

건축물의 방폭 및 연쇄붕괴저항 설계 고찰

Review on Blast and Progressive Collapse Resistant Design of Buildings



이경구*
KyungKoo Lee



정란**
Lan Chung

1. 서론

테러에 의한 건축물의 폭발피해에 대한 관심이 높아지면서 국내에도 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 인구가 밀집된 대도시에서 테러단체나 개인에 의한 자발적 폭탄테러는 수많은 인명 및 재산피해를 발생시킬 수 있기 때문에 그 발생 확률을 떠나서 안보, 인명피해방지와 방재차원에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

전 세계적인 이목을 집중시킨 2001년 9월 11일 미국의 World Trade Center(WTC) 테러사건 이후에도 2005년 7월 7일 영국의 런던 킹스크로스역의 폭탄 테러, 2008년 9월 WTC 테러 7주년을 맞아 600 kg의 폭탄을 실은 대형 트럭의 폭발에 의한 메리어트 호텔 테러사건, 2008년 11월 26일 인도 뭘바이의 시내 호텔, 역, 병원, 극장, 대형 식당 등 사람들이 많이 모이는 다중이용시설 10여 곳을 대상으로 한 동시다발적 테러 등이 발생하였다. 최근 국내에서는 연평도 사건에 의한 건축물 폭발피해가 발생하기도 하였다.

<그림 1>의 미 국무부가 발표한 시설유형별 테러피해에 대한 통계(1998~2003)에 따르면 상업시설의 테러 피해가 월등하게 나타났으며, <그림 2>의 국가정보원 테러정보통합센터의 테러사건통계(2002~2010)에도 테러에 사용된 무기는 폭발물이 가장 많고, 테러대상으로 군, 경 관련시설물 다음으로 민간 시설물이 많은 것으로 나타났다. 이처럼 테러가 호텔, 지하철역, 사무소 등의 민간 다중이용시설에서 집중적으로 발생하는 이유는 인명살상으로 인한 관심집중이라는 테러의 목적달성에 효과적이고, 상대적으로 경비가 허술하기 때문이라고 분석한다.

이에 오늘날 전 세계적으로 정부산하 기구나 민간 건물 소유자들에게 보안을 강화하고 잠재적인 폭발에 대한 위협에 대비하도록 요구하고 있다. 최근 미국에서는 정부 청사 건물의 신축 후

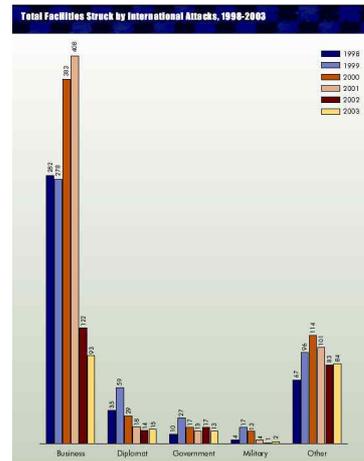


그림 1. 시설유형별 국제테러피해통계(1998~2003)

(출처: Patterns of Global Terrorism 2003, U.S. Department of States)

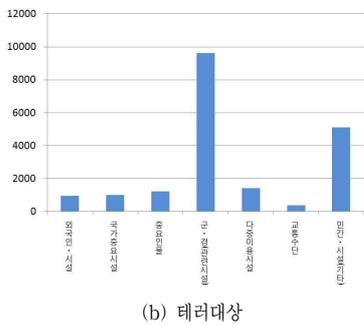
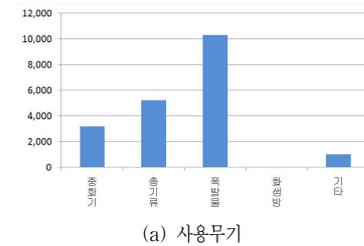


그림 2. 국제 테러사건통계(2002~2010)

(출처: 국가정보원 테러정보통합센터)

* 정회원, 단국대학교 건축공학과 조교수
kklee@dankook.ac.kr

** 정회원, 단국대학교 건축공학과 교수

은 보강 시 폭발 재해에 대비하는 설계를 요구하고 있고, 주요 민간 건물에도 권장하는 추세이다. 특히, 다중이용시설을 겨냥한 테러행위에 대한 대책의 중요성이 강조되고 있으며, 미국 국토안보부(DHS, Dept. of Homeland Security)는 2010년 12월 26일 유동인구가 많고 경비가 취약한 다중이용시설을 겨냥한 '마이크로 테러리즘'이 대두됨에 따라 호텔과 쇼핑몰 등 'soft target'에 대한 보안을 강화하고 있다고 발표하기도 하였다.

폭발에 의한 건축물의 피해는 직접적 국부피해와 이차적 피해로 분류할 수 있다. 건축물의 직접적 국부피해는 기둥, 보 등의 주요 구조부재의 손상, 외벽, 창호시스템, 바닥슬래브 등의 손상, 그리고 파편에 의한 부가적 피해를 들 수 있다. 이차적 피해는 주요 구조요소의 국부적 파괴에서 야기되어 부재간 피해 전파를 통한 건축물 부분 혹은 전체의 연쇄붕괴를 말한다. 따라서 폭발 피해를 경감하기 위한 건축물의 구조설계도 이 두 가지로 분류된 피해를 대상으로 하여 방폭설계와 연쇄붕괴저항설계로 구분된다.

본 고에서는 방폭설계와 연쇄붕괴저항설계의 설계철학과 설계방안을 고찰하고, 최근 국내에서 진행 중인 연구내용을 소개하며, 향후 국내에서 폭발에 대비한 건축물 구조설계를 위한 지침의 필요성을 제안하고자 한다.

2. 방폭 설계

2.1 설계 철학

방폭설계는 폭발하중에 대한 각개 부재 또는 일군의 부재의 성능을 평가하는 것으로써 건물에 방호 '외피(envelope)'를 제공하여 폭발파편과 비산(debris)을 방지함으로써 인명 및 자산을 보호하고 주요 구조부재 요소의 파괴를 방지하는 것을 주목적으로 한다. 다시 말해 폭발하중에 대한 구체적인 국부적 저항성을 건축물에 부여하는 것이다.

폭발피해에 의해 외피가 파괴되어 건물 내부로 비산되는 파편 조각에 의한 피해를 줄이기 위해서는 '균형 설계', '연성 거동', '여유도'의 개념을 고려하여 외피 시스템을 설계하여야 한다. 직관적으로 육중하고 강성이 큰 시스템이 가볍고 유연한 시스템보다 선호될 듯 하지만 '연성', '여유도', '균형성'이 고려되어 설계하중하에 요구되는 거동을 충족시킨다면 일반적으로 후자의 시스템이 방폭적으로 우수할 수 있다. 예를 들어 비록 무거운 시스템이 질량이 커서 폭발효과를 줄이는 장점이 있지만 취성과파괴 가능성이 커서 오히려 외피 뒤의 지지구조에 막대한 하중을 작용할 수도 있다. 또한 이 하중이 구조적 파괴와 연쇄붕괴를 야기시킬 수 있다.

일반적으로 육중하고 강성이 큰 시스템은 위험도가 높은 건물

혹은 위협에 매우 가까운 국부지역에 일반적으로 적용된다. 반면, 보다 가볍고 유연한 시스템 해법은 대부분의 민간 건물에서 선호되고 있다.

2.2 설계 방안

최대 연성, 지점 회전각, 이차효과를 고려하여 <표 1>과 같이 세 단계의 건축물 피해 수준을 정의할 수 있다. 일반적으로 '설계 위협' 수준에서 '중간' 피해가 새로운 건물 설계를 위한 합리적인 목표가 될 수 있다. 폭발 후에도 기능성이 유지되어야 하는 건물이나 위험도가 높은 건물을 위해서는 '미약' 피해 수준이 적절할 것이다.

폭발하중의 경우는 항복상태를 초과하는 응력을 받기 때문에 정적 탄성해석과 같이 부재응력수준을 검토하는 것은 적절치 않고 최대변형의 검토로 구조부재의 적절성을 평가하게 된다. 구조부재의 방폭설계를 위해서는 허용 피해도에 상응하는 만큼 부재가 변형할 수 있도록 충분한 연성(ductility)을 제공하여야 하므로 휨 소성 변형에 기초한 초기 설계가 필요할 것이다. 변형중에 부재는 전단 파괴나 국부적 불안정과 같은 다른 하중에서의 의한 조기 파괴가 발생해서는 안 된다.

<표 2, 3>은 철근콘크리트와 철골구조물의 부재별 응답기준으로 고려해야 할 응력과 연성도, 회전각의 최대 허용치의 사례이다.

3. 연쇄붕괴저항 설계

3.1 설계 철학

연쇄붕괴란 부재와 부재간의 초기 국부 파괴 전이가 결국 구

표 1. 건축물 피해수준

피해 수준	피해 상태
미약 (minor)	창호, 문, 외피와 같은 비구조재의 파손 발생. 부상자 발생이 예상되나 사망자 발생 가능성은 매우 희박함.
중간 (moderate)	구조적 피해는 국부적 손상에 한정되고 보수 가능. 보, 슬래브, 비내력벽과 같은 이차 구조부재만의 파손 발생. 그러나 주요 부재 손실을 감안하여 설계된 건물의 경우 연쇄붕괴를 야기시키지 않는 상태에서 기둥의 일부 손실 가능. 부상자 발생 가능하며 사망자 발생도 예상됨.
심각 (major)	기둥, 전이보와 같은 주요 구조부재의 손실이 발생하여 주변부재의 추가적 파손을 야기. 건물 보수 불가능. 심각한 사망자 발생이 예상됨.

표 2. 철근콘크리트구조물 부재별 응답기준

부재 유형	지배 응력	연성도	지점 회전각(°)		
			낮은 응답	중간 응답	높은 응답
보	휨 전단: 콘크리트 콘크리트+ 늑근 늑근	N/A	1	2	4
		1.3			
		1.6			
		3.0			
슬래브	휨 전단: 콘크리트 콘크리트+ 늑근 늑근 압축	N/A	2	4	8
		1.3			
		1.6			
		3.0			
		1.3			
보-기둥	휨: 압축(C) 인장(T) 압축-인장 전단	1.3	1	2	4
		(3)			
		10.0			
		1.3			
전단벽, 격막	휨 전단	3	1	1.5	2
		1.5			

표 3. 철골구조물 부재별 응답기준

부재 유형	응답 범위					
	낮음		중간		높음	
	연성도	지점 회전각	연성도	지점 회전각	연성도	지점 회전각
작은 보, 중도리	3	2	10	6	20	12
골조 부재	1.5	1	2	1.5	3	2
냉간성형 패널	1.75	1.25	3	2	6	4
개방웹보 조이스트	1	1	2	1.5	4	2
강판	5	3	10	6	20	12

조물 전체 또는 불균형적으로 많은 부분의 붕괴를 초래하는 것이다(ASCE 7-02). 그러므로 총 피해는 최초의 피해에 비해 불균형적으로 크며 위협(이상극한하중)의 종류나 크기 등에 무관하다(threat-independent)고 할 수 있다. 따라서 연쇄붕괴 저항설계는 구조시스템에 충분한 여유도(redundancy)와 연속성(continuity), 연성(ductility)을 부여해서 국지적으로 시작된 파괴의 전파를 막는 것을 목적으로 한다.

GSA(General Services Administration)와 DoD(Department of Defence) 규정에 따르면 건축물의 연쇄붕괴를 방지하기 위해서는 구조시스템은 전체 골조의 속성과 접합부의 국부적 속성에 대해 검토해야 된다. 첫째, 전체 골조의 속성

으로서 충분한 강성, 연속성 그리고 여유도를 구조요소의 구성에 제공하여 전체 구조시스템의 안정성을 확보하도록 한다. 즉, 주요 기둥부재의 갑작스러운 손실에 의해 국부적으로 손상이 발생하면 붕괴가 발생하지 않도록 하중경로가 변경될 수 있도록 한다. 둘째, 접합부의 국부적 속성으로서 주요 기둥부재의 순간적인 손실이 발생하더라도 구조물의 안정성을 유지하도록 기둥 파괴부위에서 보와 보사이의 연속성에 의한 구조적 완결성을 확보하고, 위험 보-기둥-보 연결부(즉, 내부 보-기둥 접합부)에 확실한 접합부 연성능력을 확보하도록 한다.

3.2 설계 방안

건축물의 연쇄붕괴방지를 위해서는 다음과 같은 항목을 예측할 수 있는 신뢰성 있는 설계방법을 개발할 필요가 있다(Houghton & Karns 2003).

- 1) 건물의 연쇄붕괴에 대한 위험도 평가
- 2) 폭발이후 중력하중을 지지하는 기둥, 보, 접합부 요소들의 잔여 능력 평가
- 3) 폭발이후 전체 또는 국부적인 구조 시스템의 안정성, 연속성, 연성도 그리고 저항력(즉, 보-보 구조적 연속성과 파괴된 기둥 부근의 저항능력) 확보

연쇄붕괴저항설계를 위한 실용적 방안 중 하나는, 기존의 충분한 변형 능력을 발휘할 수 있는 내진 접합부가 연쇄붕괴를 방지하는 목적으로도 사용할 수 있는지에 대해서 평가하고 필요시 보강 혹은 개선된 접합부를 개발하는 것이다. 또한, 모멘트 저항 골조와 같은 여유도가 충분한 구조시스템을 사용하고, 연결된 부재의 최대 저항능력에 부합될 수 있도록 접합부의 연속성을 확보하는 상세를 적용하며, 강도의 급격한 손실없이 대변형을 수용할 수 있도록 부재를 설계할 필요가 있다.

연쇄붕괴방지를 위한 몇몇 지침서의 요구조건을 충족시키기 위한 가능성 있는 구조적 해법은 다음과 같다<그림 3>.

- 1) 강구조 건물에 모멘트골조시스템 사용
- 2) 건물 둘레를 따라 기둥 크기 또는 수 증가
- 3) 콘크리트 스패럴 보에 케이블 정착
- 4) 피해 예상부위에 깊은 보처럼 내력벽 설계

4. 국내 관련연구의 최근동향

국내에서 수행중인 초고층복합빌딩사업단에서 진행하는 연구를 중심으로 기술하고자 한다.

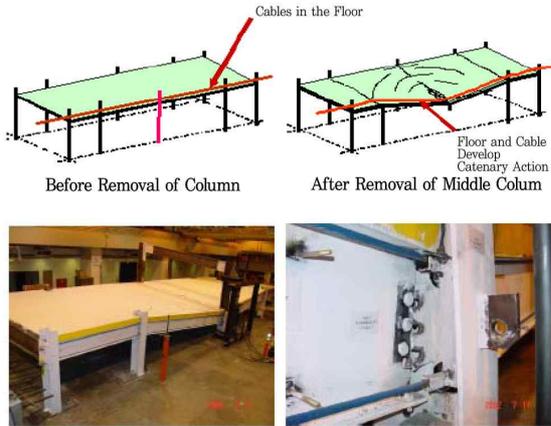


그림 3. 건물의 연쇄붕괴방지를 위한 해법 사례²⁾

4.1 테러예방 및 피해경감을 위한 설계기술

초고층 건축물의 입지여건, 건축물 특성 등의 다양한 요인을 고려한 테러 위험도 평가모델을 개발하고, 각 위험도 평가등급에 따라 비용효율적으로 차등 적용할 수 있는 폭발물테러 예방 및 피해 경감을 위한 구조/계획 설계 지침을 개발하는 연구가 진행중이다. 주요 내용은 다음과 같다<그림 4>.

- 1) 초고층 건축물 테러의 위협/취약/피해요인 유형화
- 2) 위협/취약/피해요인의 가치치 및 함수식 설정을 통한 초고층 건축물의 정량적 테러위험도 평가모델 개발
- 3) 외부로부터의 테러에 대해 부지경계, 건물외피, 실내공간의

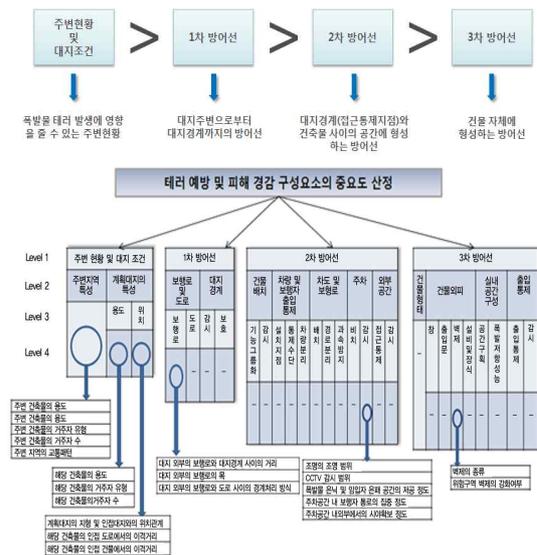


그림 4. 테러예방 및 피해경감을 위한 설계기술 연구동향¹⁰⁾

3단계에 걸친 방어선 개념을 도입하여, 설계항목별 계획설계 지침 개발

- 4) 위험도 등급에 따른 계획및 구조 설계 가이드라인의 비용 효율적 적용방안 제시
- 5) 폭발하중크기에 따른 초고층 건축물의 직접/간접적 피해 수준 및 피해 전과과정에 대한 자료를 수집하고 구조 부재별/시스템별 파괴모드를 분석
- 6) 내부 및 외부 폭발하중의 응답 경감을 위한 구조시스템 연성확보 기술과 구조설계지침 개발
- 7) 법제도화를 위한 기초자료 제공

구조설계지침의 기초자료로 사용하기 위하여 폭발물 이격거리를 달리하는 시나리오로 적용 후 압축재의 폭발에 의한 손상도를 평가하고, 폭발하중을 받아 변형된 압축재의 압축강도를 분석하여 잔여저항성능을 파악하는 연구가 수행되기도 하였다<그림 5>.

4.2 연쇄붕괴저항 설계기술

국내에서 연쇄붕괴저항 설계기술은 이론적 연구는 상당히 진행되어 왔지만 본격적인 시장은 아직 형성되어 있지 않아 기존의 이론적 연구결과를 실용화하는 분야에 노력을 기울인다면 빠른 시간 안에 세계적 기술수준을 갖출 수 있을 것으로 예상된다. 연쇄붕괴 방지기술의 실용화를 위해서는 다음과 같은 연구가 진행 중이다<그림 6>.

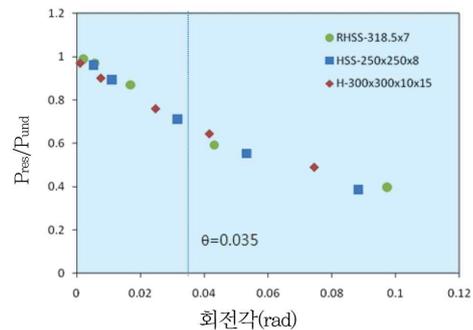
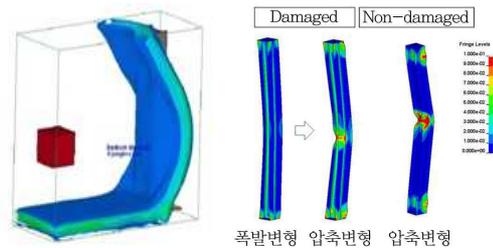


그림 5. 압축재의 폭발손상변형과 잔여저항력 관계⁷⁾

- 1) 구조설계과정에서 개발기술을 적용할 수 있도록 통합설계 전산 플랫폼과 연동되는 해석/설계 자동화 시스템 개발
- 2) 비정형 초고층 구조시스템에 대한 연쇄붕괴 성능평가기법의 개발
- 3) 초고층 접합부의 분석 및 해석적 성능평가를 기반으로 연쇄붕괴 저항능력이 우수한 접합부 개발

5. 결론

최근 국내에서도 건축물 설계지침에 테러방지책이 도입되기 시작하였다. 2009년 8월 ‘서울특별시 초고층 건축물 가이드라인 (별표 1 - 테러예방 및 안전관리 계획 기준)’과 2010년 1월 국토해양부 ‘건축물 테러예방 설계가이드라인’에 테러방지책이 도입되었다. 그러나 이 가이드라인은 건축계획적 가이드라인에 국한되어 있어 신뢰성 있는 체계화된 구조적 방폭 및 연쇄붕괴저항 설계지침의 개발이 필요한 실정이다.

끝으로, 구조설계자가 원하는 것은 ‘Design Criteria’임을 강조하며 다음과 같은 화두를 제시하면서 이 글을 마치고자 한다.

- (1) 폭발압력에 의한 설계 하중은 무엇인가?
- (2) 제안된 하중을 위해 Load Factor가 적용된다면 얼마인가?
- (3) 재료별 허용 응력은 얼마인가?
- (4) 건물 골조 및 외피의 예상되는 거동은 무엇인가?
- (5) 어떠한 소성 거동을 가정하여야 하는가?

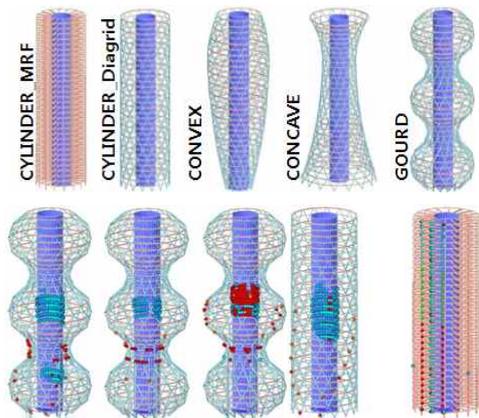


그림 6. 연쇄붕괴저항 설계기술 연구동향 (출처: 초고층복합빌딩사업단)

참고문헌

1. ASCE., Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-02, American Society of Civil Engineers, 2002.
2. Astaneh-Asl, A., “Progressive Collapse Prevention in New and Existing Buildings”, Proc. Of the 9th Arab Structural Engineering Conference, Abu Dhabi, UAE, 2003.
3. DoD., Department of Defense Antiterrorism Standards for Buildings, U.S. Department of Defense, 2002.
4. GSA., Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization, U.S. General Services Administration, 2003.
5. Houghton, D. and Karns, J., “Full-Scale Test Program and Corroborative Analytical Study of Steel Frame Components to Prevent Progressive Collapse”, Research report MHP 02328-00-1-p01: prepared for the U.S. General Services Administration, Washington D.C., 2003.
6. 공지은, 이준호, 김진구, ‘비정형 구조물의 구조 안전성 검토’, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 초고층복합빌딩사업단 특별세션, Vol. 30, No. 1, 2010, pp. 67 ~ 68.
7. 이경구, ‘폭발하중을 받는 강제압축계의 잔여저항성능 평가’, 대한건축학회논문집(구조계), Vol. 26, No. 10, 2010, pp. 37 ~ 42.
8. 이경구, ‘폭발등 극한하중하의 구조물 거동 해석’, 한국전산구조공학회 학회지, Vol. 20, No. 3, 2007, pp. 18 ~ 27.
9. 이경구, ‘전산유체동력학에 의한 고급폭발해석’, 대한건축학회지, Vol. 51, No. 8, 2007, pp. 54 ~ 57.
10. 초고층복합빌딩사업단, 녹색 융복합 핵심 엔지니어링 기술 개발 1단계 보고서, 2010.

담당 편집위원 : 정해문(한국도로공사 도로교통연구원) haimoon@ex.co.kr