

다중이용시설에서의 테러 예방 디자인

Terrorism Prevention Design in Multi-Facility



윤성원*
Yoon, Sung-Won



이경훈**
Lee, Kyung-Hoon



김지현***
Kim, Ji-Hyeon

1. 서론

20세기이후 인류는 과학 및 의학의 발전으로 인류생존의 전통적 위협요인이었던 기아나 질병으로부터는 점차 해방되고 있으나 핵을 포함한 무기경쟁, 테러리즘 등의 새로운 위협에 직면하고 있다. 특히, 과거의 테러가 1995년 4월 700여명의 사상자를 발생시킨 오클라호마 연방청사 폭탄테러와 같이 공공건물 특히 핵심기반시설을 대상으로 한 반면에, 2001년 9월 11일에 발생한 세계무역센터(WTC)테러, 2005년 7월 영국의 런던 킹스크로스역 폭탄테러, 2008년 9월 파키스탄의 메리어트 호텔 폭탄 테러, 그리고 2008년 11월 인도 뭄바이시내 동시 다발연쇄폭탄 테러 사건 등 최근 일어나고 있는 일련의 국제적 테러사건은 대부분 불특정 다수의 사람이 모이는 호텔, 역, 극장, 병원 등 사람들이 많이 모이는 다중이용시설에서 집중적으로 발생하였다는 점이다.

많은 사람들이 집중하여 모이는 대공간구조물도 테러 예방을 위한 건축구조 및 계획 차원의 설계가 필

요하다고 판단된다. 따라서 본 기사에서는 다중이용시설의 테러 유형 및 피해사례와 이에 대비한 건축계획과 구조측면의 대비책에 대하여 간략히 다루고자 한다.

2. 다중이용시설과 테러 위협

2.1 테러 대상으로의 다중이용시설

〈그림 1〉은 시설 유형별 테러 피해의 국제적인 통계이다. 다중이용시설이 시설 수 측면에서 다른 유형에 비해 월등히 많고, 공간적으로도 광범위하게 분포되어 있고 쉽게 접근할 수 있으며, 동시에 많은 인명살상이 가능하므로 국제적 이목을 끌려는 테러 본연의 목적에 적합하다. 백화점, 대형마트, 호텔, 병원, 역, 공항 등 다중이용시설에 대한 테러 위협이 가장 큰 비중을 차지하고 다중이용시설이 테러 위협에 가장 취약하다는 것을 알 수 있다.

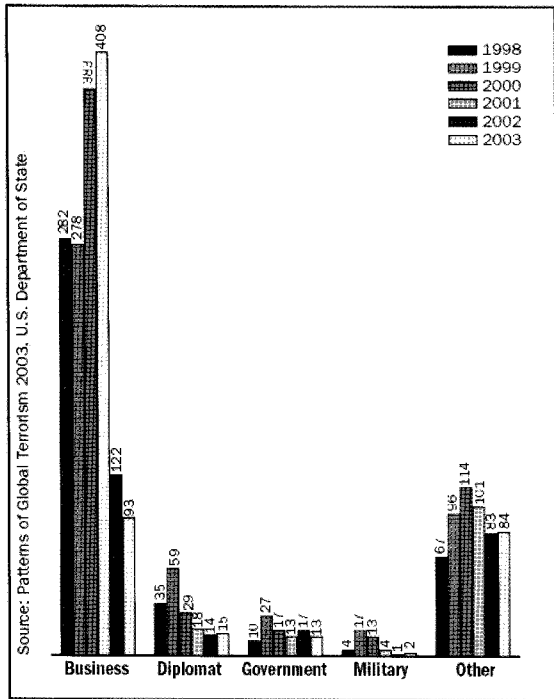
2.2 다중이용시설의 테러

전체 테러에서 50% 가까운 테러가 폭발물 설치에 의한 것으로 나타난다. 폭발물은 제조방법을 쉽게 익힐 수 있을 뿐 아니라 재료 역시 쉽게 구할 수 있어

* 정희원 · 서울산업대 건축학과 부교수
E-mail: swyoon@snut.ac.kr

** 고려대학교 건축학과 교수

*** 서울산업대 건축학과 석사과정



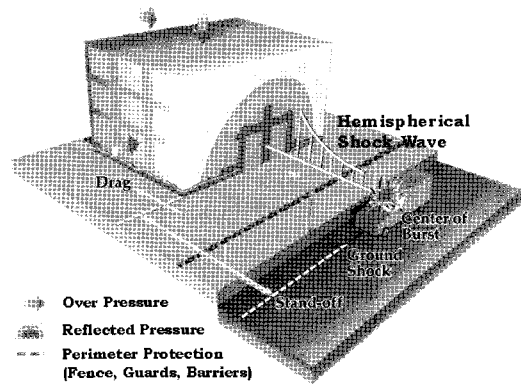
〈그림 1〉 시설유형별 테러피해 국제통계¹⁾

서 전통적으로 테러리스트들이 가장 선호하는 무기유형이다.

테러예방을 위한 구조적 설계의 관점에서 볼 때 가장 중요한 것은 다량의 폭발물을 탑재한 차량을 이용한 폭발물 테러에 대한 대비로서 건축물의 구조에 충격을 줄 수 있는 유력한 테러 유형이다. 다른 형태의 폭발물 테러 위협으로는 사람에 의해 운반되는 소규모 폭발물 테러가 있는데, 로비나 우편물 분류실, 상업시설 등과 같이 안전이 보장되지 않은 취약한 건물 내부에서 폭발할 경우 막대한 손실을 입힐 수 있다.

2.3 테러에 의한 피해 정도

〈그림 2〉는 차량 무기 위협의 매개 변수 및 정의이다. 폭발에 의한 피해는 직접적 피해와 간접적 피해로 나누어 볼 수 있다. 직접적 피해는 폭발지에서 폭발 충격파로 인해 외벽 창문, 지붕, 바닥, 기둥 등의 붕괴 및 파손이며, 간접적 피해는 직접적 피해로부터 시작해서 건물의 다른 구성요소로 연속적인 붕괴를 말한다. 연속붕괴(progressive collapse)는 폭발지점이 건물의 주요 구조부와 인접해 있을 때 발생하고 폭발지점에서 수직으로 전파되며 나중에는 기둥과 기둥 사이로 전달되어 다량의 피해를 가져온다.



〈그림 2〉 차량 무기 위협의 매개 변수 및 정의²⁾

〈표 1〉 폭발로 인한 건물 피해와 인명피해 간의 관계

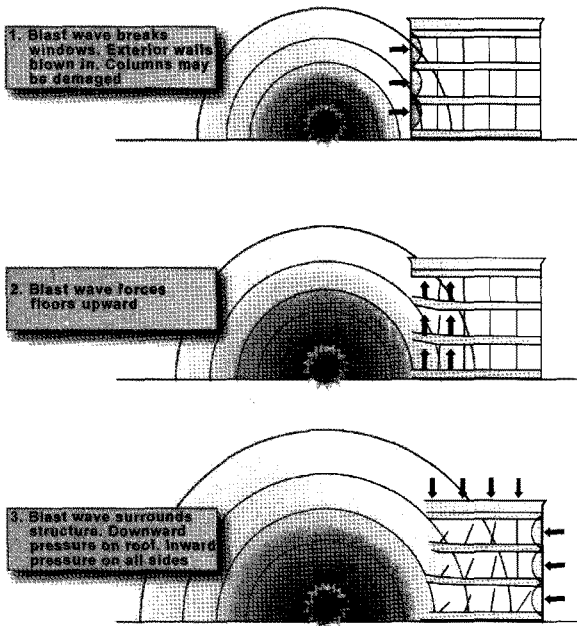
폭발지점과 거리	예상되는 건물 피해유형	인명 피해유형
내부/매우근접	전반적 붕괴	충격과 압박에 의한 사망
외부/근거리	외벽붕괴, 외부 보 및 슬래브 손상	두개골 골절, 뇌진탕
외부/원거리	창문 파괴, 조명 파괴, 파편	파편에 의한 자상, 찰과상

3. 구조계획

3.1 손상 메카니즘²⁾

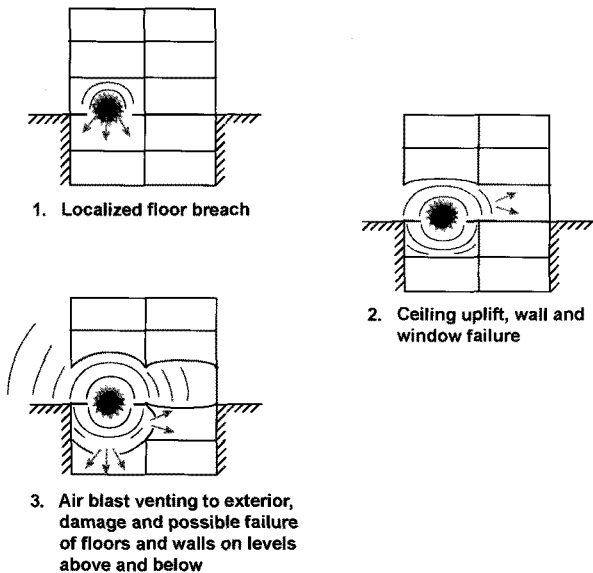
공기 충격파(air-blast shock)로 인한 피해는 공기 충격파로 인한 직접적인 피해와 그 후에 이어지는 연속 붕괴(progressive collapse)로 나눌 수 있다. 공기 충격파로 인한 직접적인 피해는 고밀도의 공기의 압력에 의해 생기는데, 그 위력은 가히 폭발과 비슷한 수준이다. 이런 폭발력이 외벽, 창문, 지붕, 바닥, 그리고 기둥 등에 손상을 준다. 연속붕괴는 그 주변의 구조물들을 하나하나 잠식해가며 진행되는데, 결국 그 피해는 직접적인 피해로 인한 범위와는 비교할 수 없을 정도로 매우 넓은 범위가 된다. 하지만 공기 충격파로 인한 직접적인 피해는 건물의 디자인과 시공 방법에 따라 그 피해 범위가 더 넓어질 수도, 그렇지 않을 수도 있다. 연속 붕괴가 일어나게 하려면 폭탄이 하중을 지탱하는 중요한 구조물에 매우 가까이 있어야 한다. 연속 붕괴는 폭발의 근원지에서부터 시작하여 수직으로 위아래로 혹은 구획과 구획으로 이어지

며 옆으로 퍼져나갈 수 있다(그림 3) 참조.



〈그림 3〉차량무기에 의한 손상 개요²⁾

또한 충격파는 바닥 밑에서 위로 상승하는 압력과 같이 건물이 설계될 때 고려되지 않은 방향으로 작용할 수도 있다. 공기 충격파의 충격은 건물 외피에 가장 먼저 도달한다. 건물 외벽에 가해지는 충격파의 압력은 벽을 파괴 시키거나 유리창을 깨뜨리게 된다. 충격파가 계속 팽창함에 따라 건물 안으로 진행하게 되고, 천장은 위로, 바닥을 아래로 누르게 된다.



〈그림 4〉휴대용 무기로 인한 손상 과정²⁾

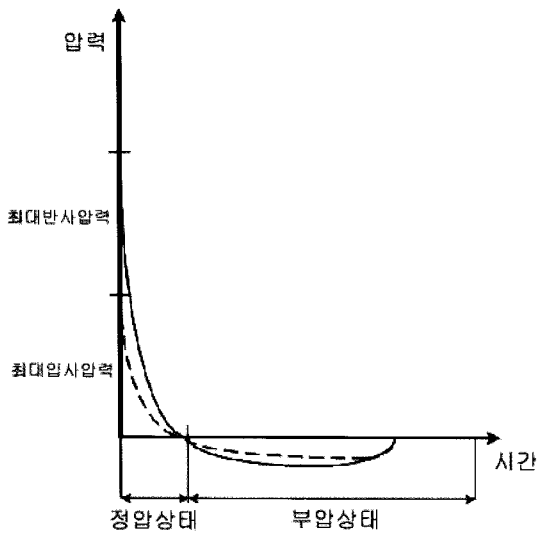
바닥 슬래브의 파괴 이유는 바닥 슬래브는 일반적으로 압력을 받을 수 있는 충분한 넓이를 갖고 있는데 반하여 비교적 두께가 얇기 때문이다. 바닥슬래브의 파괴는 특히 근접폭발과 내부폭발의 형태를 띠고 있으며, 바닥의 붕괴는 지시기둥들을 더 약하게 만들고 건물을 불안정한 상태로 이끌게 된다(그림 4) 참조.

건물 안으로 휴대용 폭탄은 주된 하중 지지 구조물에서 멀리 떨어진 바닥에 설치하여 사용한다. 그 결과는 보다 더 국부적인 손상을 입히는데 각 방향으로 기둥 1스팬에서 2스팬 정도의 범위이다. 폭탄은 더 작지만 공기 충격파 효과는 건물 내부 구조로 인한 충격파의 복합적인 반사로 인해 더욱 커지기 때문이다.^{2), 7)}

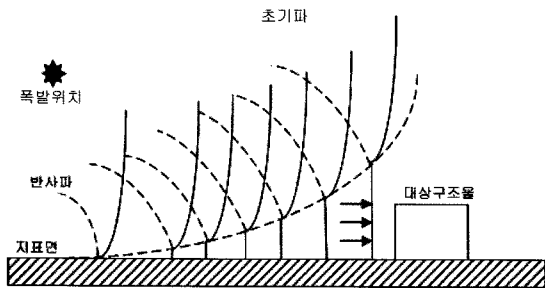
3.2 폭발하중의 특성

고압 폭발은 폭발물질이 고온, 고밀도, 고압의 가스로 변환되면서 폭발 파장을 발생시키는 급격한 에너지 방출의 과정이다. 〈그림 5〉는 전형적인 개방 공간(Free Field)에서의 폭발압력의 시간이력 특성을 보여준다. 개방공간에서의 폭발 파장은 초기에 주변의 대기와 평형상태를 이루기 위해 압력을 순간적으로 상승시킨 후, 수천분의 1초의 아주 짧은 시간동안 감쇠되는 충격파 형태를 이룬다.⁵⁾

이를 정압 상태(positive phase)라 한다. 파의 전면부가 확대되면서 압력은 대기압 이하가 되는 부압 상태(negative phase)가 형성되는데, 이는 충격파 형태의 정압 상태에 비해 영향이 크지 않다. 또한 폭발은 공기를 통해 전달된 입사압력(incident pressure)이 구조물 등과 충돌하게 되면 반사되면서 증폭된다. 이를 반사압력(reflected pressure)이라고 하고, 이 반사압력이 해석 시 고려되는 구조물에 직접적으로 작용하는 폭발하중이다. 폭발하중의 크기는 폭발물질의 양, 폭발물질과 구조물과의 이격거리, 폭발파의 구조물의 입사각 등의 요소로 산정된다. 또는 〈그림 6〉에서와 같이 폭발 하중은 폭발 후 공기를 통해 대상구조물에 직접 전달되는 초기 폭발파(incipient blast wave)와 다른 구조물, 예를 들면 지면에 반사되어 전달되는 반사폭발파로 형성될 수 있다. 대상구조물 전면에 가해지는 폭발하중 해석 시 이 두 가지 폭발파의 상호작용을 고려하여야 한다.^{3), 4), 5)}



〈그림 5〉 폭발압력의 시간이력 특성^{3), 4)}



〈그림 6〉 초기 폭발과 반사폭발의 영향^{4), 5)}

3.3 빌딩 구조 시스템²⁾

구조설계 시 공기 충격파로 인해 받는 직접적인 중요 구조물 파괴로 인한 연쇄붕괴를 고려해야 한다. 공기 충격파로 인한 직접적인 손상에 견디려면, 구조적 특징이 아래 나열된 것과 같은 것이 바람직하다.

◎ 중량

경량의 구조물은 공기 충격파 저항에 적합하지 않다. 예를 들어, 콘크리트로 내부를 채우지 않고 데크 플레이트로 지붕을 구성한 건물은 공기 충격파에 저항을 거의 하지 못할 것이다.

◎ 전단력(shear capacity)

주요한 건축 부재들과 또는 주요 건축 부재들 사이의 연결이 전단 파괴(shear failure)가 일어나기 전에 휨내력으로 저항하게 한다. 취성 전단파괴는 피하는 것이 좋다.

◎ reversing loads에 대한 저항

주요 구조부재와 접합부는 위로 상승하는 압력에

견딜 수 있어야 한다. P·C 콘크리트와 같은 특정 시스템은 위쪽 방향으로 가해지는 압력에 약할 수 있다. 철골과 P·C 콘크리트를 위한 Seated connection system 또한 위로 가해지는 힘에 약하다. Headed stud의 사용은 데크플레이트에 콘크리트를 채워 넣어 보를 위쪽 방향으로 가해지는 압력을 막기 위한 방법으로 추천되고 있다. 연속붕괴의 위험을 줄이려면 다음과 같은 사항을 고려하여 시공해야 한다.

◎ 잉여도(Redundancy)

하중을 분산시키는 많은 경로들의 결합으로 만든 수직 하중지지시스템은 건축물이 파괴되어도 하중을 분산시킬 수 있는 대체 경로를 보장해준다.

◎ 타이(Ties)

주응력선(principal line)에 수직 방향의 통합시스템으로 이루어진 통합적 시스템은 폭파 시공 때 하중을 분산시킬 수 있다.

3.4 구조설계

건물 설계 시 아래와 같은 조치를 취하는 것이 좋다.

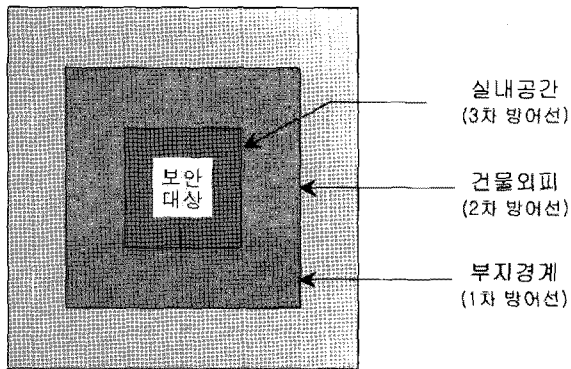
◎ 골조(frame) 구조물의 경우, 스패ن(Span)을 제한해야 한다. 기둥 사이 간격을 너무 넓게 할 경우 기둥 붕괴가 일어났을 때 하중을 재분배하지 못할 수 있게 된다.

◎ 건물 외주부는 가장 손상 받기 쉬운 부위이다. 특히 도로와 가까운 건물 일수록 손상을 더 쉽게 받게 된다. 또한 하중을 재분배하지 못하기 때문에 건축 부재의 손상이 발생하였을 경우, 하중을 재분배할 수 있는 능력이 더 떨어지게 된다.

◎ 전이보(transfer girders)를 사용하는 것은 건물의 안정성을 크게 손상시킨다. 전이보는 공기 충격파의 영향에는 더 손상되기 쉽게 된다. 전이보의 사용이 불가피하다면, 다른 잉여의 하중전달시스템(transfer system)을 추가로 사용하는 것이 바람직하다.

4. 건축물 설계상 3중 방어선의 개념

〈그림 7〉은 3중 방어선의 개념이다. 디자인 프로세스에서 가장 중요한 취약요소 보강을 위한 전략개발 단계에서 보편적으로 사용되는 개념이 3중 방어선

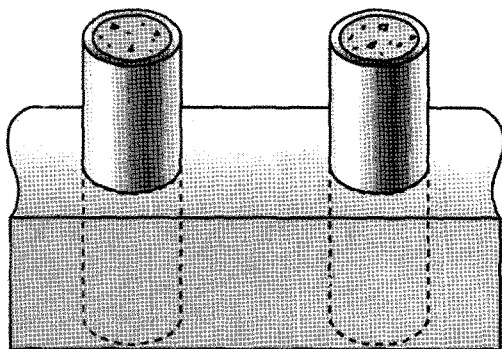


〈그림 7〉 3중방어선의 개념²⁾

의 개념이다. 3중 방어선이란 각종 보안통제 수단이 부지경계, 건물외피, 실내공간이라는 세 단계의 중복된 방어선으로 구성되는 것을 의미한다.

4.1 부지경계 디자인

제 1방어선인 부지의 부지외곽 경계는 최초의 장애물이 되는 펜스, 출입구 등을 말하는 것으로 전체시설계획 측면에서 부지외곽 경계에서 중요한 목표는 공공 보행인에게 위화감을 주지 않는 디자인에 의해서 테러범의 돌파를 방지, 혹은 최소한 지연시키는 역할을 충분히 할 수 있도록 적절한 장애물 설치하고 적절한 이격거리를 두도록 하는 것이다(그림 8, 9)참조. 또한 건물 내부에서 외부의 상황을 충분히 감지할 수 있도록 외곽 경계와 건물 외피 간의 이격거리 내에 시각적 장애물이 없도록 clear zone을 확보하는 것이 필요하다.



〈그림 8〉 충격방지 블라드의 일반형태(좌)²⁾

4.2 건축물 외피경계 디자인

제2방어선인 건물 외피는 테러범이 제 1방어선인 부지경계를 돌파하였을 때 건물 내부로 진입하기 위



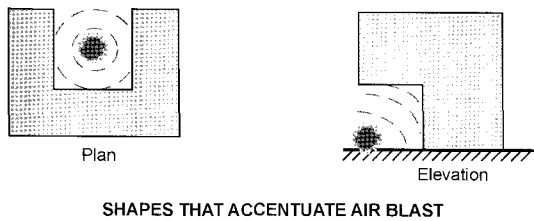
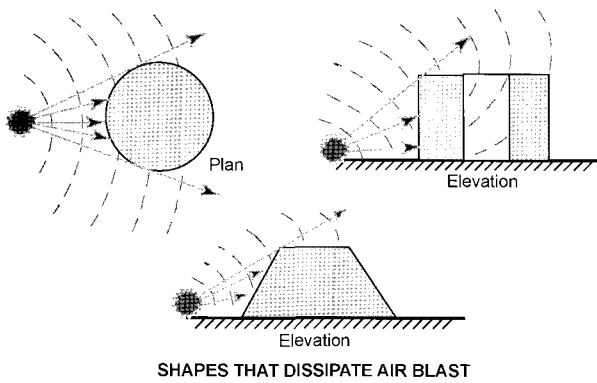
〈그림 9〉 블라드 디자인 사례²⁾

해 반드시 돌파해야 하는 외벽, 지붕 혹은 외벽이나 지붕의 각종 개구부 등 건물의 외피를 말한다. 전체 시설계획 측면에서 외피경계에서 가장 중요한 계획목표는 건물로 침투할 수 있는 개구부의 최소화 및 외벽의 고강도화라고 할 수 있다. 주요실의 경우 다중의 벽체로 계획하거나 외기와 직접 면하지 않도록 'box in boxes' 개념을 고려하는 등 외벽을 다각도로 보강할 수 있는 방법이 강구되어야 한다.

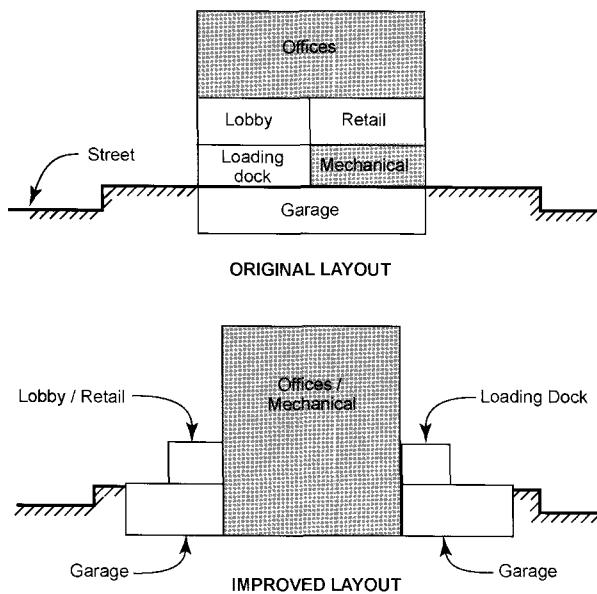
건물 형태는 〈그림 10〉과 같이 가급적 단순한 형태로 디자인하되 오목한 부분이나 캔티레버가 발생하는 부분을 지양하며, 상층부가 셋백(set-back)되는 형태가 바람직하다. 또한 저층부 외벽에 설치되는 창문은 가급적 크기와 수를 줄이는 것이 바람직하며, 저층부, 로비 등에 설치되는 창문유리나 마감재 등은 비산파편에 의한 인명피해를 최소화할 수 있도록 안전성에 대한 검토 후 선정하도록 한다.

4.3 실내공간 경계 및 전기전자 보안설비 시스템 디자인

제 3방어선은 크게 시설 내 기능의 전반적 레이아웃, 보안 요구도에 따른 조닝과 출입문, 창문, 벽체, 혹은 덕트나 천장 등의 침입경로에 대한 물리적 보강으로 구성된다. 다중 이용공간과 보안이 요구되는 주요 공간과 조닝을 통해 수직적, 수평적으로 분리배치하고 사이에 완충 공간, 혹은 강화된 벽체나 슬래브를 배치한다. 제 3방어선이 적절하게 계획된다면 설사 1,2 방어선을 돌파한 침입자를 효과적으로 저지할 수 있다. 취약요인을 강화시키기 위해 필요한 조닝, 동선 체계 및 보안설비 시스템 요구도 규명해야한다(그림 11)참조.



〈그림 10〉 공중 폭발시 피해를 최소화할 수 있는 건물외피 형태(상)와 피해를 증가시키는 건물외피형태(하)²⁾



〈그림 11〉 테러 피해를 줄이기 위한 조닝개선의 사례²⁾

5. 결론

전 세계적으로 테러의 위협이 증가하고 있고 국내에서의 테러위협 역시 증가하고 있다. 이런 상황에서 다중이용시설, 공공시설, 기타기반 시설 등 주요건물들은 항상 테러 및 범죄에 노출되어 있다. 이러한 시점에서 우리는 주요 건축물에 건축 디자인 프로세스를 개선하고 그리고 구조적으로 안정적인 시스템을 구축해서 치명적인 범죄나 테러를 사전에 예방하거나 피해를 최소화 할 수 있다고 생각된다.

참고문헌

1. FEMA, "FEMA 453, Risk Assessment : A How-to Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings", 2005
2. FEMA, "FEMA 427, Risk Management Series, Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks. ", FEAM, 2003
3. FEMA, "FEMA 426, Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings", 2003
4. 김진구, "폭발하중에 의한 강재기둥의 거동", 대한건축학회 논문집, 2007
5. Nair, R.S "Progressive Collapse Basic," Proceedings of AISC-SIDNY Symposium on Resisting Blast and Progressive Collapse, AISC, 2003
6. FEMA, "FEMA 427 Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks", 2003
7. FEMA, "FEMA 277, The Oklahoma City Bombing : Improving Building Performance through Multi-Hazard Mitigation", 1996