

# 세계무역센터 붕괴 최종보고서 [요약]

## Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers

### 1. 서론

지난 2001년 9월 11일, 미국 뉴욕의 세계무역센터에 테러리스트에 의해 납치된 두 대의 항공기가 충돌하는 사건이 발생하였다. 이 충돌로 인해 110층의 쌍둥이 빌딩이 완전히 붕괴되고, 수천 명이 사망하였다. 냉전 이후 세계 유일의 강대국으로 군림하던 미국의 심장부에 가해진 이 공격으로 문명의 충돌이 큰 이슈로 떠오르고 테러와의 전쟁이 시작되는 등 전 세계적으로 엄청난 파급효과를 발생시켰다.

NIST(미국 국립표준기술원)는 2002년 10월 의회의 결의로 조사에 착수하여, 2005년 9월에 세계무역센터 붕괴에 대한 최종 보고서를 발간하였다. 이 조사는 건물의 구조 및 건축 부재 등을 상세히 파악한 후 항공기의 충돌 이후 세계무역센터 건물의 붕괴 원인 및 붕괴 과정을 규명하고, 건물의 피난 상황을 재구성하여 향후 건물의 구조적 안전 및 인명 안전을 향상시키는 것을 주목적으로 하였다.

이 보고서의 작성을 위하여 사용된 자료는 다음과 같다.

1. 사진 및 영상 자료
2. 세계무역센터 건물 설계, 건설, 운영에 관련된 모든 문서
3. 현장에서 수거된 철골 잔해
4. 건물의 붕괴 재현을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

이 글에서는 세계무역센터 붕괴에 대한 최종 보고서를 토대로 세계무역센터의 붕괴 과정을 설명하고, 피난 및 방재 측면에서 얻을 수 있는 내용들을 제시하고자 한다.

### 2. 세계무역센터 소개

세계무역센터(World Trade Center, WTC)는 뉴욕시를 세계 상업의 중심지로 만들어 많은 국제무역회사들의 본거지로 삼겠다는 계획에 따라 뉴욕 및 뉴저지 항만청에 의해 7개 건물로 건축된 복합 업무단지이다. 두 개의 110층 쌍둥이 빌딩(WTC1, WTC2로 명명)이 세계무역센터의 핵심 건물들이었으며, 건축당시 세계에서 가장 높은 건물로서 뉴욕의 랜드마크 마크이자 세계의 초강대국으로 발돋움하는 미국의 상징적인 건물이었다. 최대 수용인원은 2만여 명이었으며, 일일 유동인구는 방문자 포함 15만 명에 달하였다.



- 높이 : 417m
- 바닥크기 : 63m × 63m 정방형
- 층수 : 110층
- 연면적 : 400,000m<sup>2</sup> (층당 약 4,000m<sup>2</sup>)
- 설계자 : 미노루 야마사키
- 주용도 : 사무용 건물

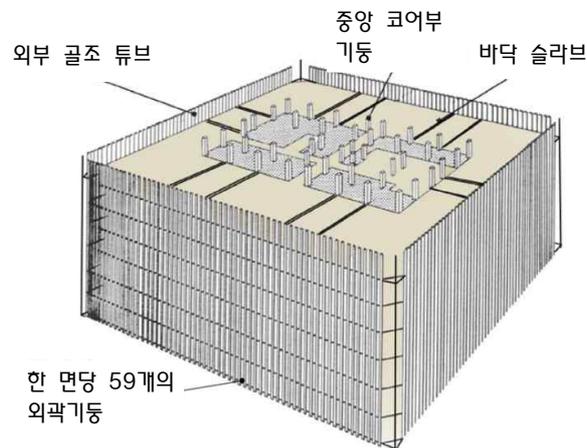
[그림 1] 세계무역센터의 전경

### 3. WTC의 구조적 특징

WTC는 골조 튜브 구조의 견고한 구조로 설계되었고 초고강도의 강재를 사용하여 건축되었기에 항공기의 충돌에도 견딜 수 있었다.

#### 가. 골조 튜브 구조

WTC는 당시로서는 매우 혁신적이었던 골조 튜브의 개념을 도입하였다. 건물의 외곽기둥이 코어부의 기둥과 함께 수직하중을 분담하도록 하였는데, 외곽기둥들은 모두 연결되어 건물의 외벽이 일체인 튜브를 형성하도록 하였다. 이를 통해 중앙에 집중된 코어부의 기둥과 외곽기둥이 하중을 지지함으로써 실내에는 기둥이 없는 넓은 공간을 확보할 수 있었으며, 전체가 연결된 외벽은 지상에 솟은 캔틸레버와 같이 거동하며 수평하중을 지지하도록 하였다. 특히, 엘리베이터 및 각종 수직 샤프트들은 코어부에 집중시켜 층의 공간 활용을 극대화하도록 하였다. 코어부에는 하중지지를 위한 47개의 기둥이 존재하였다.

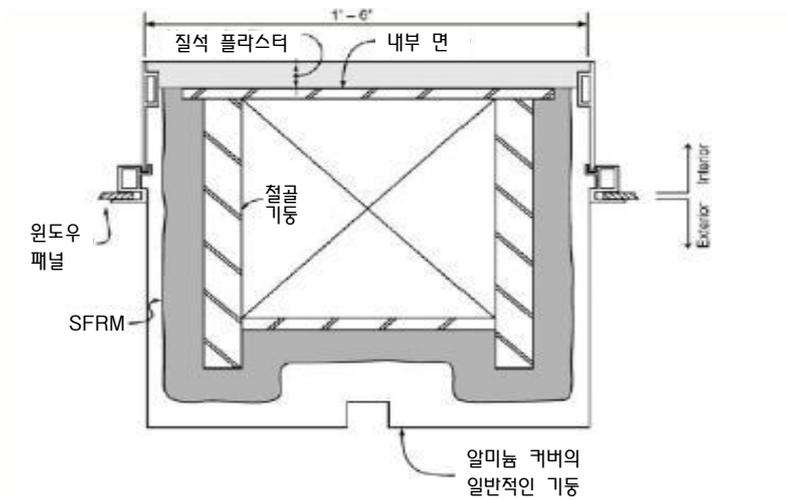


[그림 2] 골조 튜브 구조 개념도

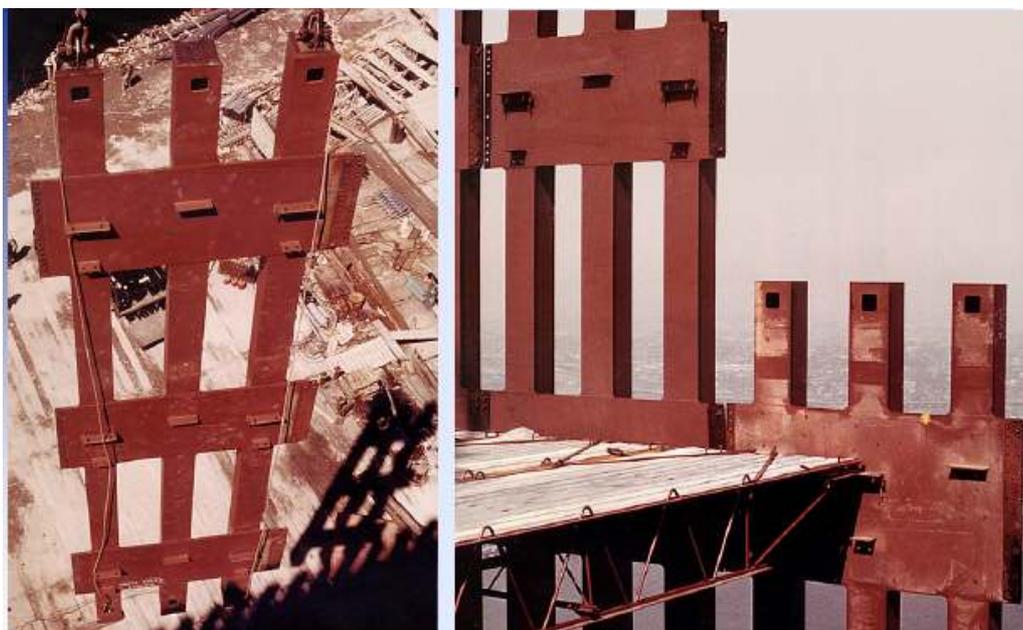
### 나. 외곽기둥

골조 튜브 구조를 위한 가장 핵심적인 요소는 외곽기둥이었다. 외곽기둥은 한 면에 59개씩 배치되었고, 전체 외곽기둥은 일체로 연결되어 튜브 구조를 형성하였다. 외곽기둥은 전층에 걸쳐 균일한 크기를 유지할 필요가 있었다. 따라서 외곽기둥은 4개의 강판을 용접시킨 박스 형태로 제작되었으며, 층고가 높아질수록 강판의 두께를 감소시키는 방법으로 기둥의 크기를 일정하게 유지하였다.

외곽기둥은 공기단축과 견고성 향상을 위해 넓은 스패드럴을 사용하여 3개 층 높이의 기둥 3개를 연결한 패널형태로 제작되었다. 이러한 패널은 지상에서 제작되어 건물에 조립되었으며, 잇갈려 연결됨으로써 튜브 구조의 견고성을 향상시켰다.



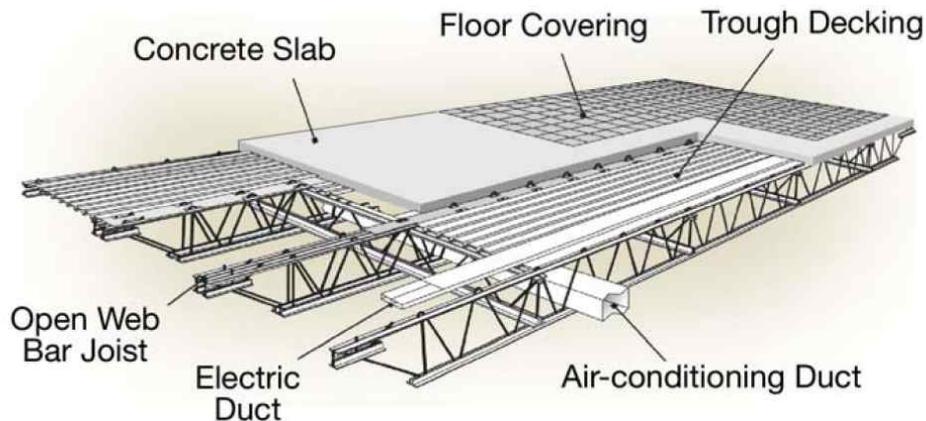
[그림 3] 외곽기둥의 단면도



[그림 4] 외곽기둥 패널의 모습

#### 다. 바닥구조

튜브 구조를 형성한 외벽과 코어부 사이는 트러스로 연결되어 바닥구조를 형성하였다. 이러한 연결을 통해 외벽과 코어부 모두 수평안정성이 강화되었다. 트러스 상부에는 금속제 데크가 덮여진 후 경량 콘크리트 슬래브로 바닥이 완성되었다. 트러스의 웨브는 연장되어 콘크리트 슬래브와 트러스를 일체화하였으며, 트러스 하현재와 외곽기둥의 연결부에는 지진 등의 진동을 감쇄시키기 위한 점탄성 감쇄기(Viscoelastic Damper)가 설치되었다.



[그림 5] 바닥구조 개념도

#### 라. 해트트러스

건물의 최상부에는 외벽과 코어부를 연결하고 안테나를 설치하기 위한 해트트러스(Hat truss)가 설치되었다. 외벽과 코어부가 연결됨으로써 항공기 충돌로 일부 하중지지구조가 파괴되었을 때 하중 재분배가 가능하였고, 건물의 즉각적인 붕괴를 막을 수 있었다.

#### 마. 수직샤프트의 벽 패널

건물의 코어부의 벽체는 내력구조일 필요가 없었으므로 내화성능을 갖는 석고보드 패널로 구성되었다. 이로 인해 항공기 충돌시 코어부의 벽체는 매우 쉽게 파괴되었으며, 화재가 확산되고 구조부가 약화되는 주원인이 되었다.

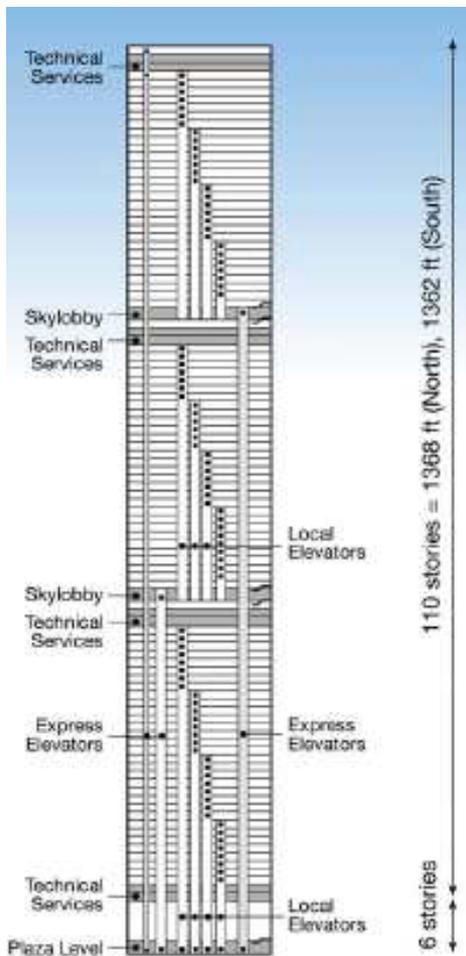
#### 바. 강재

철골 구조로 건설된 WTC에는 두 개의 건물에 약 200,000 ton의 강재가 사용되었다. 2,460~7,030 kgf/cm<sup>2</sup>에 달하는 초고강도의 강재가 사용되었으며, 시공단계에서도 설계문서에 규정된 강도요건을 초과하는 강재를 사용하였다.

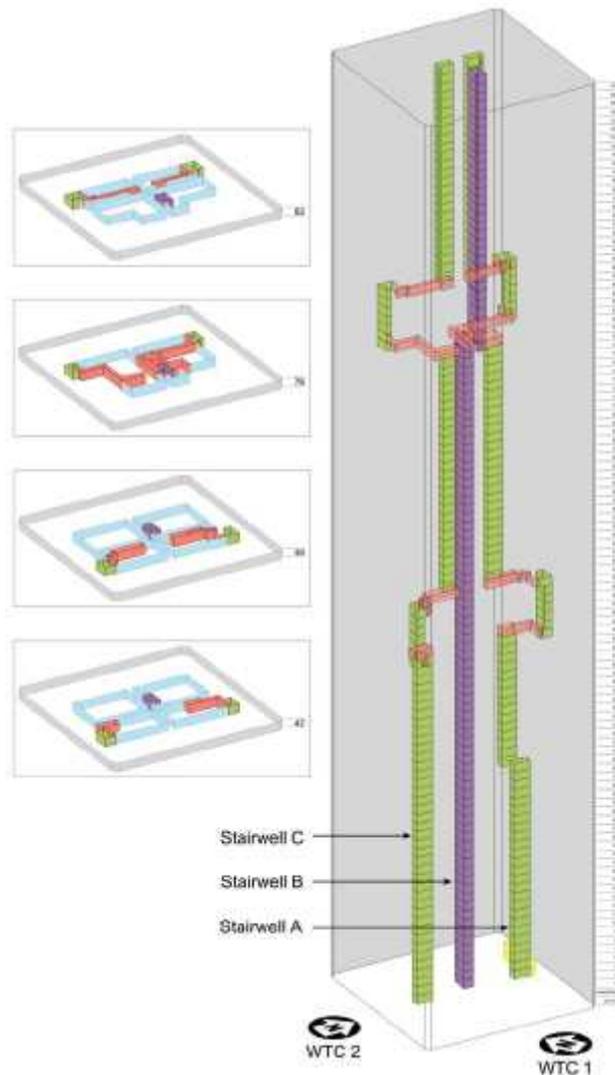
**사. 엘리베이터와 계단**

WTC의 코어부에는 엘리베이터와 계단이 설치되었다. 엘리베이터는 3단 구조로서 전체 층을 3개의 구역으로 나누고, 각 구역에는 중간로비(skylobby)가 설치되었다. 그러므로 지상에서는 고속엘리베이터를 타고 해당 구역의 중간로비로 이동한 후, 일반엘리베이터를 타고 이동하는 형태가 되었다.

건물을 관통하는 계단실은 주요 피난수단이었다. 3개의 계단이 존재하였는데 피난용량에 부족하지 않은 크기였으나, 최상층에 존재했던 전망대와 스카이라운지 등 다중이용시설의 이용객들이 몰리게 되는 상황은 고려되지 않았다. 계단은 수직으로 연속되지 않아 일부 층에서 환승복도를 거쳐야 하였으므로 피난의 장애요소가 되었다.



[그림 6] 엘리베이터 구조



[그림 7] 계단 구조 : 계단실이 환승복도로 연결된 부분이 존재한다.

#### 4. WTC의 방재시설

스프링클러설비는 WTC 1,2 전 층에 설치되어 있었다. 뉴욕시의 급수관에 연결된 주급 수원이 존재하였으며, 작동시 약 418m<sup>2</sup>의 면적에 주수할 수 있는 능력의 설비였다. 이 소화능력은 규정의 3배였으나, 한 층의 면적에 비하면 매우 작은 수치이다. 다수의 수직배관이 설치되었으나, 층별로 연결된 연결지점은 한 곳뿐이어서 고장에 취약한 면이 있었다.

또한 3개의 계단실에는 연결송수관설비에 의한 옥내소화전이 설치되었다. 건물에는 6개의 19톤 규모의 저수조가 스프링클러와 연결송수관설비를 위하여 설치되어 있었으며, 이중 3개는 최상층에 설치되어 건물의 진동을 감쇄시키는 무게추의 역할을 하였다.

건물에는 자동식 화재감지설비가 설치되었으며, 제어반에서 감시가 가능하였다. 중요한 경보수단으로서 수동식 발신기도 설치되었으며, 음성 및 경보스피커가 설치되었다.

제연설비로는 수동으로 작동되는 연기배출설비가 설치되어 있었다. 이 설비는 공조설비와 겸용으로 사용되었다.

항공기의 충돌로 인하여 건물의 수직배관 및 덕트가 파손되었고, 그로인해 발생한 화재의 규모가 증대하였으므로 WTC의 방재시설은 제 기능을 발휘할 수 없었다. 또한 항공기의 충돌 자체가 엄청난 충격을 가져왔으므로 사람들은 즉각 심각한 사태가 발생하였음을 인지하였다. 그에 따라 경보설비도 그 효용성이 없었고, 오히려 잘못된 안내방송으로 인한 피난 시 혼선이 일부 발생하였다.

#### 5. 사고로 인한 붕괴 메커니즘

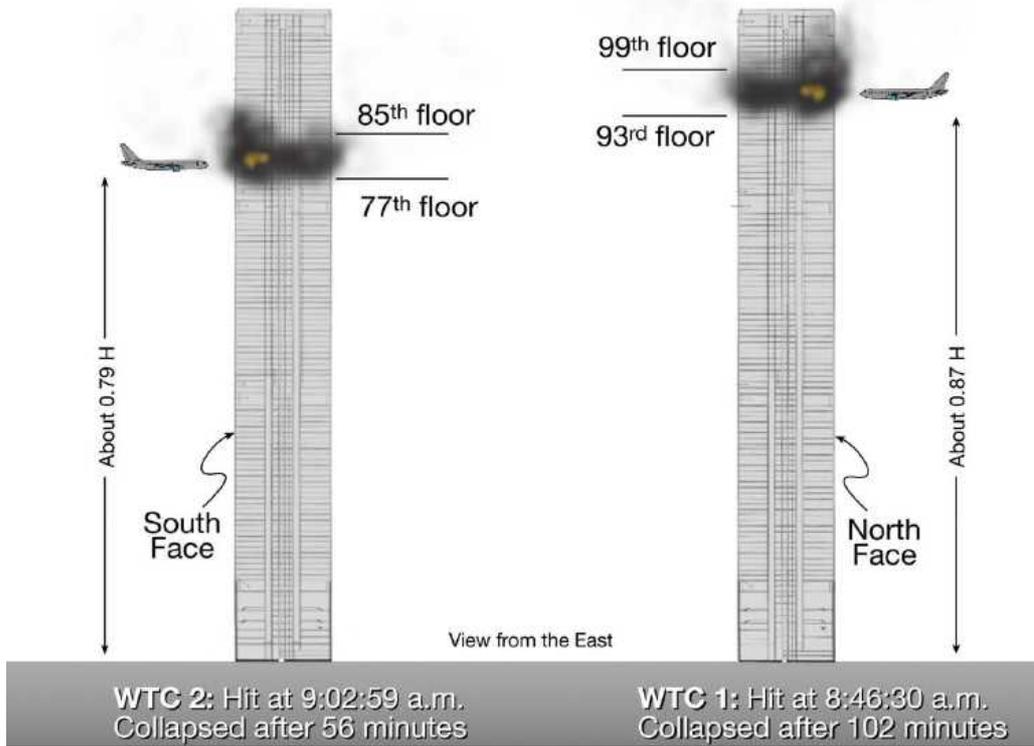
사고 후 건물이 완전히 붕괴되었으므로, 물리적인 증거물 및 현장상황은 확인할 방법이 없었다. 그러므로 건물의 외관을 촬영한 자료 외에는 컴퓨터 시뮬레이션이 사고의 재구성을 위한 주요 수단으로 사용되었다. 컴퓨터 시뮬레이션은 실제 붕괴 과정을 상당히 정확하게 재현한 것으로 평가되고 있다.

##### 가. 항공기의 충돌

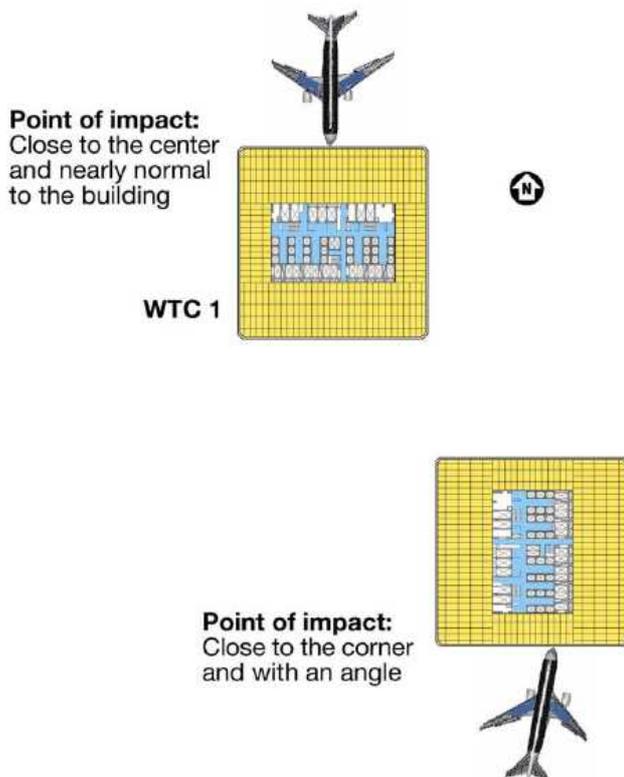
항공기의 충돌은 WTC 붕괴의 직접적인 원인이다. 보잉 767-200ER 모델의 항공기가 충돌하면서 충돌면의 외곽기둥을 절단하고, 코어부까지 도달하여 코어부의 기둥을 절단하였다. 이로 인해 파손된 구조부에서 지지하던 하중이 파손되지 않은 구조부로 전달되면서 과부하를 유발시켰다. 또한 강한 충격으로 건물 주요구조부의 내화피복을 광범위하게 탈락시키면서 철골구조를 노출시켰다.

두 WTC 타워에의 충돌방향이 달랐는데 WTC 2에는 항공기가 코어부에 더 깊이 충돌

하면서 코어부의 중요기둥을 파손시켰고, 이로 인해 구조적인 손상이 더 크게 되어 WTC 1보다 먼저 붕괴하였다.



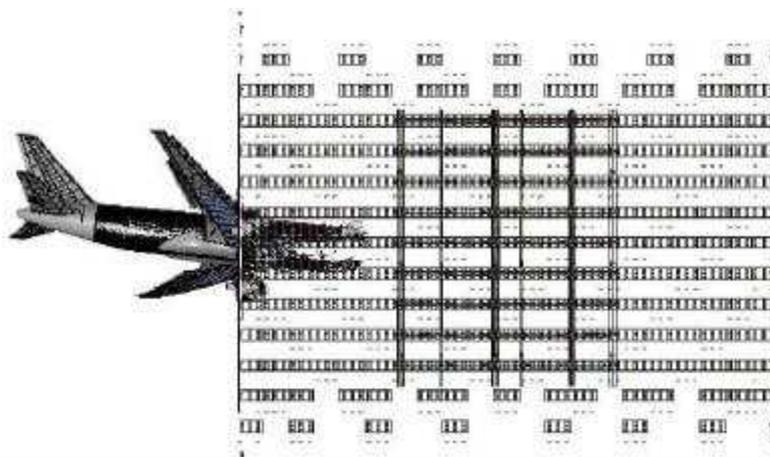
[그림 8] 세계무역센터에 충돌하는 항공기 개념도



[그림 9]

항공기 충돌의 각도

WTC 2 : WTC2에는 항공기가 코어부에 깊이 도달하여 구조적 손상이 더 컸다.



[그림 10] 항공기 충돌 시뮬레이션

#### 나. 화재 발생

항공기는 견고한 구조부에 충돌되면서 완파되었고, 이때 항공기의 날개에 적재되어 있던 연료가 분무화되면서 점화되어 화재를 발생시켰다. 일부 연료는 수직 샤프트를 타고 내려가면서 하층에서도 폭발을 일으켰으며, 이로 인해 저층부에서도 폭음이 발생하였다.

NIST의 분석에 의하면 항공연료 자체는 화재하중이 작았고 화재를 발생시키는 역할을 하는데 그쳤으며, 대부분의 화재하중은 사무실공간의 수용품이었다. 항공기의 충돌로 인해 철골이 노출된 구조부는 600℃ 이상의 온도에 도달하여 강도가 급격히 약화되었다.

#### 다. 연쇄붕괴

연쇄붕괴는 바닥트러스의 침하로부터 시작되었다. 내화피복이 탈락된 바닥트러스는 화재로 인하여 강도가 약화된 상태에서 하중에 의해 아래쪽으로 가라앉기 시작하였다. 그에 따라 바닥트러스에 연결된 외곽기둥은 건물 안쪽으로 장력을 받게 되었다. 일부 구조부의 파손으로 인하여 과부하가 걸려있던 외곽기둥에 장력이 작용하면서, 외곽기둥은 하중 지지력을 상실하였고 그에 따른 하중이 인근 기둥의 과부하를 가속시키면서 붕괴가 시작되었다.

항공기의 충돌부위 위쪽의 상층부가 내려앉으면서 마치 망치와 같이 하부구조를 강타하였고 열적으로 약화되어있던 건물에 치명적인 충격을 가하였다. 이러한 가속작용으로 인하여 건물이 완전히 붕괴되었다.



[그림 11] WTC 2의 외벽 : 바닥의 침하로 인해 외곽기둥이 안쪽으로 휘어짐.



[그림 12] 붕괴하는 WTC 2

## 6. 피난분석

WTC의 붕괴는 2,747명이 사망하는 대참사였다. 그러나 사건 당시 두 건물에 약 1만 6천명이 근무하고 있었던 것을 감안하면 피난은 성공적이었던 것으로 평가된다. 건물 전체 인원의 84%가 피난에 성공하였고, 항공기가 충돌한 층 아래에 있던 사람들만으로 계산하면 99%가 피난에 성공하였다.

WTC의 피난시간은 항공기가 충돌하면서 시작되었다. 항공기의 충돌이 엄청난 굉음과 진동을 발생시켰으므로, 경보설비의 도움 없이도 즉각적인 피난 상황임을 인지할 수 있었다. NIST에서는 평균적으로 충돌 후 3~5분 사이에 피난이 시작된 것으로 파악하고 있다.

피난수단은 건물 내 3개의 계단이었는데, 건물의 모든 인원이 집중되었으므로 피난 속도는 1분당 1개 층 하강의 수준으로 느린 편이었다. 건물 내 인원의 6%에 달했던 거동 불편자들이 계단실에서 함께 이동하여 이동속도를 감소시켰으며, 저층부에서는 소화활동을 위해 상층부로 이동하던 소방관들과의 엇갈림도 있었다. 특히 일부 층에서 계단이 연속되지 않고 환승복도를 지나야 했던 점은 피난에 큰 혼란을 가져왔다.

계단실에는 파손된 샤프트 벽체의 잔해와 파손된 배관으로부터 흘러나온 물이 흐르고 연기가 침입하여 피난에 어려움을 초래하였다.

항공기 충돌부의 상층부에서는 계단실의 파괴로 인해 피난이 불가능하였다. WTC1에서는 충돌 층의 코어부에 3개 계단이 몰려있었으므로 계단실이 완파되었으며, WTC2에서는 코어부에서 떨어진 쪽의 계단이 파괴되지 않고 남았으나, 18명만이 그 계단으로 피난에 성공하였을 뿐, 나머지 사람들에게 파괴되지 않은 계단실이 존재한다는 사실은 전달되지 못하였다.

WTC는 1993년 이미 폭발물 테러 사건이 발생하여 전 층 피난이 실시되었던 경험이 있었고, 그 이후 소방 훈련이 철저하게 실시되어 사건 당일 생존자의 2/3은 소방훈련을 받

은 사람들이었다. 또한, 이른 아침시간이라 건물에 최대수용인원에 못 미치는 사람들이 있었던 점과 충돌부위가 상층부여서 대다수 인원이 피난이 가능했던 점은 희생자 수가 적을 수 있었던 원인이었다.

## 7. 결론

### 가. 세계무역센터의 붕괴

세계무역센터는 1960년대의 최신기술을 사용하여 설계 기준을 초과하는 견고한 구조로 건축되어 항공기의 충돌을 견뎌낼 수 있었다. 그러나 내화피복의 탈락과 그에 따른 철골의 온도상승으로 인해 건물이 완전히 붕괴되었다.

사고로 인한 사망자가 2,747명이나 발생한 대형 참사였으나, 건물의 피난성공률은 84%에 달할 정도로 순조로운 피난이 이루어졌다.

건물은 당시의 모든 건축 관련 규정을 초과하여 만족하였고 충분한 방재시설을 갖추고 있었으나, 항공기의 충돌은 이러한 요소들을 무력화시킬만한 것이었다.

### 나. 보완사항

NIST는 최종보고서에서 사고조사의 결과로부터 건물의 구조적 성능과 인명 안전을 향상시키기 위한 권장사항을 제시하였다. 이러한 권장사항은 건물의 붕괴 원인과 피난의 방해요소를 분석하여 도출되었다.

#### (1) 구조전 보전성 증대

구조의 견고성을 강화시키기 위해서 잠재적 위험(연쇄붕괴, 바람 등)의 하중효과를 평가하기 위한 기준 및 위험효과를 감소시키기 위한 구조시스템 및 설계향상이 요구된다.

#### (2) 구조물의 내화성능 강화

건축물 등급 및 내화등급의 기술적 기준을 향상시키고, 기존의 내화시험방법에 대한 기술기준 향상으로 구조적 프레임에 의한 접근법 사용 및 뿔철형 내화물질에 대한 성능요건 및 개선된 기준의 개발이 요구된다.

#### (3) 구조물 내화성능설계의 새로운 방법

성능기반 설계방식을 이용한 기존방식 보완과 새로운 내화피복재료 및 기술을 개발하고, 구조의 내화성능을 전체시스템으로 평가할 수 있는 지침, 기법 및 시험방법 등의 개발이 요구된다.

#### (4) 능동적 화재방호 개선

화재방호설비(스프링클러, 연결송수관, 화재경보, 제연설비 등)의 설계, 신뢰성 및 성능

의 중복성을 향상시켜 화재방호 능력을 강화하는 것이 요구된다.

#### (5) 건물 피난 개선

안전하고 신속한 탈출을 용이하게 하고, 거주자와 분명한 통신체계 확립, 거주자가 비상피난시 그들의 역할 및 의무에 대해 보다 잘 준비할 수 있는 피난기술을 사용할 수 있는 피난시스템의 개발이 요구된다.

#### (6) 비상대응 개선

건물접근, 대응활동, 비상통신 및 대규모 피난 시 지휘, 통제가 용이한 절차와 기술 개발 절차, 실행기준의 개선과 건물의 설계, 건축, 유지관리 및 운영에 사용되는 실행기준 개선이 요구된다.

#### (7) 교육 및 훈련

건물 및 화재엔지니어의 전문적 기술 향상을 국가차원의 교육 및 훈련 방식으로 업그레이드할 것이 요구된다.

---

출처 : 1. Final Report on the Collapse of the World Trade Center. NIST

2. NIST의 세계무역센터 붕괴에 대한 조사 웹사이트. <http://wtc.nist.gov>

번역 및 정리 : 조사연구팀 안승일