

콘크리트 구조물의 설계시 내화설계를 고려해야

- What do you think of including the Fire on the Concrete Structure in a Major Load of the Structural Design? -



홍경욱*

2001년 9월 11일 2대의 점보기에 의해 미국 경제 중심의 상징인 세계무역센터가 붕괴되었다. 소설 속에서도나 나옴직한 방법을 사용하여 최강국의 심장 한복판에 뛰어 들어 전 세계를 흥분과 공포의 도가니로 빠져들게 하였다. 이 사건으로 말미암아 세계 경제는 극도로 악화되었으며 곧 뒤따른 전쟁으로 한치 앞을 내다보기가 힘든 상황이었다. 다행스럽게 지금은 전쟁이 마무리되어 가고 있으며 세계 경제도 세계무역센터 붕괴의 영향을 조금씩 벗어나며 회복의 기미를 보이고 있다.

표 1. 세계무역센터 개요

구분	내용
규모 ¹⁾	· 110층 Twin Tower · 47층 사무소 1동 · 9층 사무소 2동 · US Customs 사무소 1동 · 22층 호텔 1동
높이	· Tower One : 417m · Tower Two : 415m
소유주	· Port Authority of New York & New Jersey
건축 설계	· Minoru Yamasaki · Emery Roth & Sons Consulting
구조 설계	· John Skilling & Lesile Robertnon (SWMB)
착공일	· 1966년 8월 5일
준공일	· 1973년 4월 4일
공사비	· 12억 5,000만 달러(약 1조 6,000억 원)
임대 면적	· 1,200만 ft ² (111만 5,000 m ²)
거주 인원	· 5만 명
관광객	· 9만 명/일

주 : 1) 테러에 의해 110층 Twin Tower와 47층 사무소 붕괴

이 사건 발생 직후 전 세계의 많은 사람들이 세계무역센터의 붕괴 원인에 대하여 궁금해 하였으며 자기 나름대로의 의견을 얘기했지만 공식적인 기관의 발표를 기다리고 있었다. 미국은 즉각적으로 조사반을 구성하였으며, 이후 자세한 붕괴 원인은 조사를 거쳐 발표될 것이다. 그 즈음해서 ACSE에서는 그때까지의 상황을 종합한 전문가들의 견해를 홈페이지에 올려놓았다. 필자는 같은 시기에 대한토목학회에 세계무역센터 붕괴 현장의 조사반 구성과 조사 일정 등에 대하여 문의하였으나 아쉽게도 계획이 없다는 답변만을 들을 수 있었다.

세계무역센터는 세계에서 3번째로 높은 건물이었으며, 1973년 준공 후 1년 동안 시카고의 Sears Tower(443 m)가 건설되기 전까지는 세계에서 가장 높은 건물이었다. 뉴욕 & 뉴저지 항만청에 의해 건설된 세계무역센터는 대표적인 골조튜브(framed tube) 구조물이다. 골조튜브 구조물은 외부에 촘촘히 배치된 기둥과 이를 연결하고 있는 보에 의해 지지된다. 외부에 형성된 골조튜브는 내부의 코어와 함께 바람 및 지진과 같은 외력에 저항할 수 있다. 또한, 세계무역센터에 사용된 내화피복재는 세라믹이었다. <표 1>에는 세계무역센터의 개요를 나타내고 있다.

ASCE 홈페이지에는 세계무역센터의 붕괴 직후 가장 많이 묻는 질문 4가지에 대하여 다음과 같이 답하고 있었다.

질문(1) 세계무역센터가 비행기의 충돌에 의한 충격에 왜 무너지지 않았는가?

세계무역센터는 거대한 하중에도 견딜 수 있도록 처음부터 설계되었기 때문에 충격에 의하여 붕괴되지 않았다. 따라서 비행기의 충돌에 의한 충격은 빌딩을 쓰러뜨리지 못했다. 타워 하나는 충돌 후 1시간, 또 다른 타워는 1시간 40분 동안 쓰러지지 않고

* 정회원, 현대건설(주) 토목사업본부

견뎌냈다는 것이 이를 입증해준다. 설계자들은 사용 기간 동안 구조물에 가해지는 하중과 힘들을 고려하여 구조물을 설계한다. 여기에는 태풍, 폭풍, 홍수 및 지진이 포함되며 이러한 하중들은 일상적인 것은 아니다. 뉴욕시에서는 구조물을 설계할 때 여러 방향에서 작용할 수 있는 100 mph(162 km/hr)의 강풍에도 견딜 수 있도록 하고 있다. 따라서, 비행기의 충돌에 의하여 구조물에 가해진 힘은 구조 시스템의 능력 범위 안에 있었으므로 세계 무역센터는 붕괴되지 않았다.

질문(2) 무엇 때문에 세계무역센터가 붕괴되었는가?

이 질문에 대하여 답을 아직 알고 있지 않으며 실제적으로 정확하게 알 수는 없을 것이다. 그렇지만 발생한 상황들을 살펴보면 대략 다음과 같은 이유인 것으로 생각된다.

초고층 구조물의 하중은 기둥에 의해 수직 방향으로 지지되며, 이러한 기둥들은 일반적으로 구조물의 꼭대기까지 연장되어 있다. 기둥들 사이에 복잡하게 얽혀 있는 보와 슬래브에 의하여 각 층의 하중은 기둥에 전달된다. 구조 설계자들은 예상되는 하중에 저항하도록 보, 기둥, 슬래브 및 이들의 연결 부위를 설계한다.

비행기가 세계무역센터로 돌진했을 때 수많은 기둥들이 심하게 손상을 받았으며, 충돌에 의한 손상은 구조물을 약화시켰지만 붕괴시키지는 않았다. 막대한 양의 비행기 연료에 의해 발생한 높은 열이 이미 손상 받은 구조 시스템에 더해져서 구조물을 더욱 더 약화시켰다. 이것이 손상 받은 부위의 구조 부재 붕괴를 유도한 결정적인 원인으로 추정되고 있다. 이러한 구조 부재의 파괴는 비행기가 충돌한 위치를 기준으로 구조물의 상부를 아래로 떨어뜨리게 했으며, 이것은 점진적인 파괴로 이어져서 결국 구조물

전체의 붕괴를 유발하게 되었다.

질문(3) 초고층 구조물은 붕괴에 대해서 취약한가?

초고층 구조물은 붕괴의 가능성은 아주 적다. 세계무역센터의 참사처럼 비행기 충돌에 의한 충격과 비행기 연료의 높은 열이 복합적으로 작용한 것은 전례 없는 일이었다. 그럼에도 불구하고 약 만 명 정도가 빠져나올 수 있을 만큼 충분히 견뎌냈다. 그러나 불행하게도, 후속으로 이뤄진 타워의 붕괴때문에 수천 명의 사람들이 빠져나오지 못한 것으로 보인다.

질문(4) 이번과 같은 테러에 대하여 저항할 수 있도록 구조물을 설계할 수는 없는가?

가능하다. 그렇지만, 요새를 구축한 것처럼 보이고 사람들은 사용하기를 꺼려할 것이므로 실제적으로는 그렇게 만들지 않을 것이다. 설계자들은 여러 가지 다른 방법을 사용하여 빌딩과 다른 구조물의 안전을 강화하고 있다. 예를 들면 구조 부재에 대하여 케블라(kevlar) 커튼, 방탄 유리를 설치하거나 차량의 접근과 주차를 제한, 창문의 축소 및 안전문을 설치하는 설계를 포함한다.

이상에서와 같이 세계무역센터의 붕괴 원인은 비행기의 충돌에 의한 충격이 아니라 비행기 연료의 연소에 의한 높은 열이 직접적인 원인이라는 설명이다. 비행기의 충돌에 의한 충격과 높은 열을 구조물의 설계에 포함시키는 것은 가능하긴 하지만 실효성이 떨어진다. 그렇지만 일상적인 화재에 대해서는 안전하도록

표 2. 국내·외의 내화구조 및 내화설계

구분	관련 규정	내용
국내	콘크리트 구조설계기준	· 내화에 필요한 피복 두께는 화열의 온도, 지속 시간, 사용 골재 등을 고려하여 정하는 것으로 부재별로 피복 두께를 설정. 그러나, 구체적인 계산 방법은 제시하고 있지 않음.
	내화구조의 지정 및 관리기준	· 건축물의 벽·기둥·바닥 또는 지붕에 대하여 화재시의 가열에 대하여 부재별로 정해진 시간 이상을 견딜 수 있는 내화 구조로 하여야 한다고 규정되어 있음. · 각 부재별로 피복 두께를 설정하고 있으나, 구체적인 계산 방법은 제시하고 있지 않음.
국외	NEPA220 (미국방재협회)	· 구조물의 특성에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 3시간 이상의 내화 성능을 확보하도록 규정하고 있음.
	ACI 216	· 사용 골재의 종류, 화열 지속 시간에 따른 콘크리트의 심도별 발생 온도, 콘크리트와 철근의 강도 감소를 정량적으로 제시하고 있음. · 구체적인 계산 방법 제시
	EURO CODE	· 철근 및 콘크리트의 재료 특성, 발생 온도에 따른 강도 및 변형을 산정 · 도표화된 계산 방법 및 열전도 해석에 의한 진보된 해석 모델 제시

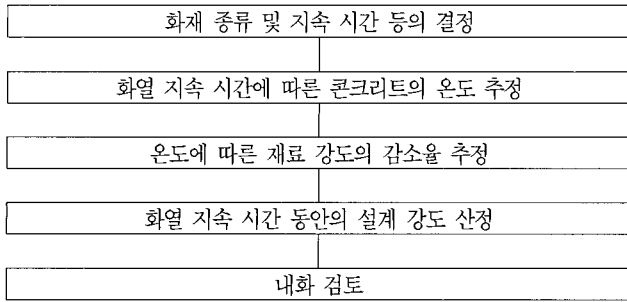


그림 1. ACI 216의 내화설계 방법

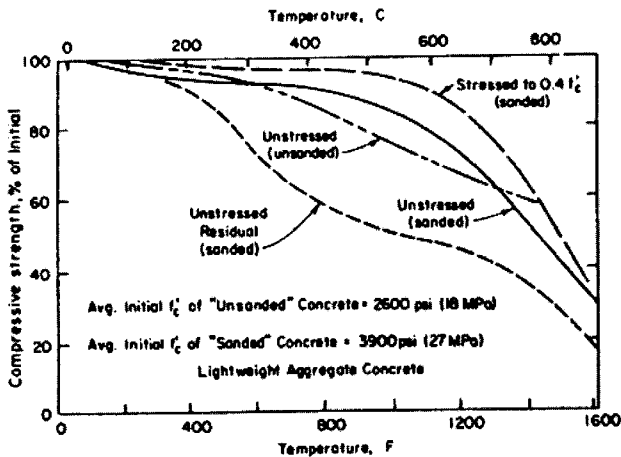


그림 2. 온도에 따른 콘크리트의 강도 감소율

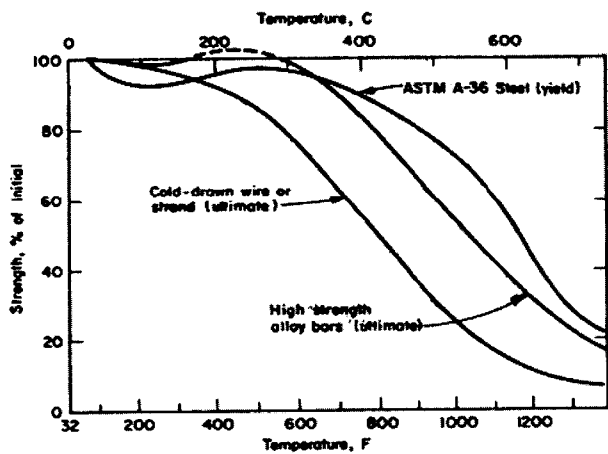


그림 3. 온도에 따른 철근의 강도 감소율

설계되어 있다고 한다.

여기서 화재에 대하여 안전하도록 설계하는 개념은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하중의 개념을 이용하여 구조 부재의 단면을 증대시키는 것과 화재 발생으로 직접 손상을 받을 수 있는 구조 부재의 윤변에 차단막을 설치하는 것이다. 통상적으로 두 번째 방법이 사용되고 있으며 세계무역센터에서도 내화피복재로서 세라믹이 사용되었다. <표 2>에는 국내·외의 내화설계 방법을 나타내고 있다.

콘크리트 구조물은 강구조물에 비하여 상대적으로 화재에 대하여 유리하다고 한다. 또한, 화재 발생 후 지속 시간이 적은 경우

그 피해의 정도는 극히 미미하다. 실제 콘크리트 교량에서 발생한 화재에 대하여 현장 조사 및 구조 검토를 수행한 결과 피해의 범위는 콘크리트의 표면 1cm 내외였다. 이는 화재의 종류, 지속 시간, 범위에 따라 달라지지만 조사 대상의 교량은 목재에 의하여 약 2시간 정도 화재가 발생한 이후 소화되었다. 따라서 현재의 구조설계에서는 화재에 대한 영향을 포함시키지 않고 있으며 다만 부재별로 최소 콘크리트의 피복 두께만을 규정하고 있다.

최근 국내 턴키입찰(turn-key)에서 내화설계 개념을 사용하여 구조물의 주요 부위에 대하여 ACI 216에서 제시하고 있는 방법을 사용하여 내화 검토를 수행하고 있다. ACI 216의 내화설계 방법을 살펴보면 <그림 1>과 같다.

화재의 종류, 지속 시간 및 범위를 결정하여 열용력 해석을 수행하여 주요 부위의 콘크리트 온도를 추정한다(ACI 216에서는 도표로 주어지고 있지만 모든 경우에 대하여 적용할 수 없다). 이때 발생된 온도에 대하여 콘크리트 및 철근의 강도 감소율을 <그림 2>와 <그림 3>에서 구하고 감소된 강도를 사용하여 설계 강도를 계산한다. 이 설계 강도를 미리 계산한 계수 단면력과 비교하여 구조적 안전성 검토를 수행한다.

앞에서 언급했듯이 화재의 발생에 대하여 콘크리트 구조물은 상대적으로 안전한 것으로 취급되었다. 따라서 현행 구조설계에는 화재가 하중의 개념이 아닌 최소 콘크리트의 피복 두께만을 규정하고 있다. 이는 화재가 발생하여 소화되기까지의 시간(약 1~3시간)을 고려한 방재의 개념이며 화재 발생 이후 손상 부위에 대한 안전성 검토만을 수행하고 있다. 하지만 현재의 교통 상황은 소방차가 출동하여 화재를 완전히 소화시키는 데 소요되는 시간을 예측하기 힘들게 하고 있다. 모든 구조물에 대하여 내화설계를 실시한다는 것은 불필요하다고 생각되지만 많은 사람들이 이용하는 공공 시설물에 대해서는 하중의 개념을 도입하여 구조설계의 하중 조합에 포함시키는 것이 합리적일 것으로 생각된다. 화재는 지진과 같은 엄청난 피해를 주지는 않지만 빈도로 볼 때 지진보다는 훨씬 더 많이 경험하게 되는 상황이다. 옛 속담에 '소 잃고 외양간 고친다'라는 얘기가 있다. 우리는 이러한 경우를 너무도 많이 경험을 해 왔다. 아직 외국에서 이러한 설계 방법을 도입하지 않았다고 해서 우리도 도입하지 말아야 한다고 하는 것은 어불성설(語不成說)이다. □

참고문헌

1. <http://www.asce.org>
2. 미국 세계무역센터의 붕괴원인분석, 대우건설기술연구소, 2001.
3. "콘크리트 설계기준", 건설교통부, 1999.
4. "ACI Concrete Practice", 2000.
5. "내화구조의 지정 및 관리기준", 건설교통부 고시 제1998-248호.
6. "건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙", 건설교통부령 제184호.