



김종수 대표이사  
(주)CS구조엔지니어링  
jskim@cs.co.kr

## 미국 무역센터의 붕괴 메커니즘

미국 무역센터에 대한 항공기 테러가 있는 후 몇 시간의 간격을 두고 건물이 잇따라 무너져 내려 평소 건축구조에 관심이 없던 일반인들도 붕괴의 원인에 대하여 의문을 가지게 되었고, 각종 매체에도 원인을 추측한 기사들이 올라오고 있다. 우리 회사에서는 지난 9월 14일, 당시까지 수집된 자료를 토대로 World Trade Center(이하 WTC)의 붕괴에 대한 기사를 작성하여 회사의 인터넷 자료실에 올린 바 있다.

지난 10월 9일~10월 13일 일본의 나고야에서 열린 IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) Conference에서도 WTC에 대한 세미나가 열려서, 당시 WTC의 설계에 참여했던 Matthys Levy씨가 붕괴의 원인에 대하여 발표하였으며, 당시의 질의응답을 통하여 일본에서도 WTC에 대한 토의가 있었음을 알 수 있었다.

여기서는 지난번 당사의 Website에 올렸던 기사를 중심으로 IASS에서의 Levy씨의 발표내용과 다른 구조엔지니어의 의견을 함께 소개하고자 한다.

아래에 사용된 사진은 각종 보도기관과 인터넷 사이트에서 인용한 것임을 미리 밝혀둔다.

### 항공기 테러에서 건물붕괴에 이르기까지의 상황

무역센터의 쌍둥이 건물에 대한 테러는 8시 45분 타워1에 아메리칸항공소속 보잉767-200 항공기가 충돌하면서 시작되었다. 약 20분후인 9시5분 유나이티드항공사의 보잉767-200 항공기가 센터2에 충돌하면서 항공기 테러는 종료되었다.

타워2는 항공기 충돌45분만인 9시 50분에 붕괴되었고, 타워2 붕괴 39분후, 항공기 충돌 1시간 44분만인 10시 29분에 타워1이 붕괴되었으며, 이로부터 6시간 56분후인 오후 5시 25분 7번건물이 붕괴되었다.

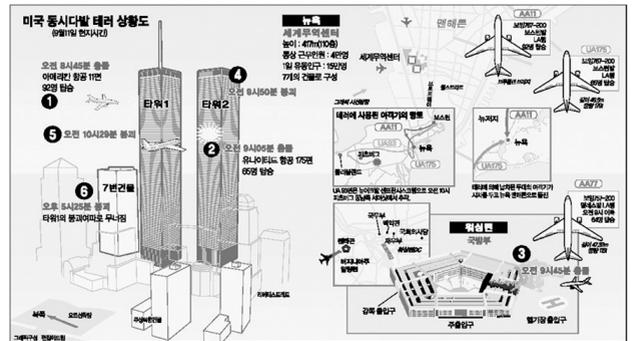


그림1 테러 및 붕괴 상황(동아일보에서 인용)

### 무역센터건물의 개요

프로젝트참여 전문가

건축설계: Minoru Yamasaki, Emery Roth and Sons consulting

	타워1	타워2
높이	417m(1369.09ft)	415.14m(1,362.00ft)
층수	지상110층	지상110층
준공	1972년	1973년

구조설계: Leslie Robertson Associates, New York City  
무역센터 건물은 시카고의 시어스타워(Sears Tower in Chicago)가 세워지기 전인 1974년까지 세계에서 가장 높은 초고층 건축물이었다. 타워동은 110층, 연면적 418,000㎡의 초고층 2개동으로 63.5m×63.5m의 정방형 평면이며, 256개의 각형 강관 기둥이 외부에 1.02m 간격으로 배열된 Tube 구조시스템으로 강풍, 지진 등을 견디도록 설계되었다. 이 건물에서 내부기둥은 중력 하중만을 부담하도록 계획되어 있었다.

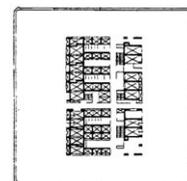


그림 2 기준층 평면도

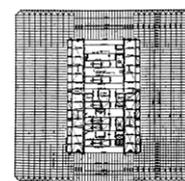


그림3 기준층 구조평면도

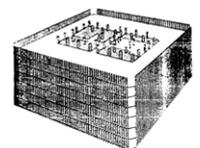


그림4 구조 개념도

특이한 점은 WTC의 바닥에는 진동을 제어하기 위하여 점탄성 감쇠기가 설치되어있다는 점이다. 3M에서 개발한 이 Damper는 10층에서 110층까지에 걸쳐서 10000개소에 설치되었다.

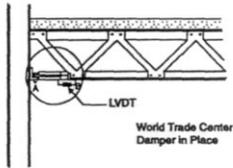


그림5 댐퍼 설치상황

이 장치는 건물의 진동을 흡수하기 위한 것으로 하중을 전달하는 기능을 하지는 못한다. 따라서 바닥의 하중은 철골트러스의 상현재와 기둥의 접합부에서 전달되게 되며, 접합의 형태는 단순접합(shear Connection)이다.

마지막으로 World Trade Tower 건물군중 1, 2번 Tower의 붕괴여파로 무너져 내린 7번 Tower의 개요는 다음과 같다.

높이 : 173.74 m (570.00 ft)

층수 : 지상47층

준공 : 1987년

### 붕괴의 원인분석

현재까지 파악된 상황을 근거로 110층 건물이 무너진 원인과 과정을 생각해보고 우리나라의 건물에 대하여도 살펴보고자 한다.

### 항공기의 충돌

항공기와 같은 엄청난 질량의 물체(약175t)가 충돌하더라도 이 충격만으로 건물을 무너뜨리지는 못한다. 항공기 충돌에 의한 에너지는 건물의 외부기둥을 파괴하는 과정에서 소산이 된 것으로 보이며, 건물본체에 전달된 에너지는 그리 크지 않았을 것으로 추측된다. 실제로 무역센터도 충돌직후 붕괴된 것이 아니라, 각각 45분, 1시간 40분이라는 시간동안 하중을 지탱하다가 붕괴된 것이다.

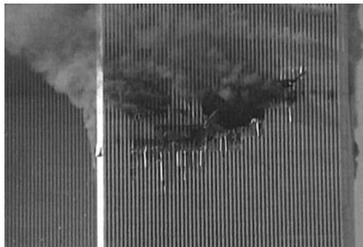


그림6 비행기 충돌직후 상황

### 항공유의 연소에 의한 급격한 온도 상승

건물을 붕괴시킨 직접적 이유는 충격이 아니고, 항공유가 연소되는 강력한 불길에 따른 골조의 온도상승에 의하여 골조가 약화

되었기 때문이다. 강력한 불길 속에서도 거주자들이 대피하는 동안 건물이 견딜 수 있었던 것은, 화재에 대한 최소한의 방호시스템이 작동하고 있었던 것 때문이라고 볼 수 있다.



그림7 항공기연료에 의한 화재

일반적인 설계상황에서 건물의 구조 부재가 파괴에 이르기까지는 고정하중(건물 자체의 무게)의 3배정도가 필요하다. 즉, 재료의 강도가 정상상태의 1/3미만이 되면 붕괴가 촉발될 가능성이 높아진다. 일반구조용 강재는 섭씨 600도에 이르면 항복강도가 1/3으로 떨어지게 되므로, 건물의 화재에 직접적으로 피해를 입은 첫 번째 부재의 온도는 600도 이상으로 상승한 상태였을 것이다.

또 이 부분은 비행기의 충돌에 의해 직접적인 피해도 받은 부분이다. 특히 폭발에 의한 폭풍과 비행기의 잔해는 내화 피복(철골의 표면에 부착된 약3cm내외의 내화성 단열재)을 상당히 손상시켰을 것으로 추측되며, 이로 인해 철골부재의 온도상승이 더욱 용이하게 진행되었을 것으로 보인다.

일반적으로 건축물은 화재에 대비한 설계를 한다. 이 경우 화재를 일으키는 원인으로는 종이, 책상이나 커튼 등 일반적으로 사무실에서 사용되는 것을 상정하게 된다. 그러나 막대한 에너지를 뿜어내는 항공유에 의한 화재라면 내화피복이 온전한 상태에 있었다고 해도, 일반적인 내화피복으로 내화성능을 내기 어려웠을 것이다. 게다가 내화피복이 손상된 경우라면 그 피해가 더욱 클 것이라고 쉽게 추론할 수 있다.

항공기 연료는 1갤론(3.785리터)에  $135 \times 10^6$ J의 에너지를 갖고 있다. 항공기는 보스톤을 출발한 지 얼마되지 않았으므로 20,000갤론(75,700리터)의 연료를 갖고 있었을 것이고, 항공기 연료에 의해 발생될 에너지는  $2.7 \times 10^{12}$ J이 된다. 이는 TNT 642ton에 해당하며 충돌시 발생된 에너지의 800배에 해당한다고 한다.

### 붕괴과정

붕괴의 시작은 수평부재였을 것이다.

강재는 대단히 튼튼한 건축 구조 재료이지만, 상대적으로 접합

부는 약해지기 쉽다. WTC의 수평부재는 철골 단일부재가 아닌 트러스로 설계되었고, 기둥과 보의 접합부에는 바람에 의한 충격을 흡수할 수 있는 점탄성 감쇠기(Visco-elastic Damper)가 설치되어 있다. 결국 모든 하중은 트러스의 상현재(슬래브 부분) 부분의 전단접합 장치를 통하여 기둥으로 전달되게 된다.

충돌에 의해 손상되고 내화 피복의 일부를 잃은 철골 트러스가 온도 상승에 의해 붕괴되면, 트러스에 의해 지지되던 슬래브(바닥판)는 아래층으로 떨어지게 된다. 첫 번째로 붕괴가 시작된 층의 철골부재는 600도 이상이 있을 것으로 추측된다. 떨어진 위층의 슬래브의 하중에 의해 2배의 하중을 견뎌야 하는 아래층 보는 추가로 붕괴된다. 건전한 상태의 부재이면 자기무게와 상부 2개 층 정도의 하중은 견딜 수 있지만 이미 온도상승에 의하여 약화된 보 부재는 이러한 하중을 지지할 수 없었을 것이다.

강재는 섭씨250도 부근에서 경도가 아주 높아지고 부서지기 쉬운 상태가 된다. 따라서 이 때, 충격이 가해졌다면, 첫 번째로 무너져 내린 위층의 하중을 지지하지 못하고 '부서져내렸을' 것으로 추측된다.

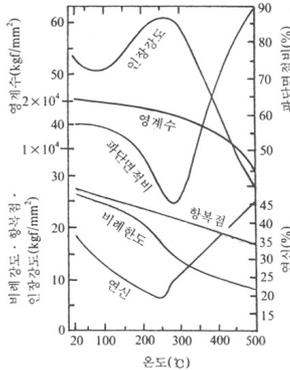


그림8 온도에 따른 강재의 성능변화

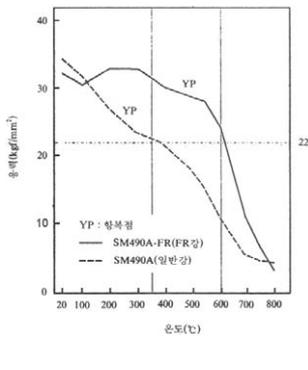


그림9 일반강재와 내화성강의 성능비교

### 두 번째의 붕괴는 내부 기둥이다

정상적인 상황에서는 몇 개의 외부기둥이나 보가 파괴되더라도 건물 전체의 붕괴로 이어지는 않는다. 하지만 주변의 보들이 모두 아래층으로 떨어진 기둥은 좌굴길이가 길어지게 되어 기둥의 파괴가 시작된다. 기둥의 파괴는 연쇄파괴의 시작이다. 기둥이 파괴되면 주변의 모든 슬래브가 아래층으로 떨어지게 되고 인접 기둥의 파괴를 유발한다.

WTC는 바람(또는 지진)에 저항하기 위한 튜브 구조의 횡력 저

항 시스템을 가지고 있다. 튜브 구조는 촘촘한 간격의 최외각 기둥과 최외각 보가 횡력에 저항하는 구조 시스템이므로 외부기둥은 중력하중에 대해 상당한 여유 내력을 가지고 있다.

외부 보다 상대적으로 내력이 부족한 내부 기둥이 먼저 꺾이고, 외부 기둥은 따라서 붕괴하게 된다. 이런 이유로 건물은 마치 폭파 공법으로 건물을 해체하는 것처럼, 건물전체가 넘어지거나 바깥으로 벗어나지 않고, 아래로 가라앉는 형상으로 붕괴된 것이다.(남측 타워-타워2-의 경우 외부기둥의 파괴순서에 따라 충돌지점 위쪽의 건물이 기울어진 채 붕괴가 시작되었을 것이다)

### 이견들

IASS에서 Levy씨는 우리와 달리 내부 기둥의 붕괴가 선행되었을 것으로 판단하고 있다고 발표하였다. 타워의 붕괴 소요시간이 서로 다른 것은 바로 기둥의 압축응력 차이에서 찾을 수 있다는 것이다. 그러나 내부기둥의 경우, 축력만을 받도록 설계되었기 때문에 실제응력/항복응력의 비율이 비슷하게 설계되었을 것이고, 그렇다면 압축력의 크기가 그대로 붕괴의 순서에 영향을 주었다고 보기는 어렵지 않을까 생각된다. 다만, 그렇게 판단할 수 있었던 배경에서는 의견이 일치하고 있다. 즉, 내부 기둥의 마감이 시트재질이었으며 폭발과 함께 마감과 내화피복이 떨어져 나갔을 것으로, 공기의 순환이 되는 외부기둥보다 내부기둥의 온도가 빨리 올라갔을 것이라는 점이다.

붕괴를 유발한 것이 화재라는 점에서는 일치하고 있지만, 좀 더 상세한 순서라던가 원인에 대하여는 서로 다른 의견들이 제시되고 있다. 이미 소개된 Levy씨의 의견이외에, M.I.T.의 Connor 교수는 “화재는 트러스의 접합부를 약화시켰을 것이고 한쪽이 파괴되면서 붕괴가 시작되었을 것이다”라고 말하고 있으며, M.I.T.의 civil and environmental engineering의 Eduardo Kausel 교수는 강력한 화재에 의하여 Floor truss가 먼저 처지면서 파괴되었을 것이라고 추측하고 있다.

### 층 붕괴가 시작되면 도미노처럼 차례차례 무너져 내린다

일단 한층 또는 한 층의 일부(내부기둥)가 파괴되면 상부 2~3개 층 하중이 아래층에 작용하므로 아래층의 보는 견디지 못하고 바로 붕괴된다. 보의 붕괴는 다시 기둥의 붕괴로 이어지고 그 층은

한층 아래로 떨어지게 된다. 저층부의 온전한 기둥과 보도 상층부에서 누적된 몇 개 층의 무게에 의해 보-내부기둥-외부기둥 순으로 순식간에 붕괴하였을 것이다.

앞에서도 언급한 바와 같이 외부 기둥은 내력의 여유가 상당히 크므로, 몇 개 층이 붕괴된 이후 꺾여지는 양상을 보였을 것이다. 신문 등에 보도되는 사진 중에는 건물이 완전히 붕괴된 후에도 저층부의 일부 외부 프레임은 온전한 상태로 남아있는 것을 발견할 수 있다. 즉, 현재 하부층에서 중단된 연속붕괴의 양상이 상부층에서도 똑같이 반복되었을 것이라는 추론이 가능하다.



그림 10 붕괴이후 사진



그림 11 붕괴이후 사진

그림에서 알 수 있듯이, 수평부재와 수직부재의 접합부는 “깨끗이” 떨어져 있는데 이는 붕괴의 순간 파괴형태는 접합부의 전단 파괴였음을 보여주고 있는 것이다. 결국 도미노현상을 일으킨 주요 원인은 접합부였을 것으로 추측하는 이유가 여기에 있다. 만약, 첫 번째 층의 붕괴를 바로 아래층에서 억제할 수 있었다면 건물의 총체적 붕괴를 막을 수 있었거나, 연속적인 붕괴를 지연시켜 소방대원이 대피할 시간을 벌 수 있지 않았을까 생각된다. 그러나 항공유가 연소되는 상황이 계속되었다면 바닥의 붕괴는 피할 수 없는 상황이었을 것이다.

모두 110층의 건물이지만 타워1은 비행기와 충돌 후 1시간 40분 후에 붕괴되고 타워2는 겨우 45분만에 붕괴되었다. 방재의 관점에서 보면, 이 정도의 시간이라면 예기치 않던 항공기의 충격에 대하여 건물의 거주자가 대피하는 데는 충분한 시간을 지연시킨 것으로 볼 수 있다. 강재가 콘크리트보다 열에 약하지만, 어떠한 재료를 사용하더라도 강력한 화재에 노출되어 안전할 수 없다.(우리나라에서는 건설교통부 고시 '내화구조의 인정 및 관리규준'에 의하여 12층 이상의 업무시설은 바닥의 내화성능이 약1000℃ 온도로 가열하더라도 2시간동안 견디도록 되어있다. 위에서 알 수 있듯이 바닥이 무너져내리는 것이 원인이 되어 기둥의 파괴를 유발하고

있으므로 WTC와 같은 구조시스템에서는 기둥의 내화능력은 별 의미가 없다)

충돌과 붕괴에 소요된 시간의 차이는 충돌 위치가 60층이나 80층이나 하는 것과는 무관한 것으로 보인다. 건물이 붕괴되는 도미노가 완성되기까지는 겨우 2~3개 층이면 충분하기 때문이다. 앞에서 지적한 것처럼, 붕괴에 소요된 시간은 화재가 얼마나 강력했는가와 관련되어있다고 봐야 한다. 만약 비행기가 100층에서 충돌했어도 비슷한 결과가 나왔을 것이다.

아마도 테러범은 건물의 붕괴까지는 상상하지 못했을 것이다. 그냥 큰 타격을 주기위해 폭발력이 큰 항공유가 많은 상태로 건물에 돌진한 것인데, 결국은 화재에 의해 110층의 상징적인 건물이 무너져 내린 것이다.

#### 47층의 타워7이 붕괴된 것을 추정하는 것은 매우 어려운 일이다.

WTC인근에 설치되어있는 지진계의 계측에 의하면 비행기의 충돌은 규모0.8, 건물의 붕괴에 의한 충격은 규모2.0정도의 지진에 해당된다고 한다.

뉴욕은 지진이 큰 지역은 아니지만 허리케인이 오는 지역이므로, 강풍에 대하여 안전하도록 설계되어있기 때문에 규모 2.0 정도의 에너지로 붕괴되지는 않는다. 인접해있는 110층 건물이 붕괴되면서 발생한 파편이 외벽 및 수직부재에 상당한 물리적 충격이 가했을 것으로 보이고, 110층 건물이 무너져 내리면서 콘크리트 터미가 지하층 기둥을 밀어 부쳤을 것이므로 하부의 기둥은 상당한 피해를 입은 상태였을 것이다. 또, 지하층 토압을 지지하고 있었던 내부슬래브가 파괴되었으므로, 토압에 의한 영향을 피할 수 없었을 것이다. 결국 이러한 손상이 중력하중에 의해서 확대되면서 하부층부터 붕괴되었을 것으로 보인다. 이 건물은 타워1의 붕괴 7시간 후에 붕괴되었다.

#### 우리나라의 고층건물은

우리나라 고층건물의 대부분은 엘리베이터, 계단실로 이루어진 콘크리트 코어(Core)를 이용하고 있으며, 바깥쪽 기둥을 철골부재로 사용하는 경우라고 하더라도 콘크리트로 튼튼하게 감싸고 있기 때문에 설사 항공기 테러가 있더라도 내화피복의 손상은 제한적일 것으로 판단된다. 따라서 국내의 고층건물은 WTC와 유사

한 테러를 당하더라도, 충분한 시간동안 하중을 지지할 수 있을 것이라고 말할 수 있다.

WTC의 붕괴원인으로 앞에서 제시한 전단파괴에 대하여도 우리나라의 접합부시공방식은 상대적으로 안전하기 때문에, 화재가 일어난 층이 붕괴되더라도 연쇄적인 붕괴로 이어지지 않을 것이다. Levy 씨 역시 발표에서 내부 Core가 RC였다면 WTC의 피해가 훨씬 작았을 것으로 추측하고 있는 것으로 볼 때, 국내의 초고층건물 거주자는 비행기 테러와 같은 비정상적인 하중에 대하여도 상대적으로 안전하다고 할 수 있을 것이다.

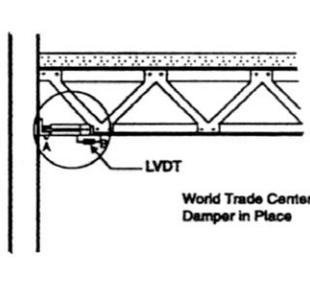


그림 12 WTC의 접합부

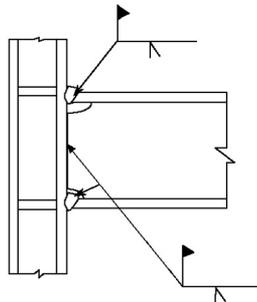


그림 13 우리나라 일반건물의 접합부

앞에서 언급한 것처럼, WTC의 경우 첨단진동감쇠장치가 바람에 의한 상시 진동을 줄이기 위하여 설치되어있는데, 이러한 장치를 설치하기 위해서 접합부의 내력이 중력하중에 견딜수 있는 최소한으로 제한되었던 것에 연쇄적인 붕괴의 원인이 있다.

그러나, 국내에서 일반적으로 사용되는 철골 접합부 상세는 그림에서 보이는 것처럼, 보의 전체에 대한 접합이 이루어지고 있다. 좌측의 WTC의 상세와 비교하면 접합부가 얼마나 튼튼한지 알 수 있다. 즉, 우리나라의 경우 충격하중이 발생하더라도 이것이 연쇄적인 전단파괴로 이어지지 않을 것임을 알 수 있는 것이다.

이는 우리와 비슷한 접합상세를 적용하고 있는 일본의 경우에서 유추할 수 있다. 고베시청의 경우 지진에 의해서 한 층이 완전히 붕괴되었지만, 이 붕괴가 아래층으로 계속되지 않을 수 있었던 이유는 보-기둥 접합부가 전단력에 대하여 충분한 안전율을 가지고 있었기 때문이라고 판단된다. (WTC의 파괴양상과 고베지진에 의한 고베시청의 파괴양상은 다르지만, 전단력에 대한 부재의 안전율을 유추해볼 수 있을 것이다)

## 결언

초고층건축물이 테러의 대상이 된 것은 어제오늘의 일이 아니며, 과거 미국의 대사관에 대한 폭탄테러가 있는 이후, 테러에 대하여 건축물의 안전을 확보해야한다는 의견이 활발히 제시되어 왔다.

현재 국내 건축물은 건축물에 적재되는 하중 이외에 태풍과 지진 규모 5.5의 지진에 대하여 안전하도록 설계되고 있다. 태풍의 경우, 확률적으로 특정 건물에 100년에 한번 발생하는 정도의 크기이고, 지진규모 5.5는 우리나라에서 500년에 한번 정도 발생할 확률을 가지고 있다고 한다.

이번 사례로부터 초대형건축물에 있어서 건축물의 수명이 다할 때까지 경험할 위협적인 하중은 바람이나 지진보다는 항공기의 추락이나 테러와 같이 인간에 의한 것일 수가 있다는 점이 대두되었다. 따라서 초대형건축물의 설계에 있어서 이와 같은 비정상적인 하중을 반영하여야 하는 것인지에 대한 국민적인 합의가 도출되어야 할 시점이 아닌가 생각된다. 일본의 고베지진 사상자수와 WTC의 사상자수가 비슷한 정도라면, 이러한 비정상적인 하중에 대하여 새로운 관점으로 바라보아야 하는 당위성을 찾을 수 있겠다.

현재에도 원자력시설의 설계는 항공기의 추락이나 미사일의 폭격을 고려하고 있는 점을 생각한다면, 기술적으로는 커다란 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 대형건물에 대하여 이러한 비정상적인 하중을 상정하고 설계에 반영하는 것은 자체로 시공비의 증가, 설계비용의 추가, 설계일정의 지연 등과 같은 비용을 지불하여야 하며, 건축적인 제약으로 인한 활용도의 축소와 같은 제반비용의 상승으로 이어져 시공회사와 입주자 모두에게 불리하게 작용하기 때문에 현실적으로는 적용이 쉽지 않을 것으로 판단된다.

이번 사건을 계기로 주요건물에 대한 방재 시스템을 다시 한 번 살펴보아야 할 것이며, 초대형 건축물에 있어서 과연 테러에 대비하는 설계가 이루어져야 할 것인지에 대한 사회적인 합의가 필요한 시점이라고 생각된다. **KSEA**