

LG 강남타워 및 아트센타의 구조설계

전봉수*, Stanton Korista**, Ahmad Abdelrazaq***

1. 구조 방식

이 건물의 주요 구조재료로 지상의 타워는 강재를, 하부구조는 철근콘크리트를 사용하였다. 기둥의 간격은 동서방향으로 9m, 남북방향으로 11.75-9.5-11.75m이다. 하부구조의 철근콘크리트 공사와 타워 상부구조의 철골공사를 용이하게 하기 위하여 지하에서 지상 1층의 기둥을 합성기둥으로 처리하였다. 건축적인 형태와 9m 간격의 외각기둥 배치로 인하여 튜블러구조형식을 채택하지 않았다. 비대칭코어의 깊이가 9.5m로 제한되었기 때문에 건물의 유효깊이를 최대한 활용해야 할 필요가 있었다.

1.1 횡력저항기구

타워의 횡력저항기구는 남북방향으로 중심축일치브레이스(concentric bracing)를 두고, 동서방향으로 니이브레이스(knee bracing)와 모멘트저항골조를 복합한 이중구조로 하여 풍하중과 지진하중에 저항하도록 하였다. 중심축일치브레이스와 니이-브레이스는 코어에 두었다. 건축적인 계획에 의해 코어의 깊이가 9.5m로 되었으며, 건

물의 중량 그리고 풍하중과 지진하중의 작용점에 대하여 비대칭평면이 되었다. 코어의 깊이에 대한 제한, 건물의 기하학적 중심과 코어의 편심으로 인하여, 타워의 동쪽과 서쪽 입면에 대규모의 외부브레이스를 도입하였다. 서쪽 경사입면의 외부 11.75m의 스펜에 4개 층을 잇는 중심축일치브레이스를 두어 각각의 층에 있는 층이 큰 용접조립보에 연속적으로 연결되도록 하게 하였다. 이렇게 외벽면에 매 4개 층을 연결한 중심축일치브레이스구조를 됴으로써, 건물의 폭을 효과적으로 극대화시킬 수 있다. 이와 유사하게, 동쪽입면에 2개 층의 중심축일치브레이스 또한 용접보에 연결된다. 코어 브레이스구조와 동서쪽의 중심축일치 브레이스구조를 함께 두어 재료의 효율을 극대화하도록 하였다. 코어 브레이스와 외부브레이스를 함께 두어 다음과 같은 구조적인 이점을 갖게 되었다.

- ① 모든 기둥이 횡력에 대하여 저항할 수 있다.
- ② 기둥은 수직력만으로 설계하며, 횡력으로 인한 구조보강이 별도로 필요하지 않다.
- ③ 외부 브레이스구조와 모멘트 저항골조는 건물의 비틀림강성을 증가시킴으로서, 수평진동모

* 정회원·(주)전우구조 대표이사, 본학회 부회장

** SOM사 구조파트너

*** SOM사 LG 강남타워 담당자

* LG 강남타워 및 아트센타의 구조설계는 기본설계를 미국의 에스오우엠사(SOM), 상세설계를 (주)전우구조가 맡았다.

위 3인의 공동필자는 이 글을 건축주의 승인하에 미국 CTBUH 주최 제5차 초고층건물 국제학술회의 및 ASCE의 구조세미나에 타워와 아트센타를 분리하여 각각 제출한 바 있는데, 여기에 두 편을 한데 모아 번역하여 소개한다.



(a) 건축모델



(b) 골조공사 완료

그림 1 LG 강남타워와 아트센터

드 ($T_1=5.1\text{sec}$, $T_2=4.5\text{sec}$)와 비틀림진동모드 ($T_3=2.5\text{sec}$)를 현저하게 구분할 수 있었다.

그림 2는 타워의 기초부터 최상부까지의 상부 구조와 기초 주변의 벽체 그리고 철근콘크리트 코어벽체시스템을 나타내는 3차원 유한요소해석모델이다. 이 해석모델로 정적해석, 동적주기해석(dynamic frequency analysis), 동적응답스펙트럼해석(dynamic response spectrum analysis) 및 P- Δ 효과에 대한 해석을 하였다.

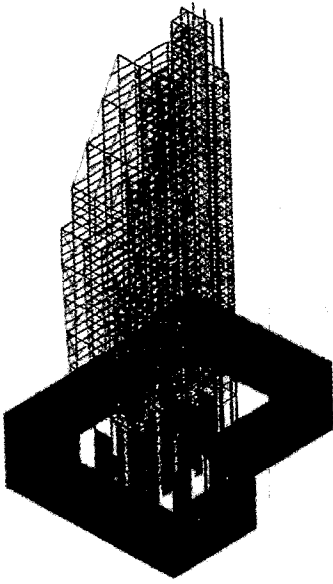
벨트트러스(belt truss)와 아우트리거트러스(outrigger truss)로 된 구조형식을 도입하여 건물층의 최대한의 활용을 시도하였으나, 코어의 깊이가 9.5m로 제한되어 있어, 건축계획과 설계 측면에서 이러한 형식을 수용할 수 없었다.

1.2 바닥구조

바닥구조는 일반 H형강보(축 350~450mm)가 3m 간격으로 배치되고 그 상부에 스펠 3m의 합성메탈데크를 얹어, 바닥판과 보가 합성작용하도록 하였다. 합성 슬래브구조는 75mm의 메탈데크에 75mm의 덧칩 콘크리트로 되어 있다. 전원과 통신시설을 사무실 바닥에 배치할 수 있도록 건축마감올림바닥(raised floor system)을 구조슬래브 위에 추가로 놓도록 하였다.

1.3 기초 및 지하구조

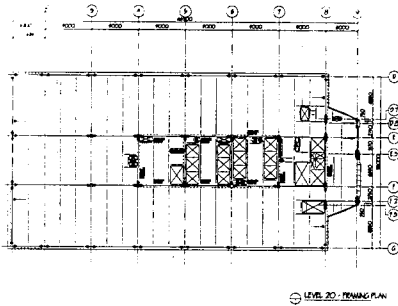
이 건물은 지하 약 35m의 경암반에 놓이게 되어, 기초를 독립기초, 연속기초 및 복합기초로 하였다. 건물하부의 경암반의 허용지내력은 침하량 12mm를 기준으로 400t/m^2 이었다. 타워의 횡력저항요소인 기초구조는 그림 3과 같이 각각의 독립기초를 지중보와 긴결하도록 하였다. 지하 주변의 철근콘크리트 지하외벽(foundation wall)은 흙막이벽(soil retention system)과 물막이벽으로 겸용하도록 하였다. 지하수위가 지표면과 거의 같기 때문에, 지하 최하층의 철근콘크리트 땅바닥슬래브(slab-on-grade, $t=500\text{mm}$)에 상당히 높은 수압이 발생한다. 그래서, 매우 높은 수압에 대비한 설계가 되지 않기 위하여 최하층에 지하 배수형식(subsoil drainage system)을 채택하였



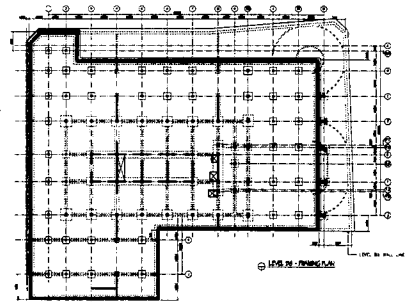
(a) 3-D 유한요소 모델

다. 지하외벽은 토압과 수압에 대한 영향을 고려하여 설계하였다.

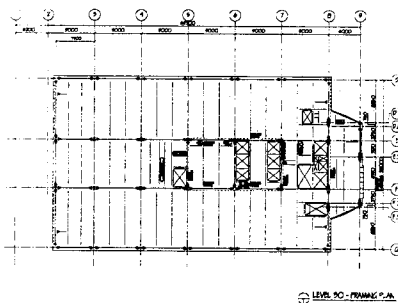
지하층 바닥구조형식으로 다음과 같은 다섯 가지의 구조형식을 고려하였는데, ① 2방향 플랫플레이트구조, ② 2방향 플랫슬래브구조, ③ 연속광폭보구조(continuous wide drop beam system), ④ 보 및 1방향 슬래브구조, ⑤ 보 및 2방향 슬래브구조 등이다. 그러나, 횡방향의 토압과 수압으로 인한 수직력과 축력의 복합적인 효과를 고려하여 보 및 2방향 슬래브구조를 선택하였다(그림 3). 지하구조의 장기 크리이프를 감소하기 위하여 상·하부 철근의 최소 50%를 슬래브와 보에 연결토록 하였다. 설계 당시에는 대지의 남쪽에 접한 이웃 건물이 계획·구상 단계였으므로 이 건물과 동시에 건설할 수 있다는 잠재성 때문에 하부구조는 다양한 시공 순서를 가산하여 설계하였다. 그



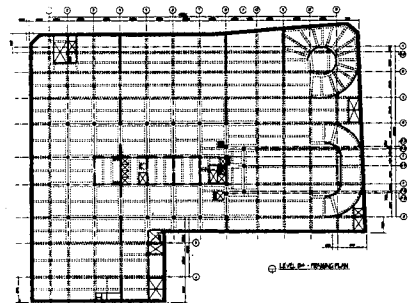
(b) 저층부 골조 평면도



(a) 기초 평면도



(c) 상층부 골조 평면도



(b) 지하 골조 평면도

그림 2 사무동의 구조도

그림 3 기초 및 지하구조

래서, 횡방향의 토압과 수압으로 인한 미끄럼 및 전도력 등에 대해서도 검토하였다. 토압과 수압으로 인한 횡력 전달메커니즘이 지하슬래브를 통하여 지하외벽, 전단벽과 램프벽에서 이루어진다. 토압에 대한 횡력은 ① 암반과 지하외벽과의 마찰, ② 기초의 수동 토압, ③ 암반과 땅바닥슬래브와의 마찰 등에 단계로 기초까지 전달된다.

하부구조의 시공시 국내의 일반현장에서 흔히 쓰고 있는 임시흙막이공법을 사용하였는데, 그 시공순서는 ① 현장 안으로 물의 흐름을 막기 위하여 대지 전 둘레의 연암층에 시멘트벽체를 설치, ② 지표면에서 굴착 면의 3m 깊이까지 H형강말뚝(steel soldier H-pile)을 1.5m 간격으로 설치, ③ 기초면까지 굴착이 이루어지면서, H형강띠장(steel waler H-beam)과 어스앵커(earth anchor)를 2.5m 간격으로 배치하여 H형강말뚝을 지지, ④ 말뚝과 띠장사이에 목재 횡널말뚝(wood lagging system)을 삽입, ⑤ 기초면 까지 굴착이 이루어지면, 이 영구 지하벽체(permanent foundation wall)와 타워의 기초부 그리고 상부공사를 진행하는 방법이다.

2. 풍하중과 풍동실험

건물높이에 따른 풍하중의 크기와 수평변위의 제한은 국내규준에 따랐다. 설계풍하중은 10분당 평균속도 35m/sec, 노풍도 "B", 그리고 중요도계수 1.0으로 하였다. 기본풍압은 국내규준에서 정한 것을 사용하였고, 노풍도 "B"일 경우 건물 정상부의 수평변위를 H/500이내로 하였다. 풍동실험은 캐나다 온타리오주의 런던시소재, 웨스턴온타리오대학(University of Western Ontario) 내 대기경계층풍동실험연구소(Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory)의뢰하여 ① 모형실험(proximity model study), ② 보행자바람 영향실험(pedestrian wind study), ③ 힘균형실험(force balance study), ④ 외벽 마감재 풍압실험(exterior cladding pressure study) 등의 실험을 하였다. 힘균형실험은 주로 건물의 설계하중과 건물높이에 따른 하중의 분포를 확인하기 위해

실시하며, 이 실험의 가장 중요한 목적인 높이에 따른 건물의 가속도를 평가할 수 있었다. 국내규준에 따른 노풍도 "A", "B"의 풍하중과 ASCE-93, 그리고 풍동실험에 대한 비교는 그림 4에 나타냈으며, 이것은 풍동실험에 대한 전단력이 국내규준에 의한 값보다 훨씬 작았음을 나타낸다. 힘균형실험은 동-서와 남-북 방향으로 각각 5초와 4.5초의 병진 진동모드(translation vibration mode)와 2.5초의 비틀림 진동모드를 기본으로 한다. 힘균형실험은 건물의 중심과 모서리의 최대 가속도가 각각 20mg와 22mg이며, 이것은 국제적으로 인정된 주기 10년, 가속도 25mg에 밀도는 값이다. 캐나다 건축규준(National Building Code of Canada)에서 제시한 방법으로 건물 가

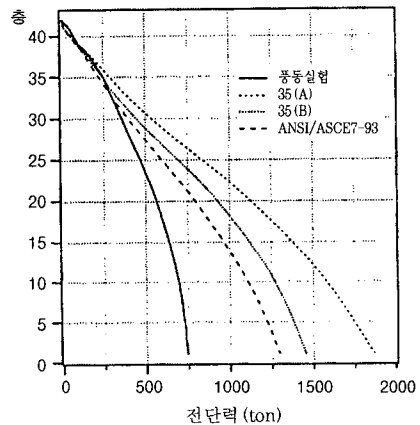
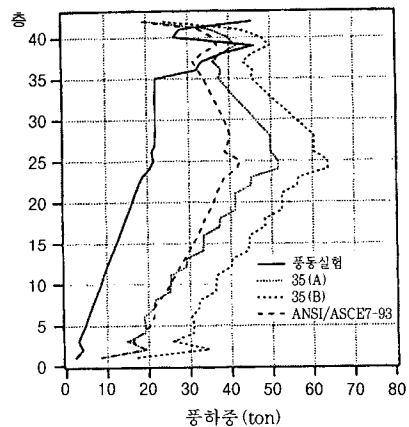


그림 4 건물높이에 따른 풍하중의 분포 비교

속도를 약산해 본 결과, 힘균형 풍동실험에서 예측한 가속도와 상당히 유사하게 나타났다.

3. 내진설계

서울은 미국의 UBC(Uniform Building Code)의 지진구역 2A와 비슷한, 보통 지진구역(moderate zone)에 속한다. 지진하중은 ① 지역계수(seismic zone coefficient), $A_u=0.12$, ② 중요도계수(occupancy importance factor), $I=1$, ③ 지반계수(soil profile coefficient), $S=1.0$, ④ 반응수정계수(building system coefficient), $R_w=6.0$ 등의 계수를 채용하여 산정한다. 국내규준과 UBC의 응답스펙트럼(response spectrum)곡선을 지진해석에 사용하였다. 응답스펙트럼해석에 의한 건물의 밀면전단력(base shear)이 풍하중에 의한 밀면전단력보다 낮은 값을 나타내었다. 풍하중과 지진하중에 의한 누가밀면전단력에 대한 비교를 그림 5에 나타내었다. 응답스펙트럼과 부재설계에 대하여 검토한 결과, 횡력저항구조는 풍하중에 의해 지배됨을 알 수 있었다.

4. 접합부설계 및 기둥단면

그림 6의 서쪽 외각부 브레이스 구조는, 외부의 경사 브레이스가 중간기둥에서 외부기둥에 전달할 수 있도록 하며, 건물의 횡-전단력을 기초에 전달하도록 하는 구조이다. 이는 각각의 4개 층의 중간기둥에서 모서리기둥에 전달함으로써 건물의 최대유효층에 대한 강재의 활용도를 최대로 할 수 있는 효과적인 방법이 되었다. 기둥, 보 및 브레이스 등 강구조의 부재는 한계상태설계법(또는 하중저항계수설계법, LRFD)에 의해 단면을 결정하였다. 기둥-보-브레이스와의 강접부위는 공장에서 제작하고 검사하였다. 기둥-보-브레이스의 조립체는 그림 6에서 보는 것과 같이 수평보를 볼트로 조인다. 접합부를 부재의 존재용력에 따라 설계하였다면 접합부의 볼트 및 관련 강판 등을 현저히 절약할 수 있었으나, 실제로 모든 횡력저항요소를 각 부재의 저항내력으로 시공하는 국내의 관행을 무시할 수 없었다.

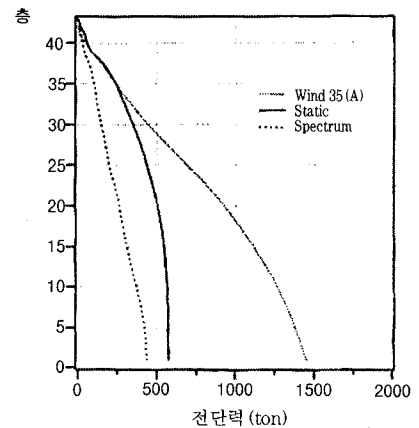
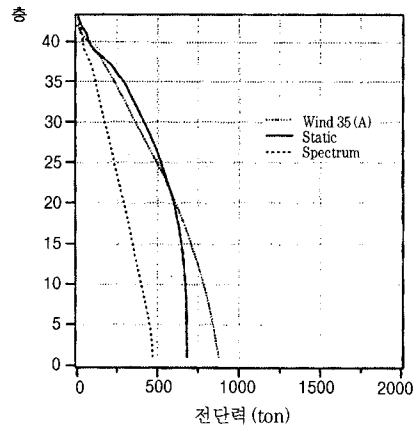
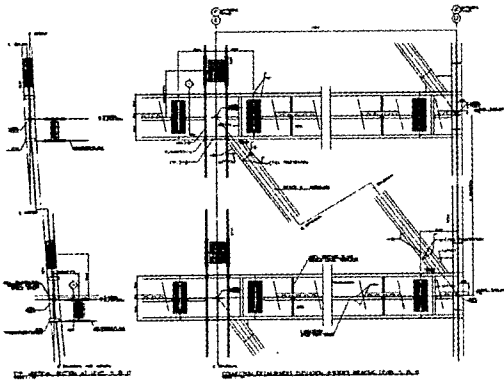


그림 5 바람 및 지진에 대한 누가밀면전단력 비교

조립강재기둥은 철판의 두께(최대125mm)를 최소화하기 위하여, 극후 H형조립기둥을 두께 120mm 이하의 철판을 조립용접한 상자형기둥으로 대체되었다. 상자형기둥은 구조적으로 훨씬 기능적이고 효과적이지만, 보-기둥 접합부에서 보 플랜지의 연속성을 위해서는 일렉트로-슬래그용접(electro-slag welding)을 하게 되어, 제작단가와 철판의 연속성 검사비가 증가되는 소지가 있었다.

5. 아트센터의 소음진동차단 및 지압패드와 하중전달체계

타워의 동쪽에 접한 아트홀은 다목적공연장으로 진동과 소음차단이 필수적이다. 현장조사 결



(a) 다층브레이스의 접합부 상세도



(b) 접합부 사진

그림 6 다층브레이스

과, 지하철 2호선과 건물의 기초지반이 동일한 암반대에 위치함에 따라 이를 통하여 전달되는 전동차의 진동과 소음, 건물내 주차설비 등의 작동에 따른 진동음 등이 건물의 골조를 통하여 공연장 내부로 전달되어 전문공연장의 허용기준치를 초과하였다. 따라서, 소음진동차단 및 지압패드(isolation bearing pad)를 사용하여, 공연장의 골조(상부구조)와, 소음 및 진동이 전달되는 하부구조를 분리하는 것이 불가피했다.

천연고무를 쓴 소음진동차단 및 지압패드를 지

상 3층의 기둥중간에 수직과 수평으로 설치하여, 건물의 구조를 하부에 철근콘크리트구조와 공연장에 철골구조의 2개 구조시스템으로 수평면을 따라 수직적으로 분리하였다(그림 7).

소음진동차단 및 지압패드는 진동음을 차단하는 기능뿐만 아니라 건물의 하중전달구조체로서의 역할도 필요하다. 소음진동차단 및 지압패드의 설계는 음향설계전문회사(WILSON, IHRIG & ASSOCIATES, INC.)의 자문에 따라 12~15Hz의 고유진동주기를 가지고 100년 이상 동안 그 기능을 유지하도록 하였다. 이는 패드(pad)의 교체가 불가능하므로 건물의 수명이 다할 때까지 작동되도록 하였으며, 패드 설계사에서 제시한 패드의 강성을 구조해석에 반영하였다.

기둥하부에 설치되는 수직 소음진동차단 및 지

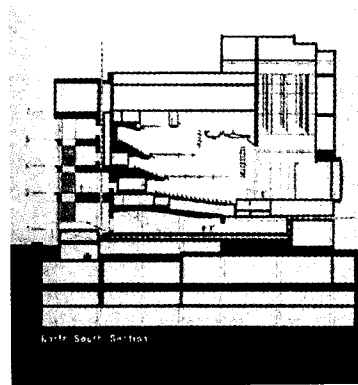
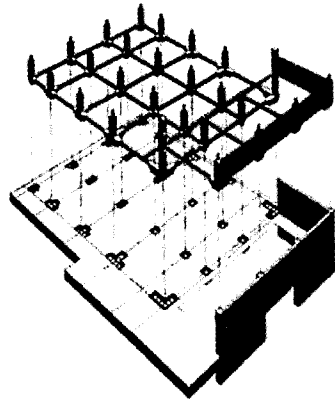


그림 7 소음진동차단 및 지압패드 설치의 개념도

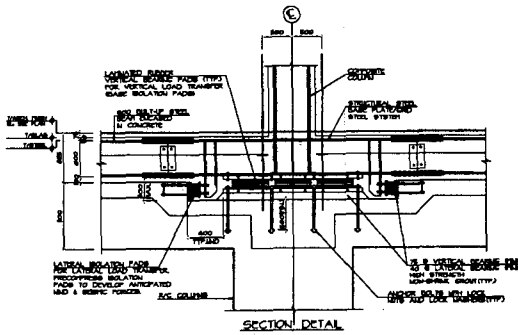


그림 8 소음진동차단 및 지압패드 설치의 상세도

압패드는 음향적인 역할 외에 구조체로서 수직하중을 전달하는 역할을 하고 있으며, 크기는 585×585×159mm(폭×너비×두께)로 일정하나, 기둥 축력의 차이에 따라 패드에 강성의 차이를 두어 1개의 기둥에 1~6개씩 설치하였다. 철골기둥과 패드사이에 철판조합물(steel base assembly, 그림 8)을 두어 각 패드로 연직하중을 균일하게 분배하고 압축력에 의한 패드의 수축량을 전 기둥에 균일하게 유지하게 하였으며, 해석결과 예측된 10mm의 수축량을 시공시 보정하였다.

기둥측면에 설치된 수평 소음진동차단 및 지압패드는 지진 및 풍하중에 대하여 저항하도록 되어 있고 크기가 203×432×115mm(폭×너비×두

께)이며 패드에 400kN의 프리스트레스를 가하여 7mm의 수축이 생기도록 함으로써 지진 및 풍하중이 작용할 경우 상쇄되도록 하였다.

소음진동차단 및 지압패드는 재료의 특성상 시공순서에 따라 수축이 발생하므로 구조해석조건과 부합되는 시공순서에 대한 특기시방서 작성과 현장의 실제 공정에 따른 관리가 설계 외에 중요한 요건이다.

6. 결 론

타워의 형태가 매우 특이하고 비대칭적임에도 불구하고, 외부의 다층브레이스(multi-story bracing system), 비대칭 코어브레이스구조 및 모멘트저항골조 등의 혼합구조를 선택하여 효과적이고 강한 횡력저항구조가 되었다. 아트센터의 기둥 주각에 설치한 소음진동차단 및 지압패드는 그 기능을 충분히 발휘하게 될 것이다. 이로써, 융통성 있고 효과적인 사무공간, 대지의 최대 효율성과 쾌적함, 음악과 연주 등을 완벽한 조건에서 감상할 수 있는 미래 문화공간 창조, 효과적인 최첨단 건물구조의 탄생, 그리고 가장 중요한 다가오는 이천년대에 대비한, 세계적으로 기념비적인 건축물을 건립한다는 설계목적에 합리적인 구조설계로 충족시킬 수 있었다고 믿는다. 