

세계무역센터(WTC)붕괴와 초고층건물에 있어 콘크리트 구조의 가능성

김 종 훈(한미파슨스(주) 대표이사)

1. 서 론

건물의 고층화에 대한 인간의 욕구는 고대로부터 지금까지 계속되어 오고 있다. 고대 피라미드 시대에는 숭배하는 신(神)에게 더 가까이 다가 간다는 의미로 해석되어 권력의 상징으로 받아들여졌지만, 오늘날에 와서는 경제력과 기술력의 상징으로 인식되어 경쟁적으로 초고층 건물이 세워지고 있다.

최근 비행기 테러로 붕괴된 뉴욕의 월드트레이드센터로 인해 일반인들 사이에도 초고층 건물에 대한 관심이 고조되고 있고, 이에 대해 막연한 불안감을 느끼는 사람들 또한 적지 않을 것으로 보인다. 그러나 이러한 사회 일각의 우려에도 불구하고 세계적인 초고층화 추세는 향후에도 계속될 수밖에 없을 것으로 전망된다. 초고층 건축물은 당대의 첨단 건설기술이 총체적으로 집약된 결정체일 뿐만 아니라, 한 국가의 상징물 또는 경제성장의 척도로 인식되는 경향이 강하기 때문이다.

최근 국내에서도 50~60층이 넘는 초고층 주거용 건축물들이 속속 지어지면서 도시의 스카이라인을 변모시키고 있다. 지금 추세로 본다면 내년 하반기에는 60층 이상에서 실제로 거주하는 세대가 다수 생기게 될 것이고, 이는 곧 새로운 주거환경과 양식의 태동을 의미하는 중요한 전환점이 될 것으로 보인다.

본 고에서는 최근 세계무역센터 붕괴 원인에 대한 분석을 통하여 초고층건물의 구조적 특성을 살펴보고, 초고층건물에 있어서 콘크리트 구조의 적용성 향상 및 개선방안을 제시해 보고자 한다.

2 세계무역센터의 붕괴 원인

지난 9월 11일 총수로는 110층, 건물 높이 417미터로 과거 한때 세계 최고를 자랑하였었고, 붕괴 직전에는 미국 내에서는 시어스타워(Sears Tower)에 이어 2위, 전세계의 초고층 건물 순위로도 4위에 해당되었던, 그리고 무엇보다도 미국이 주도하는 자본주의의 표상으로 인식되었던 뉴욕의 세계무역센터(WTC)가 비행기 충돌이라는 전대미문의 테러로 말미암아 붕괴되었다. 그것도 폭파공법에 의한 의도된 파괴처럼 건물 전체가 일순간에 철저히 무너져 내렸다. 이 세기적인 사건을 지켜 본 일반인들은 단순히 강하고 튼튼하다고 인식되어 온 초고층 건물이 어쩌면 저렇게 힘없이 무너져 내릴 수 있을까? 하고 의아하게 생각했겠지만, 건설산업에 종사하는 사람들이나 구조 기술자들에게는 새로운 과제가 주어지는 순간이기도 했다.

즉, 건축물, 특히 초고층 건물에 있어 외부의 충격충돌이나 화재로부터 구조적 안전성을 확보하고, 불의의 재난시에 인명의 손실을 최소화할 수 있는 새로운 수단이 필요함은 물론, 그 접근방식에 있어서도 기존의 인식과는 전혀 다른 새로운 개념의 정립을 요구 받은 것이다.

그러면 WTC 붕괴의 주된 원인은 무엇이었을까? 보다 정확한 원인에 대해서는 앞으로 많은 자료를 기초로 각 분야별 전문가들의 검토 과정을 거쳐 결론이 내려지겠지만, 지금까지 밝혀진 자료들을 종합해 보면 주요 원인은 충돌에 의한 구조재의 손상과 화재에 의한 구조재의 내력저하에 있다고 보여진다. 세계무역센터의 구조방식은 소위 튜브 인 튜브

(Tube in Tube)라 불리는 구조로써, 건물 외주부(外周部)에 일정한 간격으로 촘촘히 들어선 기둥들과 건물 중앙부에 위치한 코아 주위의 기둥들에 의해 중력하중을 지탱하고, 동시에 풍하중지진하중과 같은 수평하중에 저항하는 방식의 순수 철골구조였다. 두 기둥 사이의 18m공간은 외주부의 기둥과 중앙의 코아를 잡아주고 기둥이 좌굴되는 것을 억제하는 역할을 하는 바닥 구조부재인 철골 조이스트(Joist)로 연결되어 있었다.

초기 비행기의 충돌로 발생한 강력한 충격에 의해 여러 층의 외곽기둥이 심하게 손상되었을 것이고, 중앙 코아의 철골기둥도 일부 손상을 입었을 수 있다. 이로 인하여 전체 구조시스템의 저항능력은 심각하게 약화되었을 것이나 건물 전체가 붕괴될 만큼 치명적이지는 않았을 것이다. 그런데 충돌 후 다량의 항공유의 폭발과 화재로 상층부의 바닥이 화염에 휩싸이면서 엄청난 고온이 발생되어 손상되지 않은 철골부재의 저항능력 또한 급격히 떨어졌을 것이다. 즉 내화피복 처리된 철골이 화재에 의하여 온도가 올라가면서 철골의 용융점인 800C를 초과하여 바닥을 지지하는 철골조이스트가 붕괴되고, 철골조이스트의 붕괴로 외주부 및 중앙 코아 기둥의 횡지지 지간(支間)이 길어지면서 좌굴로 인한 기둥내력의 급격한 저하 또한 복합적으로 작용했을 것이다. 즉, 상판이 순차적으로 무너져 바닥하중이 누적되고 기둥이 촘촘히 있는 외주부의 기둥보다 중앙 코아 기둥의 내력저하가 더 커지면서 붕괴는 중앙쪽에서 먼저 일어나면서 마치 폭파공법에 의한 붕괴양상을 보였던 것이다.

3. 세계무역센터가 콘크리트구조라면 어떠했을까?

주요한 구조체가 많이 손상되었고 철골 구조물의 온도가 800C 까지 올라갈 수 있는 상황에서 비행기 충돌 후 거의 중앙에 부딪힌 북쪽 타워는 1시간 44분, 한쪽 코너를 부딪힌 남쪽타워가 57분을 견딘 것은 거의 완벽한 구조시스템과 아울러 내화피복의 시공에 의한 것일 것이다. 이것이 수만 명의 인명을 구할 수 있었던 것으로 생각할 수 있다. 강재가 콘크리트보다 열에 약하지만 어떠한 재료를 사용하더라도 강력한 화재에 노출되어 안전할 수 없다. 일반 강재의 경우 500C 이상에서 강도가 50%저하되고, 800C 이상에서는 90%저하 된다고 본다. 콘크리트 구조의 경우 철근 자체의 강도는 보장되지만 피복콘크리트의 약화 특히, 부착성능이 저하되고 콘크리트의 압축강도가 저하되어 부재전체의 성능이 나빠진다. 즉, 콘크리트 속의 철근이 500 C 올라가면 부재의 강성과 종국내력은 40% 저하되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 아무리 내화능력이 좋아도 바닥이 무너져 내리는 것이 원인이 되고 그로 인해 기둥 파괴가 유발된다면 WTC와 같이 철골보의 핀 접합에서는 별의미가 없다. 왜냐 하면 불과 2-3개 층의 바닥하중이 누적되기만 해도 견단파괴에 의하여 건물이 붕괴되는 도미노현상이 일어나기 때문이다. 또한 충돌이 발생한 층을 포함한 상층부 거주자들의 경우 폭발과 화재 등으로 코아의 피난공간을 형성하는 내화벽체가 떨어져 나가서 대피공간으로써 역할을 제공받지 못했을 가능성도 높다. 따라서 초고층 건물에서 비행기 테러와 같은 비정상적인 하중에 대해 구조적 안전성과 아울러 재난방재시스템이나 대피시설에 대한 검토가 필요함을 느끼게 되는 것이다.

만약 이 건물이 순수 R.C구조로 이루어졌다면 어떠했을까? 화재로 인한 부재내력의 저하는 어쩔 수 없을 것이나 강도저하가 상대적으로 적고, 기둥과 보의 접합이 특별한 노력없이 모멘트 접합이 되기 때문에 초기의 갑작스러운 붕괴를 지연시킬 수 있고, 아울러 계단과 같은 거주자 대피와 비상용 엘리베이터를 작동을 확보하기 위한 코아 공간의 확보 또한 가능하여 구조체의 피해를 최소화하거나 대피시간의 연장으로 피해를 줄일 수 있었을 것이다.

어쨌든 이 사건을 통해 우리는 초고층 건물에 있어서 경험하게 될 위협적인 하중은 바람이나 지진과 같은 천재지변이라기 보다는 항공기 추락이나 테러와 같은 인간에 의한 재

난일 수 있다는 것을 실감할 수 있었으며, 이러한 비정상적인 하중을 감안한 설계나 시공은 필연적으로 많은 추가 비용의 발생을 수반하기 때문에 앞으로 어떻게 이 문제를 해결할 것인가가 뜨거운 이슈가 되고 있다.

4. 구조부재의 내화성 확보와 최소화를 위한 노력

일반적으로 건물은 화재 발생시 거주자와 소방관에 대한 일정 수준의 안전성을 확보하고, 인접한 시설물의 피해를 방지하기 위해 화재로 발생될 수 있는 극한상황을 상정(想定)하여 설계되어야 한다.

그 동안 고층 건물에 철골이 애용되면서 가능한 내화피복을 하지 않으려는 시도도 많았고 결국은 노출된 철골구조가 몇몇 나라에서 허용받는 단계에까지 이르렀다.

피츠버그에 있는 U.S Steel본사처럼 외부기둥에서 내화관련 규정을 만족시키기 위해 강관기둥 내부에 물을 채우고, 이를 순환시킬 수 있는 시스템을 갖춘 수냉방식에 의해 시공된 건물도 있다. 철골과 콘크리트 합성기둥이 내화피복된 철골기둥의 대안으로 등장하여 콘크리트가 충전된 대형 강관기둥이 고층건물에 사용되기도 했다. 스페인의 The Hotel de las Artes Tower에서는 호텔의 한 방화구획 내에서 화재하중과 표준레벨의 환기상태를 가정한 Mr. Law와 Mr. OBrien이 제시한 방법으로 계산이 수행되어 내화관련 규정을 충족한 것으로 인정받고 외부에 노출된 철골을 피복하지 않은 최근의 대표적인 건물이며, 일본에서 널리 사용되고 있는 내화철골(FR강)도 유사한 방법에 의해 내화성능을 인정받아 사용되고 있다.

건물의 화재안전수준은 그 건물의 구조체가 필요로 하는 내화수준보다는 사실상 화재안전시스템, 이를테면 스프링클러 시스템과 같은 다른 요소에 의해 더 영향을 받는 경우가 많지만, 일반적으로 이를 이유로 내화수준을 완화시키지는 않는다.

월드트레이드센터 사건을 계기로 앞으로도 이런 내화피복을 최소화하거나 생략하려는 시도가 계속 허용될 것인지, 또는 화재안전시스템을 고려한 합리적인 내화설계 방법이 개발되어 제시될 것인지는 지켜보아야 할 것이다.

현재로써는 RC조 건물의 구조부재는 적당한 피복두께와 부재의 최소크기를 정하면 비교적 쉽게 내화성능이 확보되고 내화규정의 영향도 덜 받는 반면, 철골구조의 경우 높은 등급의 내화성능을 확보하기 위해 뿔철 단열재나 단열판 피복 등 내화재료로 피복되어야 한다. 따라서 향후 내화조건이 강화될 경우 실제로 RC구조는 철골구조에 비해 상대적으로 공사비 절감 효과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 콘크리트 구조의 발전과 콘크리트 구조의 초고층건물 사례

콘크리트 구조는 재료의 발전, 설계기술, 시공기술, 시공계획기법 등의 급속한 발전에 의해 철골구조의 한계 높이까지 바짝 접근하고 있으며, 건설공기 또한 괄목할 정도로 단축되고 있다. 콘크리트가 주 구조재료로 사용된 대표적인 건물의 현황을 살펴보면 다음과 같다.

- Kuala Lumpur의 PETRONAS Tower : 현존하는 세계 최고의 건물, 지하6층 지상92층, 높이 452m, 오피스 빌딩.
- Hong Kong의 Central Plaza : 순수 콘크리트 구조로 가장 높은 건물, 78층, 높이374m, 오피스 빌딩.
- 중국 광저우의 Sky Central Plaza : 80층, 높이 322m

- 방콕의 Balyoke Tower II : 90층, 높이 320m, 순수 콘크리트구조로 된 복합건물.
- New York의 Trump World Tower : 세계 최고의 주거용 건물, 70층

위의 사례들을 보면, 우리와 가까운 동남아시아(싱가폴, 홍콩, 방콕)의 경우 양호한 기후 조건과 저렴한 생산원가로 인해 초고층건물에 있어서도 RC가 주 구조재로 사용되고 있음을 알 수 있으며, 국내에서도 서울의 특정지역을 중심으로 50-60층 주거용 초고층 건물이 복합구조 형태로 지어지고 있으며, 40층 내외의 주거건물은 순수 RC구조를 채택하는 경우가 있다.

6. 콘크리트 구조의 장점

지금까지는 초고층 건물이라 하면 흔히 철골구조를 연상해 왔으나, 최근들어 설계나 시공 기술, 재료 등의 개발과 연관 분야인 시스템 Form의 발달에 힘입어 초고층건물에 대한 콘크리트 구조의 도입과 발전의 가능성은 무한해졌다.

일반적으로 콘크리트 구조의 질량은 기초하중과 지진하중을 증가 시키지만, 건축평면이나 형태 규모에 따라 그 영향은 미미하다고 볼 수 있으며, 콘크리트구조를 지향하게 되는 가장 근본적인 이유는 철골구조에 비해 골조공사비가 상대적으로 저렴하다는 경제성에 있다 할 것이다. 예를 들면, 지하3층 지상 78층으로 현존하는 가장 높은 콘크리트 건물인 홍콩의 Central Plaza의 경우, 당초 철골조로 설계를 하였으나 공사비 절감차원에서 콘크리트조로 변경하여 골조공사비의 약 30%를 절약할 수 있었다. 콘크리트 구조의 장점을 요소별로 살펴보면 다음과 같다.

가. 설계적인 측면

- 철골의 경우 재료가 거의 완전히 발전한 단계이지만 콘크리트의 발달은 과거 20년동안 급속히 발전해오고 있다.
- 초고층 건물의 경우 일반적으로 사업일정의 단축뿐만 아니라 시장의 변화 및 설계변경에 유연하게 대처하기 위해 Fast Track방식이 적용된다. 이 경우 철골구조는 상당히 긴 제작기간이 필요하지만 RC는 현장에서 즉시 적용이 가능하다.
- 일반적으로 RC조의 기둥은 철골조에 비해 크지만, 고강도콘크리트의 사용을 통해 기둥 단면을 줄이고 사용공간의 감소도 최소화 할 수 있다.
- 횡력에 효과적으로 저항할 수 있는 구조체의 강성(Stiffness)확보에 유리하다. 즉, Core와 Frame시스템의 부재크기 증가로 높은 횡강성을 가질 수 있으므로 철골과 달리 강성확보를 위한 추가적인 보강이 불필요하다.
- RC조 Core Wall은 수직하중과 수평하중을 지지하면서 화재시 피난통로로 활용될 수 있다.
- 다양한 형태나 모양의 설계가 가능하다.

나. 시공적인 면

- 일반적으로 시공주기 면에서는 철골이 빠르다고 알려져 있지만 콘크리트 시공기술 및 시스템 Form의 적용으로 층당 공기가 평균 4일 정도로 짧아지고 있으며, New York에서는 Flat Slab방식을 채택하여 층당 2일 정도로 공기를 단축하고 있다.
- 기둥과 보가 일체로 타설되는 RC구조는 철골구조와 달리 별도의 비용이나 작업시간이 필요없이 모멘트 접합이 가능하며, 기하학적으로 복잡한 기둥의 접합이나

경사진 기둥에의 적용이 유리하며, 보와 Outrigger의 접합부의 시공도 용이하다.

- 다양한 시공방법의 도입이 가능할 뿐 아니라, 향후 발전 가능성이 높다.
- 철골공사의 경우 Lead Time이 필요하며 내화피복 등 마감시공이 필요한 반면, 콘크리트구조의 경우 이러한 과정이 불필요하고, 즉시 Dry Wall이나 Painting이 가능하다.
- 부재중량이 작아서 대형장비가 불필요하고 또한 부재수가 적으므로 양중부하가 감소되어 양중 측면에서도 유리하다.
- 철근 선조립(先組立)공법이 가능하며, 이의 활용을 통하여 공기단축이 가능하다.

다. 공사비 측면

- 일반적으로 철골구조보다 20-30% 정도 골조 공사비가 싸며,
- Flat Slab 시스템의 사용으로 Form Work를 단순화하여 오히려 공사기간을 단축하고, 토지에 대한 점유기간을 줄여 자금회수를 빨리함으로써 Finacing비용을 줄일 수 있고
- 커튼월(Curtain Wall), 배관, 내화피복, 수평변위조절, 소음 및 진동조절 등의 비용이 싸다.

라. 거주성 측면

- 콘크리트구조의 증량증가는 Damping을 증가시키고 기본주기를 길어지게 함으로써 움직임에 대한 지각을 줄일 수 있어 거주성을 향상시킬 수 있다.
- 초고층 콘크리트 구조의 경우 강성(Stiffness)증가의 필요성이 증량증가와 함께 동시에 가속도를 감소시키는 역할을 한다. 철골구조의 경우와 같이 증량 증가없이 강성만의 증가는 움직임에 대한 지각을 확실하게 줄이지 못한다. 따라서 철골구조의 경우 종종 비용이 많이 드는 Damper를 필요로 하지만, RC구조의 경우 Damper 설치 없이도 거주의 안락성을 확보하기가 용이하다.
- 인접공간들 간의 소음 차단 성능이 뛰어나며, 보가 없는 Flat Slab적용으로 보다 더 두꺼워진 슬래브는 소음,진동에 대해서도 우수하다.

마. 안전성 측면

- 지진하중과 풍하중에 대하여 증량재료인 콘크리트로 인하여 주기가 길어짐으로 초고층 건물의 기초가 암반에 시공되는 것을 감안할 때 기초와의 상호작용에 유리하다.
- 구조체 전체가 내화구조로써 별도의 내화피복이 불필요하며 화재에 장시간 노출되어도 구조적 내력을 발휘할 수 있다.
- 화재, 폭발 시 철골구조의 경량 Partition벽체는 손상을 입을 가능성이 높지만 RC 구조는 확실한 대피공간(계단)을 확보할 수 있다.

7. 결론

흔히 일반인들의 사고 속에는 실제의 사실과 달리 잘못 알려진 부분들이 정형화되어 고정관념으로 자리잡고 있는 경우들이 많다. 사실에 기초하지 않은 오도된 고정관념들은 「문제에 대한 재인식 노력」이나 「관련기술 개발 의지」를 가로막아 결과적으로 관련 산업의 경쟁력을 저하시키는 원인으로 작용하는 경우도 드물지 않다.그 동안 국내에서는 고층건물을 건설하는데 있어 철골조(Steel Structure)가 성능이 우수하냐 아니면 콘크리트(R.C.)조가 좋으냐 하는 논란이 끊임없이 계속되어 왔다. 철골조나 콘크리트조 모두 각각의 장단점이 분명히 존재함에도 불구하고, 논란의 결과는 관련 이해집단의 필요에 의해 상당 부분 왜곡되어 왔던 것이 사실이다. 이러한 이유들로 인해 국내에서는 15층 정도의 건물만 해도 거의 천편일률적으로 철골조로 설계되고 있으며, 현재에도 많은 초고층 주상

복합건물들이 철골조로 지어지고 있다. 이런 상황이 도래하게 된 원인 중에는 콘크리트 관련 업계 종사자들이 매우 심각하게 반성해야 할 부분도 많다고 본다. 콘크리트의 생산 및 공급과정에 대한 품질관리체계의 미흡이나 콘크리트 관련 기술의 낙후로 인해 설계나 시공과정에서 수많은 문제점들에 봉착할 수 밖에 없었고, 결과적으로 우리나라에서 콘크리트 구조가 외면 혹은 배척당하게 된 측면도 무시할 수 없기 때문이다. 그 단적인 예로써, 구조용으로 $210\sim 240\text{kg/cm}^3$ 강도의 콘크리트를 사용하고, $400\sim 500\text{kg/cm}^3$ 정도의 콘크리트를 고강도 콘크리트로 규정하고 사용에 제한을 가하는 경우는 전 세계적으로도 그 유례를 찾아보기 어려운 경우라 할 수 있을 것이다.

세계무역센터 건물의 붕괴는 초고층 건물에 있어서 구조체의 중요성을 다시 한번 일깨워 주었을 뿐만 아니라, 철골조가 안고 있는 문제점에 대한 재인식과 더불어 다양한 형태의 구조재 사용에 대한 논의를 촉발하는 계기가 되었다.

업계의 꾸준한 노력이나 연구를 통해 콘크리트 설계 및 생산기술의 발전이 전제될 경우, 고강도 콘크리트를 사용한 초고층 건물이나 철골조와 콘크리트조를 합성한 복합구조의 적용이 활성화 됨은 물론 지금까지의 고정관념 또한 충분히 극복할 수 있을 것으로 보인다. 콘크리트 관련 업계의 분발과 노력으로 국내에서도 순수 콘크리트조로 지어진 100층에 가까운 건물이 탄생될 수 있으리라는 희망과 함께, 콘크리트가 가지고 있는 많은 장점들이 올바르게 인식될 수 있는 계기가 마련되기를 기대한다.