

세계무역센터(WTC)의 붕괴에 대한 화재안전공학적인 고찰

성시창 | 건축구조부 선임연구원

1. 머리말
2. WTC 타워의 구조 특성
3. WTC 타워의 붕괴 원인 규명
4. WTC 타워의 화재안전 미비점
5. WTC 타워의 피난 및 방호 시스템
6. 방재 대책
7. 맺음말

1. 머리말

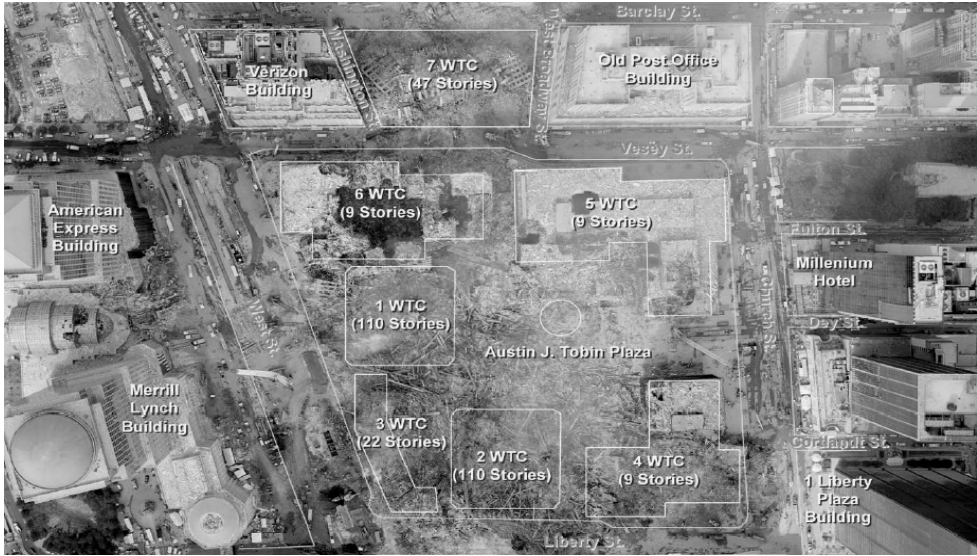
2001년 9월 11일 아침, 미국 경제 및 금융의 상징이자 쌍둥이 빌딩으로 잘 알려진 뉴욕 맨해튼의 지상 110층 높이인 세계무역센터(WTC) 타워는 테러리스트들에 의한 항공기(보잉 767) 충돌 테러에 의해 차례로 붕괴되면서 역사 속에서 영원히 사라지게 되었다. 9/11 테러 이후 미국 정부는 기술표준국(NIST)을 중심으로 200여 명의 전문가 및 약 2,200만 달러에 달하는 비용을 긴급 투자하여 WTC 타워의 붕괴 원인에 대해 광범위한 조사를 실시하였으며, 그 결과 NIST는 2004년 6월 경 무려 1,000 페이지에 달하는 중간 보고서를 내놓았고 2005년 9월에는 최종 보고서를 내놓을 예정이다.

WTC 타워의 참사는 미국의 초고층 건축물의 화재안전과 관련하여 그 이전에는 전혀 고려하지 못했던 새로운 문제점을 제시하였는데 즉, 항공기 테러와 같은 대규모의 인위적 위협을 모든 초고층 건축물의 화재안전공학적인 설계에 반영하여야 하는 것이며, WTC 타워 참사의 값비싼 희생은 초고층 건축물의 설계시 비행기 테러에 의한 위협 여부의 검토 및 초고층 건축물의 방재 대책에 대한 재검토 필요성 등 많은 교훈을 제공하게 되었다.

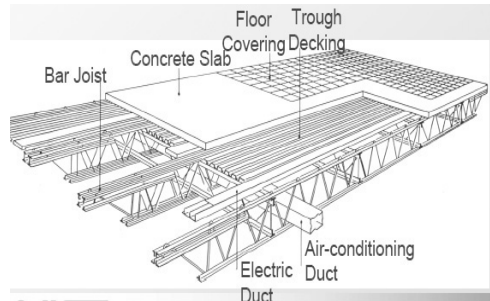
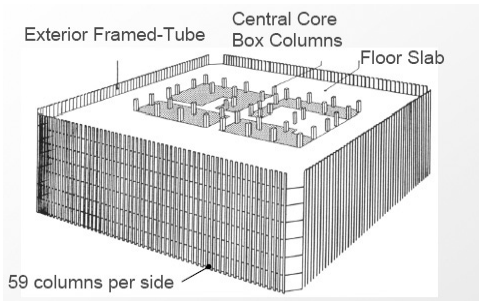
본고는 WTC 타워 붕괴 원인의 화재안전공학적인 고찰과 관련하여 관련 문헌 및 미국의 NIST 조사 보고서를 중심으로 정리한 내용을 소개한 것으로서, 방대한 분량의 관련 자료를 소개하는 한계점을 미리 밝혀둔다.

2. WTC 타워의 구조 특성

WTC는 [그림 1]과 같이 모두 7개의 건물(WTC 1 ~ WTC 7)로 건물 군을 형성하고 있으며 이 중 9/11 테러의 주요 대상이 되었던 WTC 타워(WTC 1과 WTC 2)는 1968년 착공되어 각각 1972년과 1973년



[그림 1] WTC Complex의 각 건물 별 배치 사진



[그림 2] WTC 타워의 구조 시스템

준공된 높이 110층(약 420 m)의 쌍둥이 빌딩이다.

WTC 타워는 건축 당시 혁신적인 구조 시스템이 채택되었으며 다음과 같은 구조적 특성을 가진다.([그림 2] 참조)

- 외벽은 각 면에 59개의 기둥으로서 Framed-Tube 형태로 구성
- 중앙 코어는 박스 기둥
- 스패의 open-web bar 장선 및 스프레이 피복을 사용한 합성바닥 트리스 구조

3. WTC 타워의 붕괴 원인 규명

3.1 WTC 타워 붕괴의 의문점

WTC Complex의 WTC 1(북쪽 타워)은 오전 8시 46분에 비행기가 충돌하여 약 102분 후에 붕괴되었고, WTC 2(남쪽 타워)는 오전 9시 2분에 비행기가 충돌하여 56분 후에 붕괴되었다([그림 3] 참조). WTC 타워의 붕괴 원인 조사에 참여한 많은 전문가들은 이에 대해 다음과 같은 의문점을 바탕으로 조사에 착수했다.

- 1) 왜, 어떻게 WTC 타워는 비행기의 초기 충돌에 이어 붕괴되었나?
- 2) 왜, 어떻게 외관상 동일한 비행기에 의해 충돌

되었음에도 불구하고 WTC 1은 WTC 2의 붕괴 시간 보다 2배 정도를 버틸 수 있었나? (102분 : 56분)

- 3) 왜, 어떻게 47층의 WTC 7이 붕괴되었나?
- 4) 왜 건축물 방호의 기술적 관점, 재실자 거동, 피난, 비상조치 및 건물 위치에 따라 사상자 수가 적거나 또는 많았는가?
- 5) WTC 타워의 설계, 건축, 운영, 유지관리 절차 및 실무 사항이 국가 규격과 법규에 얼마나 잘 일치하는가?
- 6) 원인 조사 결과가 이번 9/11 테러에만 적용되는 유형의 것인가, 아니면 일반 건축물에서도 관련 될 수 있는 것인가?

3.2 붕괴 원인 조사

WTC 타워의 붕괴 초기에는 붕괴의 원인이 명확히 규명되지 못하였으며 따라서 다음과 같은 의견들이 그 원인으로 제시되었다.

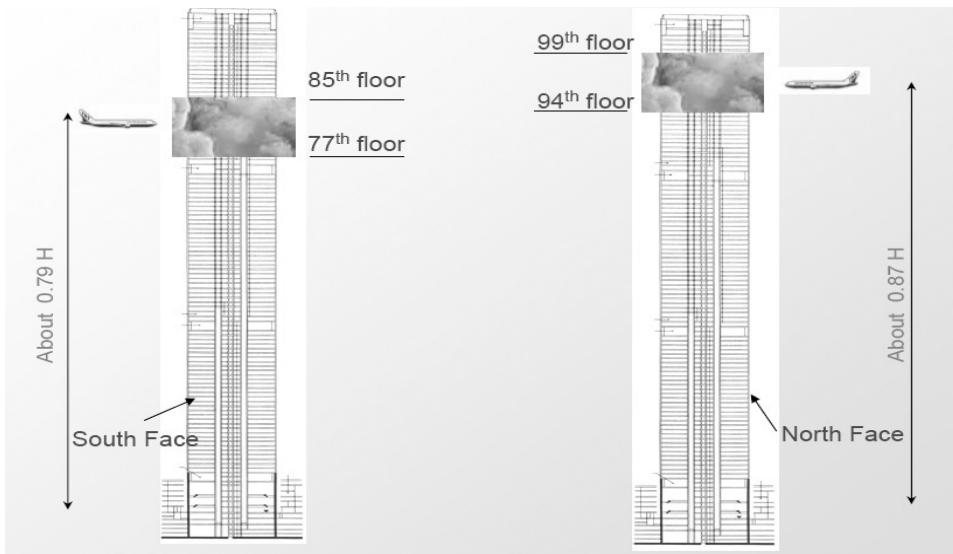
1) 비행기 연료 화재가 주요 원인이며 이로 인해 붕괴가 촉진됨.

2) 강재가 녹아내리거나 연약해짐.

3) 무게 124 톤으로서 850 km/h로 비행 중이던 보잉 767에 의한 이번 테러는 무게 100 톤으로서 290 km/h로 비행하는 보잉 707에 견딜 수 있도록 설계 된 WTC 타워에는 너무 심한 충격임.

WTC 타워의 중량은 약 750,000 톤으로서 보잉 767의 약 5,500배에 이른다. 이 비행기들을 정지시키기 위해 소모되는 에너지는 약 4 GJ이며 WTC 타워의 350 mm 각형 박스 기둥들은 각 타워의 약 6 mm 인 외벽판과 더불어 부분적 또는 전체적으로 이 에너지를 흡수할 수 있다. 그러나 궁극적인 의문은 어떤 충격이 타워 내부에 전달되었느냐 이다. 이에 대해서는 건물 내부 코아의 강재 기둥이 손상되었다거나 단열재가 날아가 버렸다거나, 또는 바닥 트러스 구조가 심하게 손상되었다는 등 많은 이견이 제기되었다.

WTC 1 및 WTC 2의 붕괴 원인에 대하여 초기에는 비행기와 엄청난 양의 항공 연료가 원인인 것으로 돌려졌으며, 몇 가지 간단한 분석이 이러한 주장을 뒷받침했다. 각 비행기는 충돌 시 기체 내에



(a) WTC 2(충돌 56분후 붕괴)

(b) WTC 1(충돌 102분후 붕괴)

[그림 3] WTC 1 및 WTC 2의 비행기 충돌 부위 및 붕괴 시간

10,000 gallons(37 m³)의 항공 연료를 가지고 있었던 것으로 추정된다. 연료가 전체 바닥(63m×63 m)에 걸쳐 연소될 경우, 항공 연료(JP-4)의 총 연소율은 242 g/s가 된다. 10,000 gallons의 항공 연료는 질량이 약 28,500 kg에 달하며 비행기 충돌로 인해 직경(D) 약 60 m의 4개의 fireball이 발생되었다. 이러한 fireball로 연소된 질량 크기(M)는 다음과 같이 추정된다.

$$M = \left[\frac{D}{5.25} \right] - (1/0.314), \text{ 또는 매 충격 당 약 } 9,400\text{kg}$$

한편, WTC 타워 붕괴 이후 초기의 일부 단계에 의한 조사 결과에서는 충돌 이후 발생한 화재가 기둥이 연약해 지는 데 상당한 기여를 한 것으로 간주하고 주요 내력 코어 기둥을 포함한 기둥의 심각한 손상이 건물 붕괴의 원인이라고 밝혔다. 그러나, WTC 타워의 직경 27.7 mm 트러스 환봉(rod)의 구조 분석 결과, WTC 타워의 추정 화재온도인 900℃에서의 트러스 환봉의 온도 상승은 (그림 4)와 같으며 트러스 환봉의 좌굴에 필요한 임계 온도는 (630~770)℃ 로서, 따라서 평균 700℃의 임계 온도에서 남쪽 타워(WTC 2) 및 북쪽 타워(WTC 1)의 붕괴 시간은 각각 58분 및 97분으로 예상된다. 이 시

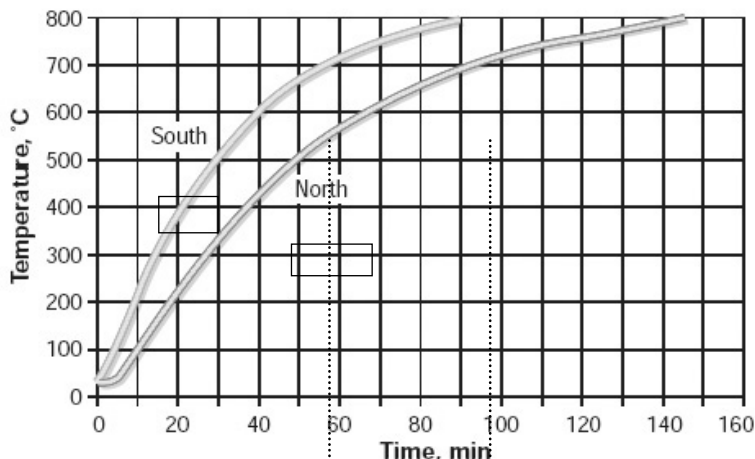
간들은 각각 56분과 102분으로 나타난 WTC 타워의 실제 붕괴 시간과 일치하는 것이다.

한편, WTC complex의 다른 건물들도 붕괴되었으나 비행기에 의한 충돌은 아니다. 47층 건물인 WTC 7은 WTC 1 및 WTC 2로부터 쏟아지는 파편에 의해 화재가 발생한 후에 붕괴되었다.

3.3 붕괴 원인 조사 결과

WTC 타워의 붕괴 원인 조사 결과, 비행기 충돌 이후 발생한 화재가 WTC 타워의 구조안전성을 더욱 감소시켜 붕괴에 이르도록 하는데 있어 주요한 역할을 한 것으로 밝혀졌다. 비행기 충돌에 의한 손상 그 자체만으로는 건물의 붕괴를 가져오지 않았지만, 다음의 사유로 인해 충돌 이후의 화재에 큰 영향을 미쳤다.

- 1) 스프링클러 및 소화 시스템의 손상
- 2) 광범위한 면적에 걸친 항공 연료의 분산 및 건물 내 가연물의 착화
- 3) 비행기 및 건물의 가연물을 포함하여 대규모 가연물의 형성
- 4) 손상된 건물로 공기 공급이 증가하여 일반적으로 환기가 제한된 건물 화재



[그림 4] 트러스 환봉의 온도 상승 및 WTC 타워 붕괴예측 시간

에서 볼 수 있는 것보다 매우 큰 에너지를 방출함으로써 바닥 전체에 화재가 급속히 확산

5) 천장의 손상으로 인해 바닥과 천장간의 구획벽 너머로 열기가 확산

화재를 발생시킨 항공 연료는 충돌 후 수분 이내에 대부분 소모되었다. 한 층 바닥에 걸쳐 잔존 연료의 연소 시간은 약 79초로 계산되었다. 따라서 항공 연료 화재는 단지 화재로서 단지 건물 내의 많은 가연물을 착화시키기 위한 발화원의 역할을 한 것이다. 다시 말해 WTC 타워의 붕괴되기 전까지 불타던 화재는 주로 건물 내의 가연물에 기인한 것이며, 항공 연료가 아니다. 우리 나라에서도 초기에는 항공 연료의 연소에 의한 골조의 급격한 온도 상승이 건물의 붕괴를 가져온 것으로 소개된 바 있으나 사실과는 차이가 있는 것이다.

한편, 사무실의 마감재는 WTC 타워의 바닥에서 화재가 최소 1시간 동안 지속되도록 하는 역할을 했다. 바닥은 평균 약 4 psf(약 20 kg/m²)의 가연물을 보유하고 있었다. 그러나 손상되지 않은 내화등급 1시간의 방화구획이 WTC 타워의 붕괴 이전까지 화염의 전달을 차단하고 구조 부재가 고열로 인해 구조 결함을 가져오는 것을 억제하였던 것으로 보인다. WTC 타워는 1968년 건축 당시 뉴욕시 건축법을 적용하여 내화 등급 1시간의 방화구획이 요구되었으나, 화염이 대규모 공간으로 확대되는 것을 억제할 수 있는 최소 방화구획 면적은 요구하지 않았다.

4. WTC 타워의 화재안전 미비점

조사 보고서에 따르면 WTC 1의 충격 범위(94층~98층)는 바닥 트러스의 피복 두께가 38 mm인 반면, WTC 2는 단지 19 mm에 불과했음이 밝혀졌다. WTC 타워의 트러스 구조에 대한 피복두께 시방은 1996년에 38 mm까지 강화되었다. 그러나 2001년 9월 11일 테러 당일까지 해당 트러스의 1/3만이 이 규

정을 준수한 것으로 나타났다. 또한 당시 관련 규정 에 따르면 바닥 구조에 필요한 내화피복 두께를 산정하기 위해 실제 규모의 화재시험이 요구되었으나, 이를 수행하지 않은 것으로 나타났다.

한편, WTC 타워는 연료를 가득 실은 항공기의 충돌에 견디도록 설계되지는 않았다. 뉴욕&뉴저지 항만청의 자료에 따르면 1964년 2월~3월의 WTC 타워 설계 당시 600 mph로 비행하는 보잉 707의 충격은 고려되었으나, 이어서 발생하는 화재의 영향은 고려하지 않았으며, 당시의 건축법은 건물 설계에서 비행기 충돌을 고려하도록 요구하지 않았다.

WTC 타워의 붕괴를 가져온 9/11 테러와 같은 비행기 충돌 및 엄청난 화재에 의한 하중 조건은 건축법에서 요구하는 정상적인 설계 하중을 벗어나는 것으로서, 일반적으로 9/11 테러로 야기된 것과 유사한 강도 및 조건에서의 화재 방호 및 피난대책은 건축물 설계에 고려하지 않는 실정이다.

5. WTC 타워의 피난 및 방호 시스템

5.1. 피난 및 비상 조치

- 1) 9/11 테러 당일 WTC 타워에는 약 17,400명이 있었던 것으로 추정되며, 각 타워의 상주 인원은 WTC 1에 약 8,900명, WTC 2에 약 8,500으로 서로 유사한 것으로 추정되었다. 생존자의 2/3는 9/11 발생 1년 전에 화재 훈련에 참여했으나, 17 %는 같은 기간 내에 아무런 훈련도 받지 않은 것으로 밝혀졌다. 화재 훈련에 참여한 생존자 중 93 %는 가장 가까운 계단의 위치에 대해 교육받았으나, 전체 생존자의 1/2 정도가 9/11 테러 이전에는 WTC 타워 내의 피난계단을 이용해본 적이 없는 것으로 나타났다.
- 2) WTC 2는 비행기의 충돌 이전 승강기의 작동에 의해 많은 재실자가 대피할수 있었던 반면, WTC 1의 경우 대부분 승강기가 작동하지 않았

으며 생존자는 다만 피난 계단만을 이용할 수 있었다.

- 3) WTC 타워 재실자 중 2,146명이 사망(WTC 1 : 1,466명, WTC 2 : 624명, 기타 : 56명)하였고 추가로 안전 요원을 포함한 421명이 목숨을 잃었다.
- 4) 비행기가 충돌한 층의 바닥으로부터 그 아래층에서 근무 중인 재실자의 99%를 포함하여 WTC 타워 재실자의 약 87%가 무사히 대피하였다. WTC 1에서는 103분만에 걸쳐 재실자 중 약 7,500명이 대피하였고, WTC 2에서는 73분만에 걸쳐 약 7,900명이 대피함으로써 전체 피난율은 WTC 1이 73명/분, WTC 2가 108명/분으로 나타나, WTC 2의 피난율이 WTC 1에 비해 2배 가량 신속했다.
- 5) WTC 타워가 붕괴되기 약 20분전까지는 두 건물에서의 생존자는 비슷한 피난율을 보였다. 그러나 마지막 20분 동안은 피난율이 초기 피난율의 1/5로 감소되었다.

5.2. 소화설비 시스템

- 1) 화재 당시 WTC 타워 내의 연기 조절 시스템이 작동하지 않았으며, 이는 이러한 시스템이 비행기 충돌로 인한 손상으로 작동 가능성이 희박했기 때문이다.
- 2) 공조덕트는 건물 내 수직 연기 확산의 주 통로가 되었다.
- 3) WTC 1 및 WTC 2에서 계단가압방식은 연기 유동을 거의 저지하지 못했던것으로 나타났다.
- 4) 화재상황실과 화재실 간 화재감지 시스템 통신의 문제점은 통신선을 구리선보다 광섬유 케이블로 하였을 경우 향상되었을 것으로 파악되었다.

5.3. 건축 법규정

- 1) 뉴욕&뉴저지 항만청은 1968년의 건축법을 이

법의 시행 3년 전에 WTC 타워에 적용하였다.

- 2) 1968년 건축법은 1962년 WTC 타워의 설계가 시작되었을 때 적용되었던 1938년의 건축법에 비해 다음과 같이 강제 규정이 완화된 것이다.
 - 필요한 피난 수단인 방연 계단의 배제
 - 계단통(stairwell)의 수를 6개에서 3개로, 계단에 이르는 문의 크기를 1.1 m에서 0.9 m 로 축소
 - 건물 코아의 샤프트 벽의 내화등급을 3시간에서 2시간으로 축소
 - 단위 길이 당 구획벽의 무게에 근거하여 구획하중을 20 psf(약 100 kg/m²)에서 1 psf(약 5 kg/m²) 로 축소 변경
 - 모든 구조 부재에 대해 내화등급을 1시간 축소 (기둥은 4시간에서 3시간으로, 바닥 후레임 부재는 3시간에서 2시간으로 축소 : <표 1> 참조)

<표 1>뉴욕시 건축법 규정 변천(내화시간)

구분	1938	1968	2001*
기둥	4	3	2
바닥	3	2	1-1/2

(*): 높이 제한이 없는 건물은 스프링클러가 요구됨

6. 방재 대책

항공기 테러로 인한 WTC 타워의 붕괴 원인 조사 결과를 바탕으로 NIST가 제시한 초고층 건축물의 방재 대책의 요점을 소개하면 다음과 같다.

6.1. 구조 부재의 내화성능 향상

- 1) 20층 이상 초고층 건축물의 용도 별 내화등급 결정의 기술 기반 개선
- 2) 구조 부재 방호용 스프레이 피복재의 규격, 시험방법, 성능 기준 개선
- 3) 기둥에 연결된 구조 부재는 기둥의 가장 높은 내화등급을 적용

- 4) 사양적 설계 방법의 대안으로서 성능적 설계 방법 적용
- 5) 신 재료 및 공법의 도입에 있어 기술 및 규격으로 인한 장벽 제거

6.2. 능동적 방호 시스템의 향상

- 1) 건물의 위험 증가에 따른 스프링클러, 급수탑, 화재경보기, 연기제어장치 등의 설계, 성능, 신뢰성, 대체성 개선을 통한 능동적 방호 시스템의 향상
- 2) 신뢰성 있고 정확한 정보 제공이 가능한 화재경보기 및 통신 시스템 개발
- 3) 신뢰성 있는 정보 수집 및 해석이 가능한 화재 및 비상통제 시스템 도입

6.3. 건축물의 피난 개선

- 1) 안전하고 신속한 대피를 촉진하기 위한 시스템 설계
- 2) 재실자에게 적시의 명확한 비상 통보 전달 방법
- 3) 비상시 재실자의 피난을 위한 준비사항 개선

6.4. 비상 대응 기술 및 절차의 개선

- 1) 방호 및 구조 보강된 비상용 엘리베이터의 설치에 대한 재실자의 인식 고취
- 2) 비상통보 시스템의 설치, 검사 및 운영 시험
- 3) 비상 대응 인력이 주요 정보의 수집, 처리 및 전달이 가능하도록 세부 절차 및 방법 이행

6.5. 교육 및 훈련

- 1) 방화 기술자 및 건축가의 지속적 교육
- 2) 기술능력 및 인적자원 기반을 위한 대학 및 단기 과정 등 전문인 교육

7. 맺음말

한 때 뉴욕 맨해튼의 상징이었던 WTC 타워의 붕괴는 초고층 건축물의 방재 대책에 대해 새로운 시각을 요구하고 있다. 법규정에 의한 일반적 수준의 방재 시스템 구축을 넘어 항공기에 의한 인위적인 테러 등 초 규모의 위험 요인을 방재 계획에 포함하는 것은 기존의 법규나 방재 시스템, 성능 기준 등에 대한 전면적인 재검토와 더불어 수많은 전문 인력 및 막대한 비용의 투입이 필연적이다. 이러한 관점에서 WTC 타워 붕괴에 대한 미국의 대응 및 방재 대책 등 관련 자료는 우리 나라에서도 향후 초고층 방재 계획 수립시 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. **FILK**

【참고문헌】

- 1. ICC, International Building Code, 2003
- 2. James G. Quintiere, Opportunities to learn from 9/11, Fire Protection Engineering, 2004
- 3. Shyam Sunder, Chicago Committee on High-Rise Buildings, NIST Investigation Report, 2004
- 4. John A. Purkiss, Fire Safety Engineering Design of Structure, Butterworth Heinemann, 1996