

# 미국 세계무역센터 붕괴 원인 분석

주영규 (대우건설기술연구소, 선임연구원, 공학박사)

## 1. 머리말

제안하고자 한다.

2001년 9월 11일 2대의 점보기에 의해 미국 경제 중심의 상징인 세계무역센터가 붕괴되었다. 일본 고베지진시 건물의 중간층이 붕괴되면 상부층이 하부층 위에 놓이게 되었지만 세계무역센터와 같이 전 건물이 완전히 붕괴되지는 않는다. 이러한 점을 놓고 일반인들은 건물 설계에 많은 의구심을 가지고 있는데 여기서 현재까지 알려진 자료에 근거하여 그 원인을 추정하여 분석하고 향후 구조설계를 위한 방향을

## 2. 세계무역센터

### 2.1 개요

세계무역센터는 세계에서 4번째로 높은 건물이었으며, 1973년 준공 후 1년간 시카고의 Sears Tower(443m)가 건설되기 전까지는 세계에서 가장 높은 건물이었다.

표 1. 세계무역센터 개요

항 목	내 용	비 고
규 모	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 110층 Twin Tower</li> <li>• 47층 사무소 1동</li> <li>• 9층 사무소 2동</li> <li>• US Customs 사무소 1동</li> <li>• 22층 호텔 1동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이번 테러에 의해 110층 Twin Tower와 47층 사무소 붕괴</li> </ul>
높 이	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tower One : 417m</li> <li>• Tower Two : 415m</li> </ul>	
소 유 주	• Port Authority of New York & New Jersey	
건축설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minoru Yamasaki</li> <li>• Emery Roth &amp; Sons Consulting</li> </ul>	
구조설계	• John Skilling & Leslie Robertnon (SWMB)	
착 공 일	• 1966년 8월 5일	
준 공 일	• 1973년 4월 4일	
공 사 비	• 12.5억달러(약 1조6천억원)	
임대면적	• 12,000,000 ft <sup>2</sup> (1,115,000m <sup>2</sup> )	
거주인원	• 50,000명	
관 광 객	• 90,000명/일	

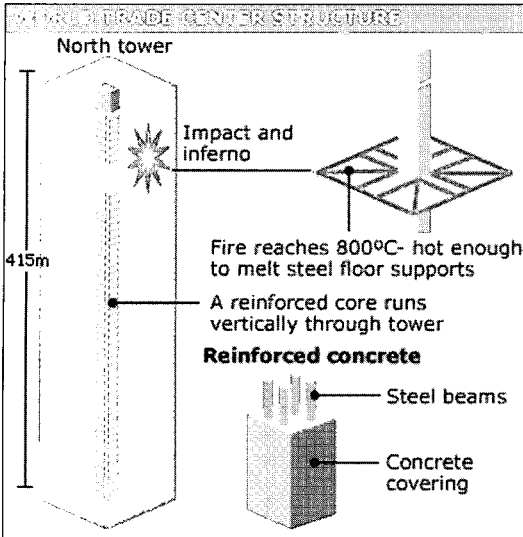


그림 1. 구조개요(출전:BBC)

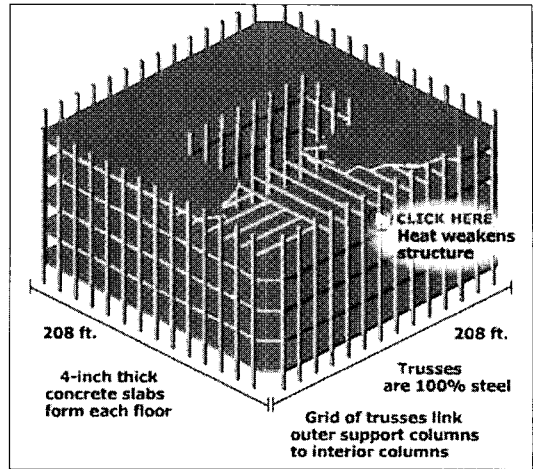


그림 3. 구조시스템

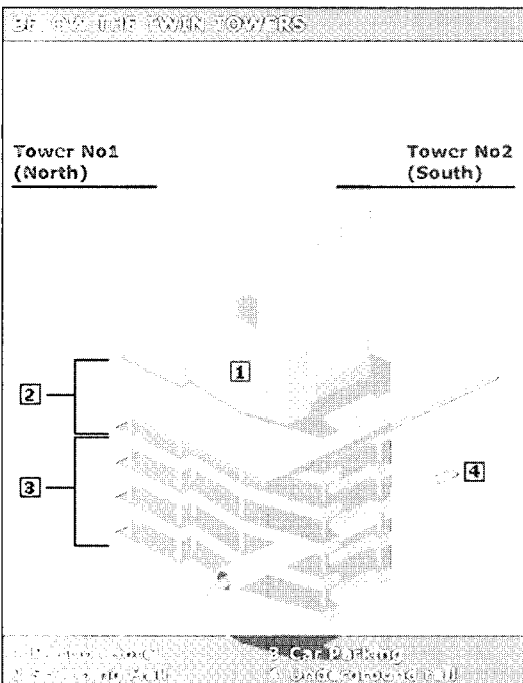


그림 2. 지하부(출전:BBC)

## 2.2 구조개념

1970년대 초 뉴욕 향만청에 의해 건설된 세계무역센터는 대표적인 골조튜브(Framed Tube) 구조물이

다. 튜브 구조는 크게 골조튜브, 뭍음튜브(Bullded Tube : Sears Tower), 가새튜브(Braced Tube : John Hancock Tower), 이중튜브(Tube in Tube)로 나누어진다. 골조튜브 건물은 외부에 촘촘히 배치된 기둥 및 이를 연결하고 있는 보에 의해 지지된다. 외부에 형성된 골조튜브는 내부의 코어와 함께 바람 및 지진과 같은 외력에 저항할 수 있다.

건물의 평면 크기는 208ft(63.4m) x 208ft(63.4m)이고 코어 크기는 86ft(26.2m) x 86ft(26.2m)이다. 건물의 골조튜브를 구성하고 있는 기둥은 3ft-3in(99cm) 간격으로 배치되어 있고 48in(122cm)의 두꺼운 외곽보로 연결되어 있다. 3층에서 촘촘히 배치된 기둥은 10ft(3.04m) 간격의 큰 기둥으로 아치형상으로 연결되어 있다. 바닥은 중앙코어에서 외부기둥까지 60ft(18.3m)를 트러스 거더에 의해 연결되어 있으며 수평부재와 수직부재는 편접합되어 있다. 내화피복재는 세라믹을 사용하고 있다.

세계무역센터는 6에이커(24,300m<sup>2</sup>)의 매립지 위에 건설되었기 때문에 지표면 하부 70피트에 위치한 경암반까지 지지말뚝을 설치하였다. 따라서 수직 하중에 대해서도 저항할 수 있도록 되어 있다. 건물 완공후 지반이 9in(22cm) 침하하였다고 보고되고 있다.

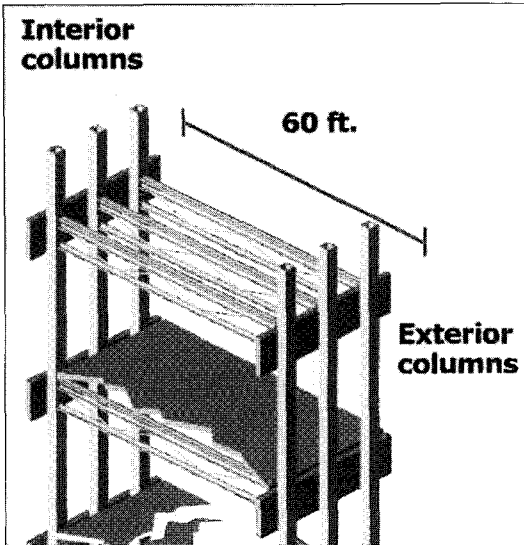


그림 4. 거더 입체도

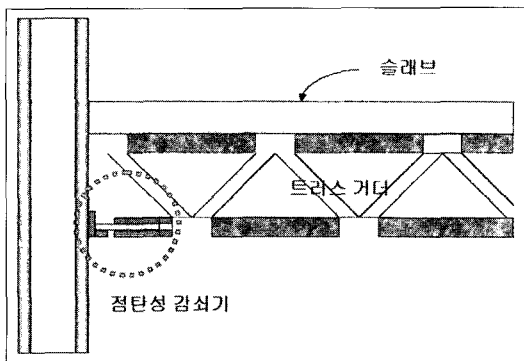


그림 5. 감쇠시스템

### 3. 붕괴상황

2001년 9월 11일 오전 8시 45분 보스턴 로건 국제공항을 출발하여 LA로 향하던 아메리칸항공 소속 AA 11편이 뉴욕 세계무역센터 북쪽 타워(Tower 1)에 충돌하였다. 20분 뒤인 9시 5분 CNN의 생중계에 유나이티드항공 소속 UA 175편이 남쪽 타워(Tower 2)에 충돌하였다. 남쪽 타워는 충돌후 45분 뒤인 9시 50분에 붕괴되었고, 북쪽 타워도 1시간 45분 뒤인 10시 29분에 붕괴되었다. 북쪽 타워의 붕괴로 오후 5시 25분에 47층 사무소 건물이 붕괴되었다.

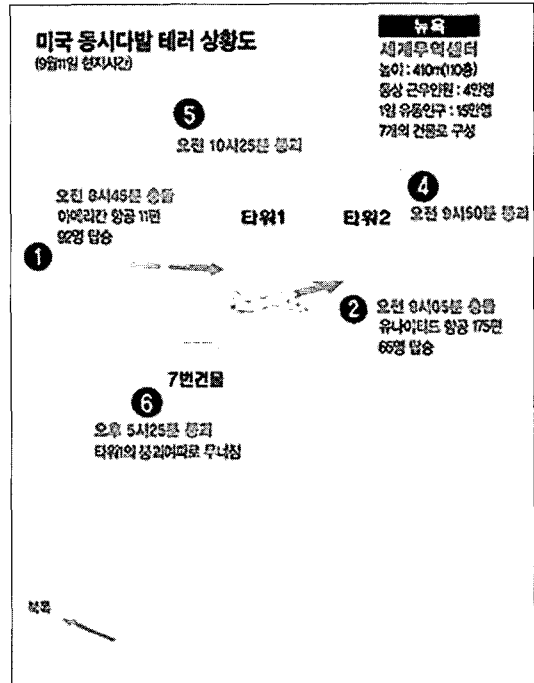


그림 6. 세계무역센터 붕괴 일지(출처:동아일보)

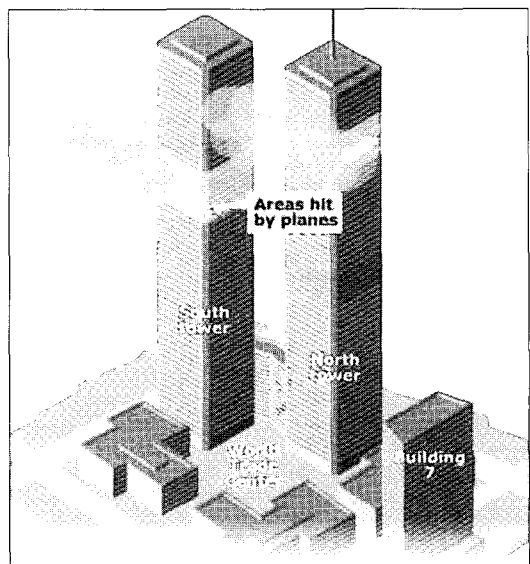


그림 7. 항공기 충돌

### 4. 붕괴원인

#### 4.1 항공기 충돌

항공기가 건물에 충돌한 경우 건물에 미치는 예너

지를 평가하면 다음가 같이 계산될 수 있다. 767-400ER(767 시리즈 최대형 기종)은 245명의 승객을 태울 수 있으며 항공연료 24,000갤론(90,840리터)을 싣게 된다. 이 경우 항공기의 중량은 450,000lb(204ton)이고 충돌시 속도는 530 MPH(852km/h)가 된다. 충돌한 항공기는 보스턴을 출발하여 LA로 향하고 있었으므로 중량을 300,000lb(136ton) 정도로 예상할 수 있으며 충돌시 500MPH(800km/h) 정도 속도를 가정할 수 있다.

$E=MV^2/2$ 에 의해 에너지를 계산하면 충돌시 발생될 에너지는  $3.4 \times 10^9$ J이 된다. TNT 1톤에 의해 발생되는 에너지가  $4.2 \times 10^9$ 이므로 충돌시 건물에 영향을 주는 에너지는 TNT 0.8톤에 해당한다.

Tower 2에 항공기가 충돌하는 CNN의 화면을 유심히 관찰하면 외부 기둥에 구멍이 발생된 것을 확인할 수 있다. 이것은 항공기 충돌시 하층은 건물에서 상당부분 흡수되었음을 의미한다. 또한 충돌시에 건물의 변형이 두드러지지 않았고 마치 바위에 계란이 부딪치는 정도의 충격을 준 것 같다.

수평방향의 하중에 대한 건물의 저항에 있어서 이 건물은 707 항공기에 대한 충격하중도 고려되었다고 하니(구조설계를 수행한 Leslie Robertson이 언급) 항공기 충격하중에 의해서 구조물이 직접적으로 붕괴되지는 않은 것 같다.

특히 횡력에 대해서 저항하기 위하여 트러스 거더 단부에 설치된 점탄성 감쇠기(Visco Elastic Damper)도 항공기 충격하중을 상당부분 흡수하였을 것이다.

그러나 항공기 충돌에 의해 기둥, 거더 등 주요구조부재가 손상되었고 또한 철골의 내화피복재도 상당부분 손상되어 화재의 의한 피해가 빠르게 진전되게 하였다.

#### 4.2 구조부재 열화

세계무역센터는 800℃의 온도에서 3시간 동안 화재에 견딜 수 있도록 설계되어 있다고 한다. 그러나 충돌에 의한 항공기 폭발이 발생되어 실제적으로 충돌한 층에 발생된 온도는 1,000℃ ~ 2,000℃로 예

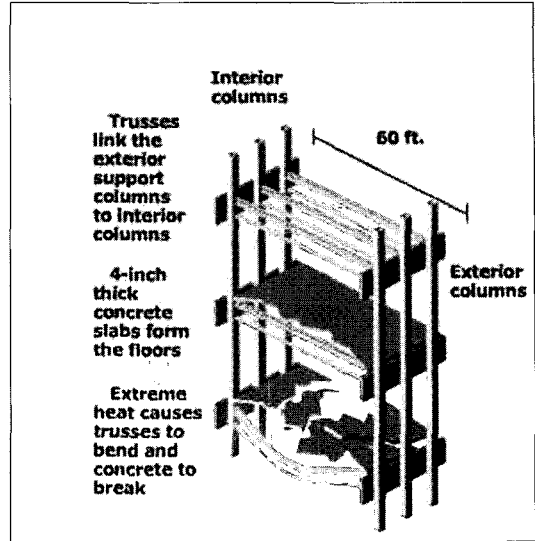


그림 8. 구조부재 열화

상된다. 따라서 피복이 잘 되어 있다고 하더라도 3시간은 화재에 대해 견딜 수 없다. 또한 충돌시에 항공기가 충돌한 면의 반대편까지 거의 동시에 지나갔으므로 상당수의 피복재에 손상이 발생되었을 것이다.

항공기 연료는 1갤론(3.785리터)에  $135 \times 10^6$ J의 에너지를 갖고 있다. 항공기는 보스턴을 출발한 지 얼마되지 않았으므로 20,000갤론(75,700리터)의 연료를 갖고 있을 것이다. 따라서 항공기 연료에 의해 발생될 에너지는  $2.7 \times 10^{12}$ J이 된다. 이것은 TNT 642ton에 해당되며 충돌시 발생된 에너지의 800배에 해당된다. 이를 전기로 환산하면 1시간동안 750 MWatt를 소비하는 것과 같다.

항공유에 의해 발생되는 이러한 에너지에 의해 외부기둥과 내부코어를 연결하는 60피트(18.3m) 길이의 철골트러스가 처지게 된다. 세계무역센터의 철골트러스는 외부기둥과 내부코어를 전단만 부담하는 핀접합으로 연결하고 있다. 따라서 힘과 전단을 부담하도록 되어 있는 강접합에 비해서 취약한 경향이 있다.

또한 철골트러스가 지나치게 처지게 되면 트러스 상부에 위치한 철근콘크리트 슬래브가 과대한 압축력을 받게 된다. 이러한 압축력에 의해 슬래브가 압괴되며 부서진 조각들이 바로 아래층으로 떨어지게 된다. 이 정도로 큰 변형이 발생하게 되면 트러스 단



그림 9. Tower 2 붕괴상황(출처 : AP통신)

부의 편접합도 손상이 발생하게 된다. 따라서 거의 비슷한 시점에 기둥과 연결된 접합부가 파괴되며 바닥을 지지하고 있는 트러스와 철근콘크리트 슬래브가 바로 아래층에 떨어지면서 충격하중으로 작용하게 된다.

수직하중 및 수평하중을 지지하고 있던 기둥도 항공기 폭발에 의해 열화된다. Tower 2의 경우 항공기가 충돌한 부분의 기둥 및 트러스 거더의 열화가 심하여 사진에서와 같이 상부층이 한쪽으로 기울어져서 무너졌다.

CNN에 의하면 나중에 충돌한 Tower 2가 45분 만에 붕괴되어 Tower 1의 1시간 45분보다 1시간이나 빨리 붕괴되었다. 이것은 폭발의 크기, 건물 평면 및 입면 위치, 그리고 부재의 내력에 기인한다고 할 수 있다. 의견상 Tower 2가 폭발의 정도가 컸다. Tower 1은 연기가 지속적으로 발생되었지만 Tower 2의 경우 붉은색 화염이 지속적으로 관찰되었다. 평면 위치를 살펴 보면 Tower 1은 중앙부에 위치하였지만 Tower 2는 한쪽으로 치우쳐서 항공기가 충돌되었다. 따라서 Tower 2의 경우는 한쪽면의 기둥들이 상대적으로 빠르게 폭발에 의해 열화되었다고 할

수 있다.

수직적 위치를 살펴보면 Tower 1의 경우 건물 높이의 4/5, Tower 2의 경우 건물 높이의 3/5 위치로 열화되는 기둥의 입장에서 보면 Tower 2의 기둥이 더 많은 수직하중을 부담하여야 했다.

부재의 내력면에서는 건물의 높이에 따른 위치에 관계없이 각 수직부재는 거의 일정한 정도의 내력의 여유를 가지도록 설계된다. 세계무역센터의 경우 이에 대한 상세한 정보가 없는 상태에서는 내력의 여유에 대한 영향은 평가하기 어렵다.

#### 4.3 연쇄붕괴

충돌된 층의 트러스 거더 및 슬래브들이 손상되어 아래층으로 떨어지게 되면 연속적으로 Pancake 붕괴가 발생하게 된다. 이것은 내부기둥과 외부기둥을 연결하는 거더가 전단에만 견딜 수 있도록 설계되었기 때문이다. 즉 상부의 20개층 또는 40층에 해당하는 하중이 해당층의 하중에 부가되어 작용하므로 연속적으로 붕괴가 진행하게 된다.

내부의 거더 및 슬래브가 하부층으로 붕괴되어 내려가면 해당층에 있던 외부의 기둥은 C형지 지지되어 있던 거더의 없어짐으로 인하여 좌굴길이가 길어지게 된다. 따라서 동일한 단면상태에서 훨씬 적은 하

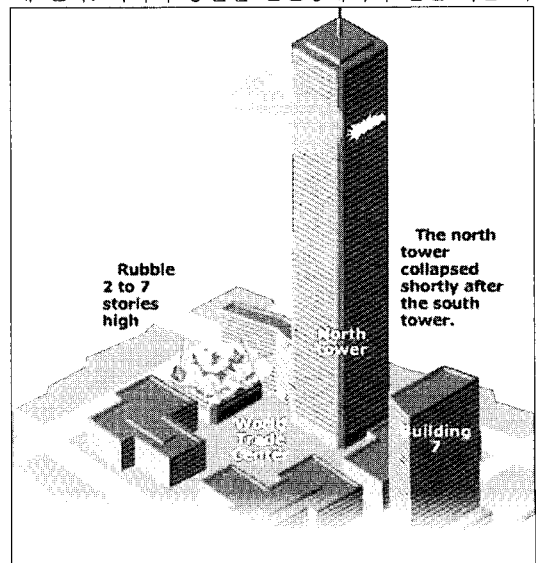


그림 10. 연속 붕괴



그림 11. 붕괴후 잔해

중에도 좌굴하게 된다. 그런데 상부에 20개층 또는 40층의 구조물에 의해 코어와 외부기둥은 상호 연결되어 있으므로 외부기둥이 안쪽으로 기울면서 좌굴하게 된다. 붕괴된 세계무역센터의 남아 있는 외부기둥을 보면 안쪽으로 기울어져 있음을 알 수 있다.

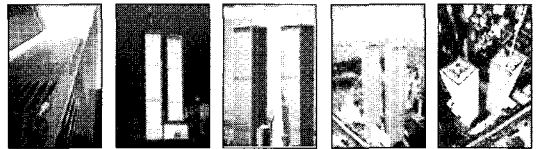
#### 4.4 지반의 리바운드 : 지반의 힘의 균형 상실

110층 건물이 건설될 때 하부 기초는 9in(22cm) 침하되었다고 한다. 따라서 기초를 누르던 건물이 붕괴되어 없어지게 되면 지반은 융기하게 된다. 건물의 실제 중량은 1,000,000톤 정도로 예상되는데 상당부분이 비산 먼지 등으로 사라지고 잔해로 남아 있는 중량은 상당히 줄어들 것이다. 따라서 지반 융기는 상당히 가능성 있는 거동이 될 것이며, 이러한 지반의 융기로 주변건물 기초지반의 변형을 초래하게 된다.

Twin Tower에 인접한 47층 사무소 건물도 파괴되었다고 한다. 이 건물의 구조시스템에 대한 정보가 없는 상태에서 그 원인을 예상하는 것은 무리가 있지만, 건물이 붕괴될 경우에 지반이 하부로 변형된 후 기초가 튀어오르면서 발생하는 진동은 고베지진에서 건물의 주요붕괴원인이 되었던 수직방향의 진동을 유발시키게 될 것이다. 110층 건물이 붕괴되면서 발생하는 에너지는 지구상에서 발생된 그 어떤 지진보다도 작지는 않을 것이다.

### 5. 국내의 초고층구조시스템 현황 및 기술개선 검토 사항

일본 고베지진에서와 같이 기둥, 벽과 같은 수직부재와 보, 슬래브 등의 수평부재가 강접합되어 있으면 중간층의 붕괴가 발생하더라도 해당층들만 붕괴되고 그 상부 및 하부층들은 비교적 안전하였다. 고베지진은 상하부 방향의 지진력이 크게 발생된 지진이다. 건물에 대한 방향성을 보면 세계무역센터와 유사하다고 하겠다. 고베의 건물은 바닥에서 상하부로 진동시켰지만 세계무역센터는 중간층에서 자체적으로 열화되어 붕괴된 차이가 있을 뿐이다. 그럼에도 불구하고 고베 지진시 20층 내외의 건물들은 중간층 붕괴에 머물렀지만 세계무역센터는 완전붕괴되었다.



세계무역센터(철골환산물량 = 180kg/m<sup>2</sup>)는 초고층 건물의 새로운 장을 연 골조튜브를 적용한 건설 기술의 결정체이었다. 전세계에 건설된 50층 이상의 건물들에서 가장 많이 적용되는 기술인 튜브구조를 가장 이상적으로 적용한 건물이었다. 건물에 사용된 물량도 동일 지역에서 비교되고 있는 엠파이어 스테이트 빌딩(철골환산물량 = 200kg/m<sup>2</sup>)보다 훨씬 경제적이었다.

이러한 기술적 우수성에도 불구하고 항공기 충돌에 건물이 완전 붕괴되었다는 것은 검토할 필요가 있다고 하겠다. 항공기 충돌에서 안전하도록 건물을 설계한다는 것은 경제적 논리에서는 현실성이 없다. 그러나 인간존중의 차원에서 건물의 완전붕괴는 어느 정도 지면 또는 예방할 수 있는 대안이 도출되어야 할 것이다.

국내에도 세계무역센터에는 미치지 못하지만 63빌딩을 비롯하여 최근에 하이퍼리온(69층), 타우펠리스(66층), 트럼프월드(41층) 등 초고층 주거시설들이 활발하게 건설되고 있다. 그 동안 국내의 건물

설계에 있어서 기둥과 보의 접합은 일본의 경향을 따라서 강접합을 많이 사용하여 왔다. 지진의 위험성이 크지 않은 국내의 현실에서 지나치다고 느낄 정도로 강접합에 대한 구조 및 시공 기술자들의 선호는 일반화된 사실이었다. 따라서 강접합 구조물은 항공기와 같은 과대한 하중이 작용하더라도 완전붕괴가 될 가능성은 낮다고 예상될 수 있다.

그러나 최근에 외국과의 교류가 활발해지고 국내의 건축기술이 국제적 수준으로 향상되면서 외국에서 많이 사용되고 있는 핀접합에 대한 적용이 적극적으로 검토 및 적용되고 있다. 그러면 핀접합은 완전붕괴의 위험이 있으므로 사용하지 않도록 할 수는 없다. 세계무역센터의 경우 구조적으로 우수한 건물이

있음에는 틀림 없다. 그러나 이 건물에서는 연속적인 붕괴에 대한 검토가 되어 있지 않았을 뿐이다. 국내에서도 1995년 삼풍백화점 붕괴 사건후 안전진단에 대한 규정이 강화되고 안전에 대한 인식이 사회적으로 확산되었지만 건물의 연속적인 붕괴에 대한 검토는 없었다.

따라서 건물의 연속적인 붕괴를 건물 설계시에 사전 검토하여 예상하기 어려운 과대한 하중이 건물에 작용하여도 건물이 완전히 붕괴되지 않고 일부 부분만 파괴되도록 하는 설계방법이 필요하다. 즉 설계하중 이상의 하중이 건물에 작용되면 특정부위가 우선 파괴되고 기타 인명 및 복구에 많은 비용이 소요되는 부분은 안전하게 할 필요가 있다고 할 수 있다.

#### 〈참 고 문 헌〉

1. <http://www.donga.com/>
2. <http://dailynews.yahoo.com/>
3. <http://www.usatoday.com/usatodayonline/>
4. <http://news.bbc.co.uk/>
5. <http://news.nationalgeographic.com/news/>
6. <http://www.latimes.com/news/>
7. <http://www.skyscraper.org/>
8. <http://www.cs.co.kr/>
9. <http://tall.kr21.net/>
10. B.S.Taranath, "Steel, Concret & Composite Design of Tall Buildings", McGraw-Hill, 1998.
11. B.S.Smith, A.Coull, "Tall Building Structures : Analysis and Design", John Wiley & Sons, 1991.
12. 대우건설기술연구소, "초고층 건물의 해석 및 설계에 관한 연구", DEP-007-96, 1996.