

고층 건물에서의 콘크리트 철골 합성구조의 적용



김 한 수*

1. 고층 건물에서의 합성구조

고층 건물의 구조시스템은 해당 건물의 성능과 경제성에 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 구조시스템은 사용되는 구조재료를 중심으로 철골구조시스템과 철근콘크리트구조시스템으로 크게 나눌 수 있다. 이들 구조는 고층 건물이 지어지기 시작한 이래로 각자 독자적으로 발전되어 왔으나 1970년대부터 이들 재료의 장점과 단점을 상호 보완적으로 고층 건물에 적용한 사례가 많아지게 되었다. 넓은 의미로 볼 때 모든 고층 건물은 콘크리트 또는 철골만으로 지어질 수 없으므로 합성구조라고도 볼 수 있다. 예를 들어 철골 건물에서도 슬라브에는 콘크리트가 사용되며 콘크리트 건물에서도 철근이 사용되기 때문이다. 하지만 일반적으로 합성구조라고 하면 구조용 철골과 철근콘크리트가 복합적으로 사용되는 건물을 의미한다. 이전에는 합성구조라고 하면 철골보위에 전단 콘택트를 매개체로 하는 콘크리트 슬라브를 주로 의미한 적이 있었다. 합성바닥구조라고 불리는 이 구조방식은 원래 교량에 사용하기 위

해 개발되었는데 곧 건물의 바닥판에도 사용하게 되었다. 합성바닥구조의 성공으로 여러 가지 방식의 합성구조가 개발되어 왔는데 합성보, 합성기둥, 합성가새, 합성전단벽 등이 그것이다. 이들은 보, 기둥, 가새, 바닥판과 같은 하나의 구조 요소에 철골과 콘크리트를 복합적으로 사용한 것으로 합성요소라고도 한다. 최근에 있어서 고층 건물에서의 합성구조는 구조요소 수준이 아닌 구조시스템 수준의 합성을 의미하는 경우가 많다. 즉 철골 프레임과 철근콘크리트 전단벽의 결합등을 예로 들 수 있다.

건물에서 합성구조(composite construction or composite structure)라고 하면 이와 같이 몇 가지 다른 의미로 사용될 수 있지만 이 글에서는 구조시스템 수준의 합성구조를 의미하는 것으로 하고자 한다. 고층 건물에서의 합성구조의 적용은 결국 철골구조의 장점-높은 강도, 낮은 중량, 시공 속도, 평면 구성에 있어서의 유연성-과 철근콘크리트구조의 장점-재료의 경제성, 높은 강성, 내화성능, 콘크리트의 조형성-을 긍정적으로 활용하기 위한 것이라 할 수 있다. 순수한 철골구조 또는

* 정회원 · 현대건설 기술연구소, 차장 · 공학박사 · 건축구조기술사

철근콘크리트구조와 비교할 때 건물의 경제성과 성능을 높일 수 있는 대안으로서 합성구조가 개발되고 발전되어 왔다. 고층 건물에서의 적절한 구조시스템은 건물의 용도, 입지, 규모, 형상 등의 요인에 의해서 결정된다는 원론적인 사실이 합성구조의 선정에도 마찬가지로 적용된다. 합성구조가 일반구조에 비하여 일반적으로 경제적이라고 말할 수는 없지만 일정한 제한 조건이 있을 때는 훌륭한 대안으로서 제시될 수 있는 것이다. 이 글에서는 시카고의 고층건물위원회의 1992년 가을 세미나 자료인 문헌1을 참고하여 고층 건물에서의 합성구조 적용의 장단점을 살펴보고 미국 시카고의 50층 규모의 사무실 건물인 181 웨스트 매디슨 빌딩을 사례로 삼아 구조시스템으로서 합성구조의 결정과정과 설계에 있어서 특이점을 좀 더 자세히 살펴보고자 한다.

2. 외주시스템과 코어시스템

고층 건물의 구조시스템은 여러 가지 관점에서 분류될 수 있으나 합성구조의 적용을 살펴보는 이 글에서는 횡력 저항 시스템이 건물의 외주(perimeter)에 위치하는 경우와 코어에 위치하는 경우로 나누어 보고자 한다. 횡력 저항에는 높은 강성이 요구되는 바 합성구조에서의 횡력 저항 시스템 재료는 재료의 특성상 콘크리트가 보다 적합하다고 할 수 있어 합성구조를 적용한 대부분의 건물에서는 콘크리트가 횡력 저항을 담당하고 중력 저항은 철골이 담당하고 있다. 횡력을 담당하는 철근콘크리트구조가 모멘트 프레임 또는 튜브의 형태로 외주에 있는 경우를 외주시스템, 전단벽 또는 코어의 형태로 있는 경우를 코어시스템이라고 한다. 한편, 횡력을 담당하는 철근콘크리트구조에 있어서도 철골 부재를 콘크리트로 감싸거나 강관에 콘크리트를 채우는 구조요소 수준의 합성구조가 적용되는 경우도 많이 있지만 이 경우도 역시 횡력 저항 시스템은 철근콘크리트구조로 되어 있다고 본다.

2.1 외주시스템

외주시스템은 콘크리트의 높은 강성을 이용한

모멘트저항 프레임과 철골바닥시스템의 결합을 기본 개념으로 하고 있다. 철골구조의 모멘트저항 프레임은 보-기둥 접합부에서의 모멘트접합을 기초로 하고 있어 접합부 제작에 많은 비용이 소요되는 반면 철근콘크리트구조의 경우에는 경제적으로 모멘트 프레임을 구성할 수 있다. 50층이 넘는 고층건물의 경우에는 바람에 의한 진동으로 인한 건물의 사용성이 중요한 설계상의 문제가 되므로 강성과 질량이 큰 콘크리트구조가 큰 장점이 될 수 있다. 1970년대 이후부터 보다 높은 고층 건물에 콘크리트를 적용하기 시작하였는데 이의 요인으로는 갠폼, 스텝폼과 같은 거푸집 시스템의 발달과 고강도 및 고유동성의 콘크리트의 개발을 들 수 있다.

외주시스템은 벽체에 개구부를 낸 것과 같은 정도로 조밀하게 배치된 폭넓은 기둥과 높은 층의 보로 구성된 외부 콘크리트 튜브와 간단한 철골 바닥 프레임으로 구성된다. 바닥프레임은 보통 간단한 전단 접합을 사용하여 구성되며 내부 코어 주변의 철골 기둥 또한 전단 접합을 사용하여 보와 연결된다.

외주시스템을 적용한 예로서 미국 뉴오리언즈의 52층 원 셸 스퀘어(One Shell Square) 빌딩을 들 수 있다. 허리케인과 같은 높은 풍하중에 저항하기 위하여 3m 간격의 기둥과 층 높은 보로서 콘크리트 튜브 시스템을 구성하였고 내부에는 바닥 프레임을 구성하기 위한 간단한 철

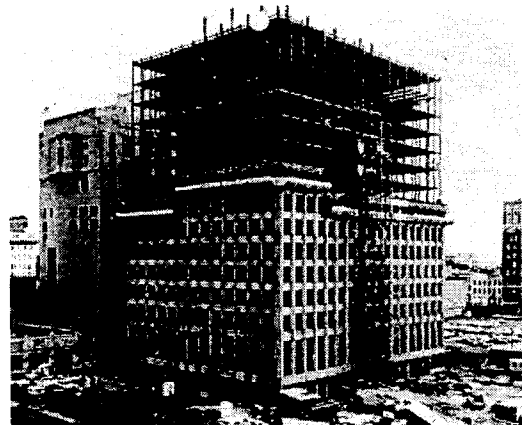
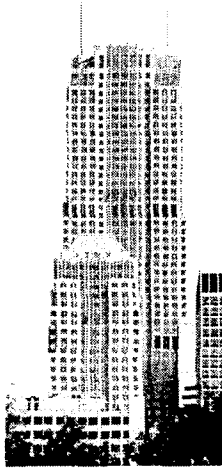
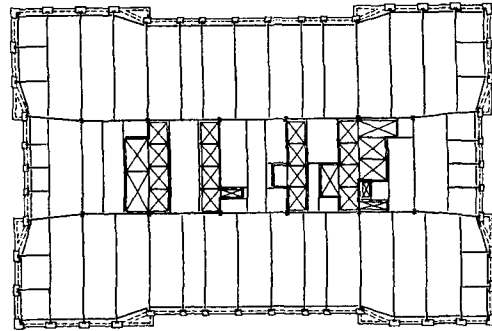


그림 1 원 셸 스퀘어 빌딩의 콘크리트 튜브의 시공



(a) 빌딩 외부 전경



(b) 구조 평면도

그림 2 시카고 AT&T 빌딩

골구조로 되어있으며 수직동선을 제공하는 코어에도 가새가 없이 간단한 철골 기둥과 보로 구성되어 있다. 시공 측면에서 볼 때 우선 철골 조립을 위한 외주부의 가벼운 철골기둥과 내부의 철골기둥을 세우고 바닥 철골 프레임을 시공한다. 이후 메탈 데크와 콘크리트 합성 바닥판을 시공하고 몇 개층의 간격을 두고 콘크리트 튜브를 시공하는 방식으로 진행된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 외부 콘크리트 튜브의 타설을 위한 거푸집 시스템으로 갱폼이 사용되고 있다. 이같은 시스템 거푸집을 이용한 시공 방법으로 윈 웰 스퀘어 빌딩은 철골구조와 유사한 속도로 시공할 수 있었다.

또 하나의 외주시스템의 예로는 시카고의 67층 건물인 AT&T 빌딩을 들 수 있다.(그림 2) 이 건물은 건축 계획적인 이유로 여러 지점에서의 수직적인 셋백이 생기는 형상을 지니고 있는데, 횡력은 외주의 철근콘크리트 튜브구조시스템으로 저항하고 있으며 내부에는 중력만을 저항하는 철골구조로 되어 있다. 시카고 AT&T 빌딩은 콘크리트 튜브로도 셋백을 구현한 특이한 예로서 셋백이 있음에도 불구하고 튜브시스템의 연속성을 유지하기 위하여 셋백이 생기는 지점에서 상부기둥과 하부기둥 사이를 브라켓을 이용하여 연결하는 방법이 사용되었다.

2.2 코어시스템

합성구조에서의 코어시스템은 횡력 저항 시스템으로서 철근콘크리트 전단벽을 건물의 중심에 두고 외주부에는 중력을 담당하는 철골구조를 적용한 경우를 말한다. 고층 건물을 설계할 때는 사용성의 이유로 수평 변위가 일정 수준 이하가 되도록 제한하는데 경험상 건물 높이의 500분의 1 이하라는 기준이 적용된다. 코어시스템으로서 횡변위 제한 조건을 만족시키기 위해서는 콘크리트 코어가 큰 강성을 지니고 있어야 하는데 고강도 콘크리트를 사용한 전단벽으로서 건물의 중심에 코어를 형성하고 평면상의 그 코어 크기가 건물 높이의 9 또는 10 분의 1을 넘지 않도록 하는 것이 이상적이다. 건물의 층수가 일정 수준을 넘게 되면 콘크리트 코어만으로 횡력에 저항하는 것이 불가능하거나 비경제적이 되며 또한 층수가 너무 낮으면 합성구조를 적용함에 따른 이점 또는 시스템 거푸집의 효율 가치가 낮아지게 된다. 코어 시스템은 층수에 있어서 25층 이상 50층 이하, 12미터 내외의 스패를 가지는 사무실 건물일 경우 훌륭한 대안이 된다고 알려져 있다.

오피스 건물을 설계할 때 주요한 목적 중의 하나는 내부 기둥을 최소화하는 것이다. 기둥이 없는 넓은 사무공간을 만들기 위하여 흔히 메탈 데

크와 경량콘크리트를 사용한 합성바닥판 구조가 사용된다. 바닥구조와 콘크리트 코어벽과의 연결은 스테드가 달린 철판을 콘크리트 벽체를 타설할 때 매설하고 이 철판에 T 모양의 철물을 용접한 후 바닥프레임을 시공할 때 보와 볼트를 이용하여 접합하는 그림 3과 같은 방법이 흔히 사용된다. 코어시스템에서의 횡력은 콘크리트 코어가 부담하므로 외주부의 기둥은 중력하중 및 부분적인 풍하중만을 부담하므로 대각 가새 또는 좁은 간격의 기둥 및 큰 보와 같은 제한에서 자유로울 수 있어 비교적 다양한 건축적 입면을 표현할 수가 있게 된다.

한편, 고층 건물의 시공 비용은 자재비와 인건비 그리고 시공 기간에 의해 주로 결정된다. 합성구조를 잘 적용함으로써 철골 물량과 부재수를 상당히 줄일 수 있으며 또한 수없이 반복 사용될 철골 접합부를 효율적으로 잘 설계함과 동시에 최신 공법의 장점을 잘 이용함으로써 철골 프레

임의 제작과 조립 시간을 상당히 줄일 수 있게 된다. 코어시스템의 경우, 콘크리트 코어는 슬립폼 또는 점프폼과 같은 시스템 거푸집을 적용함으로써 순수 철골 건물과 거의 비슷한 속도로 시공해 나갈 수 있다.

콘크리트와 철골이 결합된 합성구조는 각각의 구조재료를 효율적으로 사용한다는 장점이 있는 반면 다음과 같은 단점도 있다. 첫 번째는 철골과 콘크리트의 축방향 응력에 대한 축소량을 예측하고 보정해야 한다는 점이다. 잘 알려진 바와 같이 고층 건물에서는 축압축력의 크기에 따라 기둥 부재의 축소량이 다르게 되고 이런 축소량이 층수에 비례하여 누적되므로 설계시에 반드시 부등축소량을 고려하여야 한다. 합성구조에서는 구조적 특성이 다른 철골과 콘크리트가 동시에 사용되므로 이들 각각의 축소량을 예측하고 보정하는 것은 간단한 일이 아니며 특히 콘크리트는 건조수축 및 크리프라는 시간 종속적 변형 특성을 지

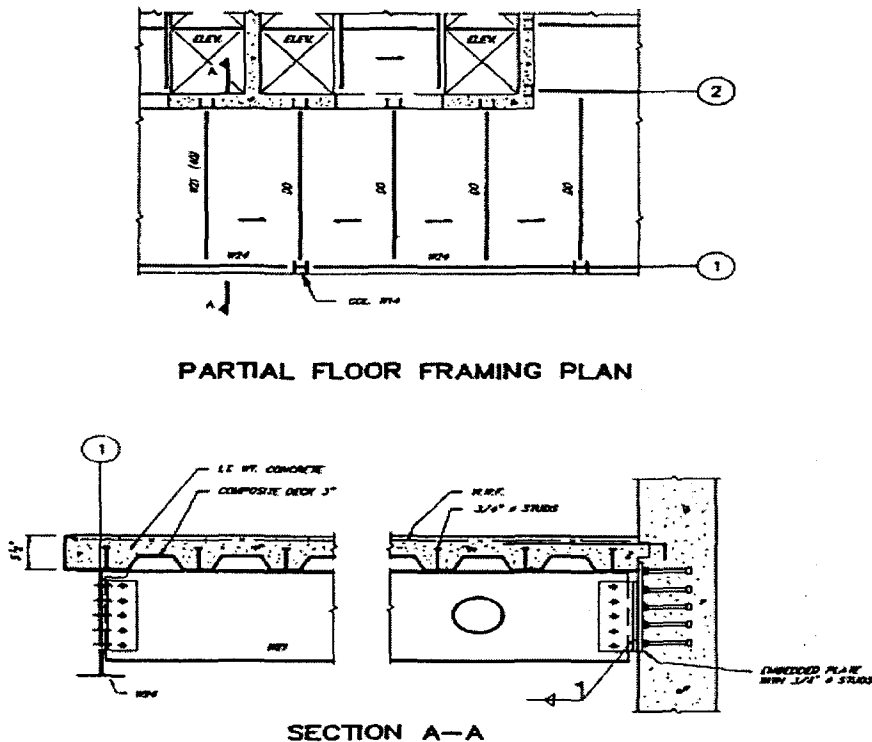


그림 3 합성바닥판과 콘크리트 코어와의 연결 상세

니고 있어 정확한 축소량 예측에 어려움이 있다. 또 하나의 문제는 철골 시공자와 콘크리트 시공자가 동시에 작업을 함으로 생기는 충돌과 간섭을 사전에 미리 조정 해결해 놓아야만 한다는 점이다. 시공의 전후 관계, 인력 및 자재의 수송 등 각각 다른 전문시공업체가 동시에 작업함에 따른 문제점을 잘 조정하여야 한다는 추가 부담이 있게 된다.

3. 사례 연구 - 181 웨스트 매디슨 빌딩

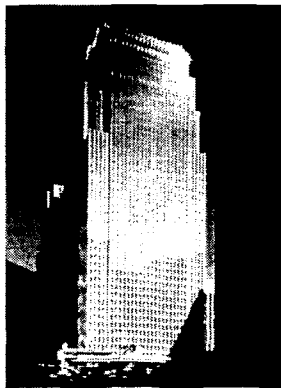
고층 건물의 구조시스템은 여러 가지 요인을 고려하여 선정된다. 특히 합성구조의 경우에는 보다 고려할 사항이 많아지는데 합성구조로 코어시스템을 적용한 시카고의 181 웨스트 매디슨 빌딩의 예를 보다 자세히 살펴봄으로써 고층 건물에서의 합성 구조의 적용 과정과 그의 장단점을 구체적으로 알아 보고자 한다.

1990년에 완공된 181 웨스트 매디슨 빌딩은 미국 시카고에 위치한 50층, 높이 207미터 규모의 사무실 건물이며 고층 건물의 설계로 유명한 시저 펠리(Cesar Pelli)가 시카고에서의 데뷔작으로 건축 설계를 담당하였고 구조 설계는 시카고의 CBM이 담당하였다. 건축주는 정방형의 대지 위에 랜드마크적인 고급 사무실 건물인 동시에 사무실 임대 목적으로 13미터 내외의 기둥없는 내부 공간을 원하였다. 완공된 건물은

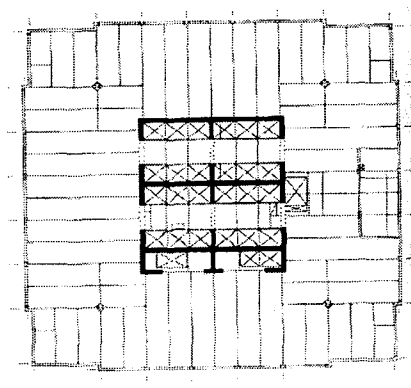
그림 4와 같이 정방형에 가까운 평면에 상층부에는 몇 군데의 셋백을 두었으며 1920년대의 마천루를 연상시키는 최상층부의 외관을 가지고 있다.

설계 초기 단계에서는 다양한 건축 계획적인 대안이 제시되고 평가되었는데 수직적인 강조를 위하여 평면상 코너 부분을 약간 안쪽으로 들이고 상층부에서는 이 코너 부분을 다단계로 셋백시키는 안이 선정되었다. 이 형태를 구현할 수 있는 구조시스템으로 외주시스템도 불가능하지는 않지만 외주부에 철골구조를 가지는 코어시스템이 보다 적합하게 보였다. 건물 전체의 매스와 더불어 고층 건물에서 중요한 또 하나의 건축 계획적 요소는 건물 표면을 통한 외부적인 표현 문제이다. 이 건물에서는 수직적인 리듬을 표현하기 위하여 간격 1.5미터, 폭 50센티의 외부 뼈대와 상층부의 다단계 셋백이 고안되었다. 외부 뼈대로 충분히 가릴 수 있을 정도의 외주부의 기둥 크기와 셋백의 간편한 구현을 위하여 외주시스템보다는 코어시스템 쪽이 선호되었다.

구조 계획 단계에서는 총 15개의 구조적 대안이 검토되었는데 이들은 크게 철골구조, 콘크리트 구조 및 합성구조로 나눌 수 있다. 순수 콘크리트 구조는 콘크리트 코어와 포스트 텐션을 이용한 일방향 슬래브의 콘크리트 바닥구조를 적용한 것이며 합성구조는 콘크리트 코어와 철골 바닥 프레임 적용한 것이었다. 각각의 설계 대안들은



(a) 빌딩 외부 전경



(b) 구조 평면도

그림 4 시카고 181 웨스트 매디슨 빌딩

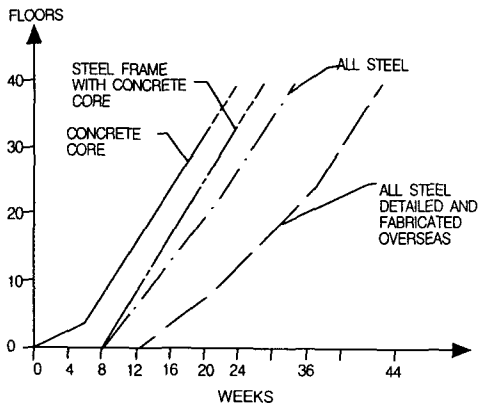


그림 5 콘크리트 코어와 철골 프레임의 합성구조와 순수 철골구조의 골조 공사 기간 비교

시공방법, 자재량, 설비공사의 영향, 내부 기둥 수 및 간격, 외부 마감 공사 방법 및 비용, 공사 기간, 기초 비용, 동절기 공사 비용 등과 같은 관점에서 기술적, 경제적 분석이 이루어졌다. 그중 최종적으로 선정된 안은 콘크리트 코어에 메탈 데크와 경량 콘크리트를 이용한 바닥 시스템으로 비교적 작은 철골량(13.2 lb/ft²)이 소요되는 것이었다. 선정된 코어시스템 안은 순수 철골 구조안에 비하여 3백만불이 절감되는 것으로 분석되었으며 순수 콘크리트구조보다 공사비에 있어서 6십만불, 공사 기간에 있어서는 3개월이 빠른 것으로

평가되었다. 구조적인 관점에서의 선정기준으로 저렴한 공사비, 6미터의 기둥 간격 및 작은 기둥 크기 그리고 상부층 및 로비층에서의 셋백 구현이 간단하다는 점등이 고려되었다. 그림 5와 표 1은 설계 초기 단계에서의 공사기간과 비용을 분석한 결과를 보여주고 있다.

성공적인 코어시스템 합성구조의 시공을 위하여 대표적으로 다음과 같은 점이 고려되었다. 우선 콘크리트 코어는 거푸집의 운용 효율을 위하여 고강도 콘크리트를 이용하여 전층에 걸쳐 일정한 두께를 유지하도록 하였다. 저층부에는 770kg/cm²의 고강도 콘크리트가 사용되었으며 상층부에는 280kg/cm²의 콘크리트가 사용되었다. 철근의 현장 조립의 편의를 위해 기계이음(mechanical coupler)을 사용하지 않는 단순한 이음이 되도록 고강도 철근을 이용하여 철근비가 조정되었다. 콘크리트 코어의 개구부와 매설되는 철물들은 시공 오차를 고려하여 시공되었으며 특히 콘크리트 코어와 철골의 부등 축소량을 보정하기 위하여 그림 6과 같이 철골 및 콘크리트의 층별 높이를 달리하여 시공되었다.

콘크리트 코어의 시공을 위하여 일반적으로 거푸집 시스템은 슬립폼 갱폼 점프폼의 3가지가 주로 사용되는데, 181 웨스트 매디슨 빌딩의 시공에는 크레인의 사용여부, 층당 회전기간, 철골공사에의 영향 정도 등을 비롯한 몇 가지 사항들을 고려하여

표 1 합성구조와 순수 철골구조의 골조 공사 비용 비교

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL FRAME (50 LEVELS)				
COMPONENTS	STRUCTURAL STEEL		STRUCTURAL STEEL + CONCRETE CORE	
	QUANTITY LB/SQ. FT.	COST \$/GSF	QUANTITY LB/SQ. FT.	COST \$/GSF
STRUCTURAL STEEL	24.00	15.60	12.50	8.13
3" COMPOSITE DECK + 2 1/2" LWT. CONCRETE		4.20		4.10
SHEAR STUDS	0.20	0.35	0.18	0.32
SPRAY FIRE PROOFING		1.20		1.00
REINFORCED CONCRETE CORE		-		4.50
PREMIUM ON FOUNDATION		-		0.20
PREMIUM ON INTERIOR FINISHES (DRY WALL)		0.20		
TOTAL COSTS		21.55		18.25

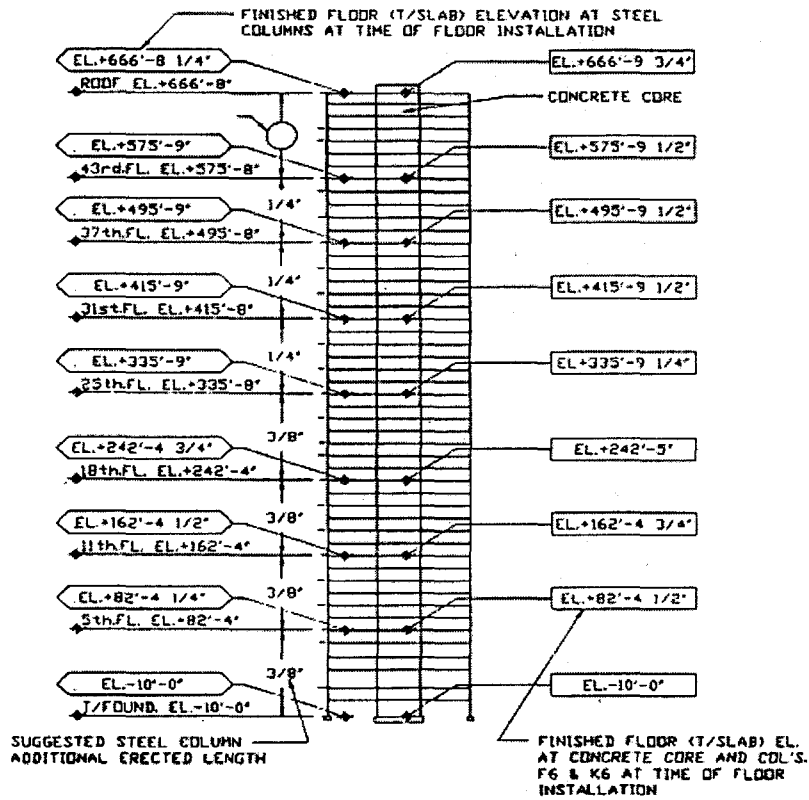


그림 6 부등축소량을 고려한 콘크리트 코어와 철골 프레임의 시공 보정

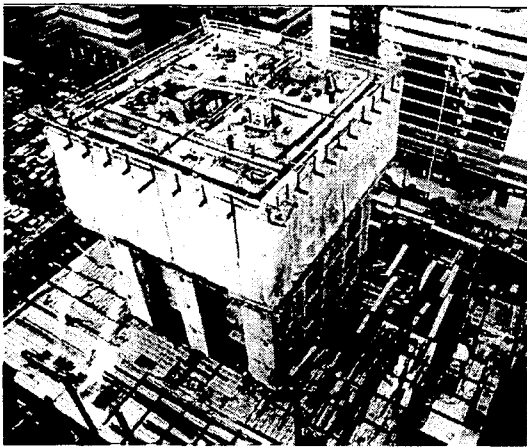


그림 7 점프폼을 이용한 콘크리트 공사용 플랫폼

그림 7과 같이 콘크리트 공사를 위한 플랫폼이 유압식 잭에 의해 이동되는 점프폼이 채택되었다.

4. 맺음말

고층 건물에서 적용된 콘크리트와 철골의 합성 구조에 대하여 대표적인 구조 방식과 그 사례에 대하여 살펴보았다. 고층 건물의 구조시스템은 여러 가지 요인에 의하여 결정되며 일정한 조건이 충족될 때, 철골과 콘크리트의 장점을 잘 조화시킨 합성구조는 고층 건물에 있어서 효율적이며 경제적인 구조시스템이 될 수 있음을 알 수 있었다. 한편 합성구조가 성공적으로 적용되기 위해서는 보다 치밀한 설계 및 검토가 요구되며 고층 건물 건설에 관련된 전문가들, 예컨대 건축가, 구조기술자, 설비기술자, 시공관리자 및 시공자들의 설계 초기 단계부터의 협력이 중요하다는 사실을 알 수 있었다. 또한 철골과 콘크리트의 축소량을 예측하여 부등축소량을 최소화하도록 한다든지

철골과 콘크리트의 연결 상세를 개발한다든지 시공 순서를 결정한다든지 등의 사전 시공(preconstruction) 단계의 노력이 합성구조의 성공을 가름한다고 볼 수 있다.

앞으로의 고층 건물은 진보된 구조 재료를 효율적으로 활용하는 기술들을 요구할 것이며, 철골과 콘크리트에 대한 구조 재료적 연구 개발과 이를 활용한 구조해석 기술 및 공법 등에 힘입어 보다 창조적인 합성구조가 고층 건물에 적용될 것으로 확신한다.

참 고 문 헌

1. The Chicago Committee on High Rise Building, *The Rationale for the Use of Composite Concrete and Steel Design*, Report No. 13, 1993
2. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, *Structural Systems for Tall Buildings*, McGrawHill, 1995
3. Bungale S. Taranath, *Steel, Concrete, & Composite Design of Tall Buildings 2nd Ed.*, McGrawHill, 1998
4. 김한수, "초고층 건물에서 셋백의 구조적 구현 방법", 대한건축학회논문집-구조계, 제14권8호, pp. 3-10, 1998 