, 현장접합(Metal Touch)될 기둥단면은 Mill 가공하였다. 기둥부재는 Built-Up 단면을 제작한 이후, 아래와 같은 3 단계 작업을 거쳐 가공제작을 완료하였다.

<표 1> TMCP 제조공기 Table

구분	LOT편성	출강	제어압연, 가속냉각, 열처리	GAS 절단	교정 및 보수검사, 입고	운송, 하치장 입고	고객사 인계	TOTAL
표준공기	20일	7일	15일	7일	10일	2일	1일	62일

1차 : 보강 Plate, Cover Plate 가공 및 용접

벨트 층 트러스 접합용 기둥 브라켓이 접합될 기둥웨브와 플랜지는 응력이 집중되기 때문에 각각 후판의 보강-플레이트와 Cover를 가공하여 1차적으로 용접(NDE/비파괴검사 100%)취부한다(그림 5 참조).

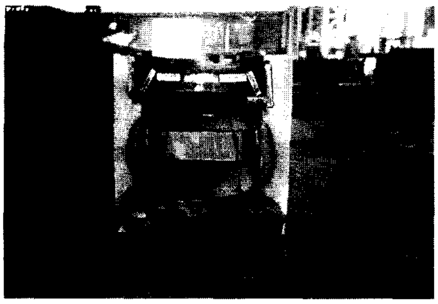
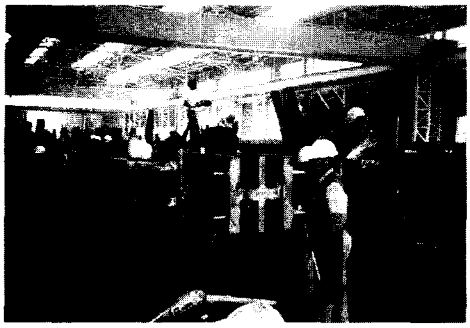


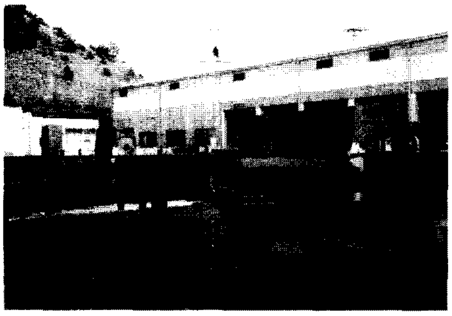
그림 5 1차 보강 Plate 조립, 용접

2차 : Bracket 가공 및 용접

벨트 트러스 및 아웃리거 트러스가 접합될 브라켓을 가공하여 접합한다. 용접변형을 최소화시킬 수 있는 용접절차가 필요하였으며, 용접전후에 설계도면에 입각한 작업점(Working Point) 및 대각치수를 실측하여 오차를 확인하였다.



<그림 6> 2차 Bracket 조립, 용접



<그림 7> Final Inspection

3차 : 기둥에 모멘트 접합되는 기준 층의 보(압연형강)를 위한 브라켓을 가공하여 기둥에 용접 시공한다.

검사 : Column Shortening 관리를 위해 기둥의 전장(全長), 브라켓 레벨 및 접합각도, 대각치수, 용접 NDE 등을 확인하여 기록 유지한다.

3.3 철골제품 현장반입

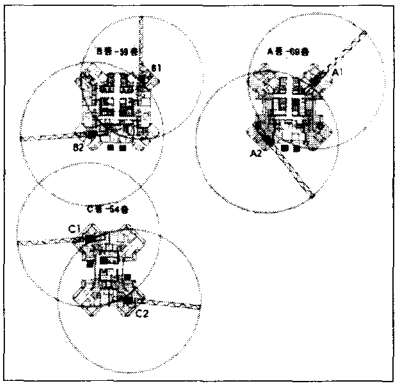
공장에서는 프로젝트 마스터 공정계획에 근거한 현장 기본공정계획에 따라 Zone 및 건물 동별 제품발송 세부공정계획을 수립하였다. 공장의 부재별 일일공장제작계획 및 일일발송계획은 현장의 일일부재반입계획과 사전(事前) 대조 검토를 통하여 현장과 공장간 긴밀한 업무협조체제를 유지하였다.

3.4 현장 설치

3.4.1 양중 계획

본 프로젝트는 그림 8과 같이 동별 2 대의 주 타워크레인(총 6 대)을 운용하였으며, 그 외의 보조 크레인도 사용되었다. 주 타워크레인 설치계획에 검토된 주안점은 아래와 같은 사항들이었다.

- 최대 양중중량
- 시간에 따른 양중능력
- 작업반경
- 타워크레인 붐 간 간격과 높이 차에 기인한 상호 간섭
- 타워크레인 붐 상의 양중반경에 따른 양중능력



<그림 8> 타워 크레인 배치도

3.4.2 설치계획

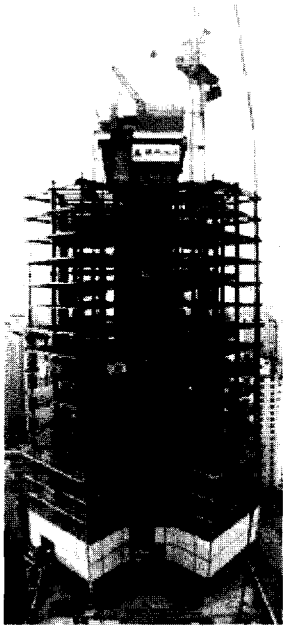
초고층 건축물공사 공정에서 철골설치공정은 Critical Path이다. 예정된 계획공기를 만족하기 위해서는 일련의 단위 철골설치 Cycle이 계획기간내에 완료되어야 한다. 이를 위하여 조립순서와 설치난이도에 대한 충분한 사전검토가 필요했으며, 타워크레인 반경에 따른 양중능력, 1 회 양중 시 부재의 종류와 부품 수량 등을 배려하여 계획하였다. 이외에, 철골부재 야적장소 및 도로교통사정 등도 설치계획에 반영되었다.

3.4.3 안전사고 방지대책

작업과정에서 발생할 수 있는 작업자 부주의에 의한 추락이나 불의의 낙하물 등에 따른 제 3 자에 대한 재해 등을 사전에 방지할 수 있는 대책이 검토되었다. 본 프로젝트의 경우 그림 9와 같이 상부 층에서는 철골공사 및 코어 콘크

리트공사가 진행되고, 하부 층에서는 기둥과 슬래브에 대한 콘크리트공사와 뿜칠 및 외벽공사가 진행되기 때문에 일반적인 건축물공사에 비하여 안전사고에 따른 재해 위험요소가 많아 1차적인 낙하물 방지 망을 설치함은 물론, 철골부재 바로 세우기 후 바로 뒤따라 Deck Panel 판개공사를 시행하여 추락에 대한 2차적 방지를 도모하고, Self Climbing Net를 설치하여 사고를 미연에 방지할 뿐만 아니라 뿜칠 등의 작업에 의한 환경오염문제를 해소할 수 있도록 하였다. 또한 사선 추락 방지 망을 설치하여 낙하물 방지 시스템을 보다 강화하였다.

공사용 비계는 작업자의 작업이동을 위한 통로용 비계와 볼트나 용접작업 및 검사를 위한 작업비계로 구분하여 철골부재 접합위치, 접합방법, 비계설치에 허용되는 공간 등을 고려하고 작업효율성과 안전성을 기할 수 있는 종합적인 비계설치계획을 수립하였다.



<그림 9> 골조 공사 현황

3.5 시공관리

3.5.1 현장용접

1) 용접절차시방서(Welding Procedure Specifications-WPSs)

현장용접관리에는 일차적으로 용접절차시방서를 확정하는 것이 중요하다. 사용강재 종류 및 두께와 용접부위에 따른 용접방법(용접자세, 용접봉의 종류와 지름, 용접전류 등), 용접결함을 방지하기 위한 예열 및 후열처리, 용접사 자격 등을 망라한 용접절차시방서를 확정하여 이에 준하여 용접시공을 관리하여야 한다.

따라서 현장용접관리는 아래와 같이 구성된다.

- 현장용접사 선정
- 용접설비(전원, 용접기, 가열장치, 방풍장치 등)
- WPs에 따른 용접절차관리

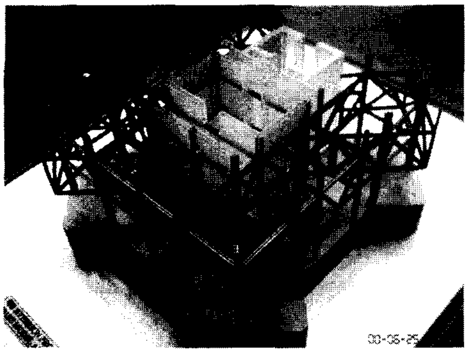
현장 용접작업 관리절차

용접전	부재맞춤검사 후 Back Plate 및 End Tab을 설치, 용접면의 청소상태 및 예열확인 후 검사시작
용접중	WPs 용접순서, 심선과 심봉, 용접전류 및 전압, 용접속도, 용접방법, 운봉법, 용접봉 슬래그 청소상태 점검
용접후	적절한 용접기준(KS,AWS,건축 표준시방서)에 의한 용접외관 검사, 비파괴 검사실시

Cast-In-Plate, 트러스 및 주기둥의 현장용접부는 40mm~80mm에 이르는 후판으로 구성되어 있기 때문에 이러한 접합부에 대한 현장용접은 공장제작의 경우와 대동소이한 용접변형, 이에 따른 잔류응력문제 및 기타 용접결함 등을 최소화할 수 있는 주도면밀한 사전대책이 요구되었다. 이러한 예측되는 문제를 최소화 할 수 있도록 단위 용접개소에 대한 용접 Path, 용접개소간 용접순서, 예열/후열처리 등 계획을 수립하여 관리하였다. 후판은 전술한 바와 같이 TMCP 강을 사용하였다. 고소 용접작업의 경우, 방풍과 안전을 위한 별도의 방풍망을 제작하여 사용함으로써 작업의 안전성과 효율성을 기하였다. 주요 구조물인 Cast-In-Plate, 트러스, 주기둥 등의 용접접합부에 대하여는 초음파탐상검사를 100%실시하였다.

3.5.2 Belt 층

초고층 건축물에 있어, 풍압과 지진력에 의한 횡력을 지지하는 요소인 아웃리거 철골구조물의 설치는 초고층 건축물공사 중 인력투입과 설치공기가 많이 소요되는 공정이다. 본 현장의 경우, RC 코어 선행공법을 택하였기 때문에 RC 코어공사 중, 코어 벽에 Cast-In-Plate를 매설하고, 이후 아웃리거 트러스를 설치하여 Cast-In-Plate에 접합 시켰다. 일반 층인 경우, 철골기둥 단위 절 당 층수는 4 개 층이며 단위기둥의 중량은 약 300 톤, 소요되는 현장용접개소는 25 개 소인데 비하여, 벨트 층에 설치되는 아웃리거 트러스 철골중량은 약 1,500 톤, 소요되는 현장용접 개소는 약 700 개 소이다. 즉, 아웃리거 층의 철골물량과 용접량은 각기 일반 층의 5 배와 30 배에 이르며, 공정 계획상 설치와 용접에 각각 3 배와 8 배의 일정이 소모되었다. 이는 예제 현장과 유사한 구조시스템의 초고층 건축물 경우, 철골공사 중 아웃리거 층 철골공사가 공정상 중요한 관리대상임을 나타낸다.



<그림 10> Belt 층 모델

아웃리거 트러스 설치와 관련하여 실시설계 팀과 공사현장 팀은 아래사항을 실시설계 단계 때부터 상호협의와 조정을 통하여 설계와 공사계획에 반영하였다.

- 타워크레인 양중능력
- 타워크레인 설치위치, 소요 양중위치, 그리고 이에 따른 크레인 허용 양중 능력
- 아웃리거 트러스 설치성
- 아웃리거 트러스 형상과 현장조립 및 설치순서
- 아웃리거 트러스 설치순서에 따른 공정과 간섭관계
- 도심지 통과 아웃리거 트러스중량과 부피
- 아웃리거 트러스 현장하역 장소
- 아웃리거 트러스 현장조립 장소

RC코어에 매설되는 Cast-In-

Plate는 높이가 3 개 층에 이르는 철골프레임으로서 RC 거푸집작업 및 철근작업과 병행하는 설치작업이기 때문에 1 차 벨트 층 작업수행 시에 시행착오를 범하는 등 어려움이 많았다. 철근 콘크리트 공사를 고려한 철골부재의 적합한 분절위치 설정, 다수의 용접사가 동시작업이 가능하도록 용접접합부 조정, 작업용 가설공사의 최소화 등의 개선을 통하여 초기공정 대비 40% 공정단축효과를 기할 수 있었으며, 아웃리거 트러스 상현재 및 사재를 지상 조립하여 양중하여 설치함으로써 크레인 양중부담을 줄이고 사재설치의 안전성을 증대시킬 수 있었다.

3.6 측량 및 계측

3.6.1. 개요

건축물 안전도와 사용성 증대를 위한 철골공사 품질관리에 있어 측량과 계측은 중요한 부문을 차지한다. 측량과 계측의 주요 대상은 기둥 수직도, 건축물 전체 기울기 및 층의 레벨 등이다. 예제의 건축물은 건축평면 중심부에 코어가 위치하고, 이를 중심으로 철골구조물이 방사형으로 배치된 평면형이기 때문에 초기부터 측량작업에 어려움이 있었다. 철골구조 전체적인 수직도는 후속되는 외벽(커튼월)공사 등 여타 공사에 직간접적인 영향을 미치는 주요한 관리 대상이다. 일반적으로 초고층 건축물공사에서는 RC 코어와 기둥간 심각한 부등축소현상 때문에 철골기둥길이를 사전 보정함은 물론 시공과정에서 구조물 레벨을 계측하여 관리하여야 한다. 측량계획 입안 초기에는 건물평면 구조형태에 따른 측정기준점 위치, 건물높이 조건에 따른 측정방법, 측정방법에 따른 측량기기의 선정, 측량방법 등을 기본적인 사항으로 검토하였다. 기둥 수직도 측량에는 측량오차를 줄이기 위해 2, 3 차 보정을 통한 오차범위한계 관리계획을 수립하였다. 69 층의 초고층(높이 253.6m)이라는 점을 감안하여, 단일의 측량기준점 대신 높이에 따른 추가 측량점을 설정하여 측량값의 정확도를 기하였다. Column Shortening 현상으로 측량점의 변위가 발생하기 때문에 건물외곽 기준점과 건물 내 기준점의 변위를 정기적으로 점검하고 매 측량 때마다 이를 반영 보정하였다.

Column Shortening 보정은 전체적인 철골공사 Activity에 어려움을 보다 가중시킨다. 기둥길이 12.8m 당 수 mm 한계오차관리 하에서 기둥기울기에 대한 높낮이 변화도 점검되는 측량/계측 작업이 수행되었다.

4. 맺음말

예제의 프로젝트는 Fast Track 공법 적용으로 인하여 각 분야별 고도의 엔지니어링이 필요하며, 초기에는 각 분야간 Coordination 과 QC에 어려움이 많았으나 조직간 부단한 노력과 협조로 이러한 초기의 난관을 극복할 수 있었으며 이제는 순조롭게 공사가 진척되고 있다. 순수한 우리 국내기술진의 설계 및 시공에 의한 초고층건축물이라는 관점에서 동 프로젝트에 관여한 기술자들은 자부심을 갖고 있다.

그러나, 기술적 검토와 준비에 제한된 시간과 기술적 경험부족 등으로 공사초기와 공사시행과정에서 겪었던 아래와 같은 문제점에 대하여는 아쉬움이 남는다.

- TMCP강 수급의 어려움
- 코어 벽과 철골 공사를 연계하는 사이클공정 준수의 어려움
- 레벨계측의 어려움
- Column Shortening 보정 값 적용의 어려움
- 짧은 기간 내 많은 철골량의 분산제작으로 인한 품질관리의 어려움

특히 초고층건축물 공사에는 각 분야별로 공사에 대한 충분한 사전 검토와 의견교환에 의한 조율을 통해 보다 완벽한 계획을 수립하여 이를 실행함으로써 시행착오를 줄임은 물론, 목표로 하는 공기준수와 예산절감 및 품질향상을 보다 효과적으로 달성할 수 있을 것으로 사료된다.