

방호 구조물 설계와 해석

Design and Analysis of Protective Structure



박종일*

*서울과학기술대학교 안전공학과 조교수

1. 서론

테러는 1차 세계대전 발발의 원인을 제공하기도 하였지만 일반적으로 국가 대 국가의 문제보다는 정치적 다툼에 의한 국내 분쟁에 국한되어 왔다. 하지만 최근 20년간 세계 무역센터 테러(1993년 2월), Alfred P. Murrah Federal Building 테러(1995년 4월), 세계무역센터 테러(2001년 9월), 연평도 포격(2010년 11월) 등 테러에 의한 막대한 인명 및 재산 피해가 발생해 왔으며, 정부 기관에서는 이를 방지하기 위한 방법을 찾기 시작했다. 테러의 가장 큰 특성은 개인 혹은 소수집단에 의해 발생하지만, 전 세계의 안정성에 피해를 줄 만큼 그 영향이 크다는 것에 있다. 따라서 적은 자원으로 큰 피해를 발생시킨다는 의미에서 비대칭전쟁(asymmetric conflict)으로 불리기도 한다. 국내의 경우 그 발생 확률이 상대적으로 낮으나, 발생 시 야기될 수 있는 막대한 정치, 사회, 경제적 피해를 방지하기 위해서는 최소한 주요 인프라시설, 관공서, 사회적으로 중요한 민간 건물에 대해서는 폭발에 대한 대비가 이루어져야 한다. 테러에 대한 성공적인 방호를 위해서는 여러 겹의 방호방법들이 균형을 이루어 마련되어야 하며, 구조적 방호기술은 모든 방법이 실패했을 때 사용되는 최후의 방어선이라 할 수 있다.

구조적 방호를 위해서 공학자들은 위협으로부터 발생하는 하중의 분석, 구조물 피해분석, 방호 설계방법 등을 개발하여야 한다. 본 기고에서는 폭발물에 대한 구조물의 방호 설계 및 해석과 관련하여 주요 소요기술과 해결되어야 하는 문제점에 대해 기술하고자 한다.

2. 방호 설계

일반적으로 설계기준을 마련하기 위해서는 관련된 현상에 대한 비교적 완전한 이해가 바탕이 되어야 한다. 하지만 방호 분야의 경우 아직 해결되어야 하는 과제가 많아, ACI code와 같은 포괄적인 설계기준이 개발되기에는 시간이 필요할 것으로 보인다. 미국의 경우에도 방호 설계와 관련하여 많은 수의 설계 매뉴얼이 존재하지만, 하나의 통일된 기준은 아직 도출되고 있지 않다. 하지만 이러한 매뉴얼들은 방호 설계의 각 단계마다 훌륭한 참고자료로 사용될 수 있다. 단 상반된 내용을 담고있는 매뉴얼이 있으므로 주의하여야 한다. 표 1¹⁾에는 방호 설계에 필요한 각 단계와 관련 매뉴얼을 기술한다. 유럽의 경우에도 포괄적인 방호기준이 아직 도출되지 않았으며, 매뉴얼 수준의 자료가 개발되고 있다.²⁾

표 1 설계 단계 및 참고 문헌¹⁾

Design Step	References
A. Define facility operational performance requirements.	1, 2, 4, 7
B. Establish quality assurance (QA) criteria for analysis, design, and construction work, and assign	8, 12
C. Perform threat, hazard, and risk assessments, and estimate future risk.	1, 7, 13
D. Determine explosive sources, their locations, and magnitudes	1, 2, 5, 7, 11, 13
E. Estimate corresponding loading conditions.	4, 5, 11, 13
F. Establish general siting, facility layout, and design criteria.	1, 2, 3, 7, 11, 12, 13
G. Proportion members for equivalent static loads.	4, 5, 8, 9
H. Compute blast loads on facility more accurately.	4, 5, 11
I. Compute loading from fragments, crater ejecta, ground shock, etc.	5
J. Combine all dynamic loads and perform preliminary dynamic analyses.	4, 11, 5
K. Redesign facility to meet selected criteria estimated loading effects.	4, 5
L. Consider nuclear radiation, EMP, thermal effects, CB, etc., if appropriate.	10
M. Verify design by acceptable methods.	
References	
1. UFC 4-020-01, DoD Security Engineering Facilities Planning Manual (2009) 2. UFC 4-010-01, DoD Anti-Terrorism Standard (2007) 3. ASCE Structural Design for Physical Security (1999) 4. UFC 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (2008) 5. TM 5-855-1, US Army Technical Manual (1986) 6. UFC 4-023-07, Design to Resist Direct Fire Weapons Effects (2008) 7. FEMA Reference Manual 426 (2003) 8. UFC 4-023-03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (2009) 9. GSA Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines (2003) 10. ASCE Manual 42 (1985) 11. ASCE Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, 2 nd ed.(2010) 12. ASCE Standard, Blast Protection of Buildings (2011) 13. Handbook for Blast Resistant Design of Buildings, Wiley (2010)	

3. 피해 해석

3.1 개요

폭발이 발생하는 경우 그림과 같은 순서로 피해가 예측

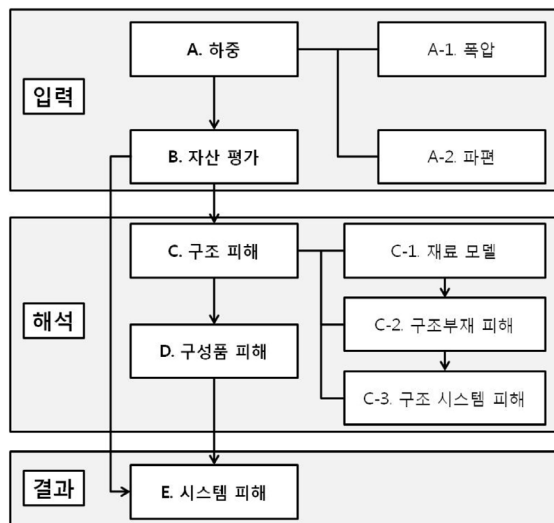


그림 1 피해 예측 단계

될 수 있다. 피해 해석의 입력으로는 폭발에 의해 발생하는 하중과, 보호해야 할 시설물 즉 자산의 정보가 필요하며, 이를 토대로 구조물의 국부적 및 시스템적 피해, 구조물 내부의 사람 및 장비와 같은 구성품 피해를 분석하게 된다. 그 후 구조물과 구성품의 피해로 인한 자산의 피해 즉 시스템의 피해를 도출한다.

3.2 하중 분석

테러에서 주로 사용되는 급조폭발장치(Improvised Explosive Device, IED) 기폭 시에는 충격파, 지중파, 파편, 열 등이 발생하며, 이 중 근접(closed-in) 기폭 및 접촉(contact) 기폭을 제외하면 대부분의 피해 분석은 충격파와 파편만을 고려하여 이루어 질 수 있다. IED 기폭 시 발생하는 충격파의 특성(최대 과압, 충격량, 압력-시간 이력 등)은 화약종류 및 무게, IED의 외피 형상 및 재질, 구조물과 기폭점의 상대적 위치, 기폭 고도(지표면, 공중), 구조물 형상 등에 의해 결정된다. 화약과 외피 관련 특성은 등가TNT 개념을 도입하여 일반화시켜 사용한다.

화약의 경우 그 조성에 따라 생성되는 충격파의 특성이

상이함으로 동일한 최대 과압, 충격량, 또는 반응열을 발생시키는 TNT의 무게를 TNT등가계수로 정의하여 사용한다. TNT등가계수는 TM 5-855-1³⁾, TM 5-1300⁴⁾(UFC 3-340-02로 대체됨) 등을 참조하여 결정할 수 있다. 단 일반적으로 언급되는 TNT등가계수는 열린 공간에서 지상 및 공중 기폭 일 경우만 유효하며(거리에 따라 다른 값이 사용되기도 한다), 이 외 경우에 사용될 때(예를 들어 건물 내부 기폭)에는 타당성을 검토해야만 한다.

외피가 존재할 경우 폭발 에너지의 일부가 외피를 파괴하고 파편을 가속시키는데 사용됨으로, 충격파의 강도가 감소되며, 그 감소 정도는 외피와 화약의 무게비에 의해 결정된다(이러한 접근은 매우 단순한 계산 시 적용될 수 있으며 정확한 예측을 위해서는 실험이 필수적이다). 흔히 사용되는 경험식은 Fano, Modified Fano, Warren, Fisher, Modified Fisher 등이 있다. 또한 발생하는 파편은 폭압에 비해 내부 구성품을 파괴시키는데 매우 효율적임으로, 생성되는 파편의 분포, 무게, 속도, 형상 등이 분석되어야 한다.

화약량과 거리에 따른 충격파 특성은 구형태의 에너지 전파를 가정한 Hopkinson-Cranz 혹은 삼승근환산법^{5),6)}이 주로 사용되며, 이 때 사용되는 변수가 환산거리(scaled distance)이다. 이 환산법은 다수의 실험을 통해 검증되었지만, 일부 문헌⁷⁾에 의하면 환산거리가 $0.16m/kg^{1/3}$ 이하일 경우(즉 근접기폭) 적용될 수 없는 것으로 나타난다.

등가TNT양이 결정되면 기폭에 의해 발생하는 충격파 특성을 경험식이나 Hydrocode를 이용하여 예측할 수 있다. 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 CONWEP(TM 5-855-1의 방법론을 적용)⁸⁾은 구형(화약의 형상이 구형이며 공중에서 기폭) 및 반구형(화약의 형상이 반구형이며 지표면에서 기폭) TNT의 기폭에 한하여 실험 데이터를 기반으로 한 프로그램이며, 구조물에 의해 반사되는 추가적인 반사파에 대해서는 고려하지 않는다. 또 다른 프로그램인 SHOCK⁹⁾은 TM 5-1300의 방법론을 적용하여 육면체 공간의 내부에서 기폭이 발생했을 때의 입사압력(incident pressure), 벽에 의해 추가적으로 생성되는 반사파, 그리고 충격량을 산출한다. 하지만 내부 기폭 시 중요하게 고려되어야 하는 기체압력(gas pressure)는 무시된다. 국내에는 공개되어 있지 않은 BLASTX¹⁰⁾의 경우 내부 기폭에 의한 입사압력, 추가적인 반사압력, 기체압력 등을 모두 고려할 수 있으며 마하스텝(Mach stem) 또한 고려된다.

CONWEP, SHOCK, BLASTX 등 대부분의 경험식을 이용한 프로그램들은 예비 설계 단계에서 간략하게 적용하는데에는 문제가 없으나, 상세 설계 및 해석에는 많은 문제점을 가지고 있다. 예를 들어 건물의 외부에서 기폭이 발생한

경우 벽이 받는 충격파 특성은 CONWEP 또는 BLASTX를 이용하여 예측이 가능하지만, 벽이 파괴되고 난 후 건물의 내부로 전파되는 잔류 충격파는 예측할 수 없다. 즉 이러한 분석 방법으로는 많은 양의 화약이 고려되더라도 외부에 위치한 기둥 또는 벽만이 파괴될 수 있음으로 건물의 피해를 실제보다 작게 평가할 가능성이 있다. 구조물 내부 기폭의 경우 외부 기폭 경우와 비교하여 기술적으로 해결해야 하는 문제가 더 많다. 내부 기폭의 경우 기체압력이 상당히 크고, 반사되는 충격파들의 중첩이 고려되어야 하는데, 이를 실험을 통해 식으로 일반화시키기 어려우며(BLASTX의 경우 계산은 가능하나 실험결과와 비교하였을 때 완전하지 않다) 외부 기폭과 같이 구조부재 파괴 후 잔류 충격파 및 기체압력 전파문제가 해결되지 않는다. 하중분석을 위해 AUTODYN, LS-DYNA 등에서의 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 상태방정식을 이용한 상세수치해석을 이용할 수도 있지만, 잔류 충격파 전파 및 고온에서의 기체압력에 대한 문제가 완전히 해결되고 있지 않다.

3.3 자산평가

자산평가 시에는 구조 특성(예: 강도, 디테일, 크기)뿐 아니라 시설물의 정확한 목적과 이를 위해 필요한 기능들의 관계에 대한 분석이 이루어져야 한다. 예를 들어 생산 공장 시설물의 경우, 시설물의 목적은 제품의 생산을 지속적으로 하는 것이고, 이를 위해서는 공장 건물뿐 아니라, 전원, 근로자 등의 기능이 지속적으로 유지되어야 한다. 이러한 목적과 기능의 관계를 논리적으로 표현하기 위해 Fault Tree 또는 Kill Tree를 사용할 수 있다. Fault Tree에서는 구조물의 주요 구조부재뿐 아니라 구조물 내부의 구성품까지 포함시킴으로써, 구조 및 구성품 피해에 의한 시설물의 전체의 피해를 예측할 수 있고, 더 나아가 가장 취약한 부분

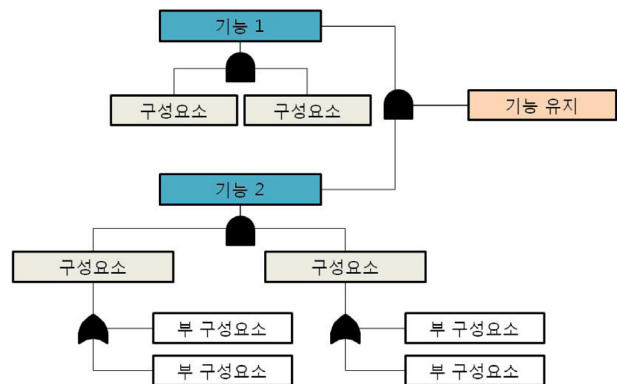


그림 2 Fault Tree 예시

의 우선 순위를 정량적으로 분석함으로써 설계에서의 최적화를 이룰 수 있다.

3.4 구조 피해

폭발로부터 발생하는 충격파와 파편이 구조물에 타격되었을 때 생성되는 하중은 지속시간은 매우 짧음(msec 단위)으로, 직접적으로는 구조물 전체보다 국부적인 구조부재 파괴를 야기한다. 구조부재의 파괴 후에는 구조물의 자중과 잔류 강도에 의한 추가적인 붕괴가 발생할 수 있다. 따라서 구조물 피해해석을 위해서는 구조부재 피해해석과 이 결과를 이용한 이차적인 구조 시스템 붕괴해석이 독립적으로 이루어진다.

3.4.1 구조부재 피해 분석

구조부재 피해 분석을 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법은 압력-충격량(Pressure-Impulse, P-I) 곡선이다. P-I 곡선은 부재의 피해기준이 정해지면, 이 기준만큼의 거동을 야기하는 하중의 형태를 최대 입사과압과 충격량의 관계로 나타낸 것이다. 즉 구조부재가 파괴되는 하중을 동해석을 통해 사전에 계산하여 나타낸 것이 P-I 곡선이다. P-I 곡선을 이용하면 단시간 내에 구조부재 피해를 예측할 수 있으므로, 설계 특히 예비설계 단계에 많이 사용되고 있다. 하지만 현재 사용되고 있는 P-I 곡선은 아래와 같이 크게 세 가지의 개선되어야 할 점을 가지고 있으며 이에 대한 연구가 필요하다:

- 피해정도의 정량화
- 폭압에서의 구조부재 동해석
- 복잡한 폭압 형태에서의 피해

3.4.1.1 피해 정도의 정량화

P-I 곡선은 부재의 거동이 정해진 피해기준을 초과하는 하중을 나타내는 곡선이다. 이 때 피해기준으로는 주로 최대 처짐, 지지점에서의 회전각 등이 사용되며, 피해기준을 초과 하는 경우 부재의 피해정도는 정성적으로 표시한다. 예를 들어 미군의 경우 RC 구조부재의 피해기준은 표 2와 같으며, 피해정도는 아래와 같이 기술하고 있다.¹¹⁾

- **Blowout:** The component is overwhelmed by the blast load causing debris with significant velocities.
- **Hazardous failure:** The component has failed, and debris velocities range from insignificant to very significant.
- **Heavy damage:** The component has not failed, but it has significant permanent deflections causing it to be un-repairable. The component is not expected to withstand the same blast load again without failing.
- **Moderate damage:** The component has some permanent deflection. It is generally repairable, if necessary, although replacement may be more economical and aesthetic. The component is expected to withstand the same blast load again without failing but the end state may be a lower level of protection.
- **Superficial damage:** No visible permanent damage. The component is expected to withstand the same blast load and maintain the level of protection.

이러한 정성적 피해정도는 구조부재의 실험 후 육안으로 피해를 개략적으로 판단하는데 도움이 될 수 있다. 하지만 구조부재, 특히 주구조부재(primary structural component)의 파괴 후 전체 구조물의 안정성에 미치는 영향을 분석하기

표 2 피해기준¹¹⁾

Element Type	Expected Element Damage							
	superficial		moderate		heavy		Hazardous	
	μ_{max}	Θ_{max}	μ_{max}	Θ_{max}	μ_{max}	Θ_{max}	μ_{max}	Θ_{max}
Single-Reinforced Slab or Beam-Column	1	-	-	2°	-	2°	-	2°
Double-Reinforced Slab or Beam-Column without Shear Reinforcement	1	-	-	2°	-	2°	-	2°
Double-Reinforced Slab or Beam-Column with Shear Reinforcement	1	-	-	4°	-	4°	-	4°
Walls and Seismic Columns	0.9	-	1	-	2	-	3	-
Non-seismic Columns	0.7	-	0.8	-	0.9	-	1	-

에는 적합하지 않다. 따라서 피해정도도 정량적으로 평가되어야 한다. 이를 위해 구조부재의 피폭 후 잔류강도(residual load carrying capacity)를 피해정도로 사용하여 P-I 곡선을 도출하는 연구가 진행되고 있다.^{12),13)} 잔류강도를 기반으로 P-I곡선이 생성되면 국부손상에 의해 발생하게 되는 구조부재의 잔류강도를 매우 빠른 속도로 예측할 수 있으며, 이 정보를 전체 구조물에 입력으로 사용하면 연쇄붕괴(Progressive collapse) 해석에 직접적으로 사용될 수 있다.

3.4.1.2 폭압에서의 구조부재 동해석

폭압을 받는 구조부재의 동해석을 위해서는 재료 모델과 물성치에 대한 연구가 필요하며, 특히 빠른 하중 재하 속도 하에서 강도가 증가하는 변형률속도효과(rate effect)에 대한 적절한 고려가 이루어져야 한다. 개략적으로 사용할 수 있는 방법으로는 TM 5-1300⁴⁾에서와 같이 정적 강도에 동적 강도증가계수(Dynamic Increase Factor, DIF)를 곱하여 강도로 사용하는 것이 있다. 또 다른 강도에 영향을 주는 요소로는 경계층효과(boundary layer effect), 확산현상(diffusive phenomena)에서 비율의 차이, 수화(hydration)에서의 열, 화학 작용, 결점(defect)의 확률적 분포, 균열의 진행에 관계되는 에너지소산(energy dissipation)등에 의한 크기효과(size effect)가 있다. 따라서 재료 모델의 개발을 위해서는 변형률속도효과와 크기효과를 동시에 다 고려할 수 있도록 하여야 한다. 특히 축소 모형 시험의 경우 크기효과에 의해 환산법칙(scale law)이 적용되지 않을 가능성이 많으므로 주의하여야 한다. 변형률속도와 크기효과와의 상관관계에 대한 일부 연구^{14),15)}가 있으나 여전히 개선되어야 할 점이 많다.

P-I 곡선 작성, 예비 설계, 설계 수정 단계 등 다수의 부재에 대한 동해석이 이루어져야 하는 경우 계산 시간의 문제로 단차원계모델(Single Degree of Freedom, SDOF)이 주로 사용된다. 물론 최종 단계의 설계 또는 소수의 구조 동해석을 위해서는 ALE와 같은 상세수치해석 방법이 사용될 수 있다. 일반적으로 구조 부재의 P-I 곡선은 전단파괴를 고려하지 않고 휨 변형만을 고려한 SDOF 모델을 사용해 왔으나,¹⁶⁾ RC 슬라브와 보의 경우 지지점에서의 전단 파괴가 실험을 통해 관찰되었다.^{17),18)} 또한 P-I 곡선 산출 시 부재의 저항력을 띠철근, 사선전단, 압축력 등의 효과를 고려하지 않은 완전탄성 또는 탄성-완전소성으로 단순화시켜 동해석을 수행해 왔다. 이러한 가정을 적용한 P-I 곡선은 측정된 실험결과와 차이를 보였으며, 이를 보정하기 위해 P-I 곡선의 형태는 유지시키고 실험값과 일치되도록 수평/

수직 이동시키는 방법을 사용해 왔다. 하지만 이 또한 구조 부재의 피해를 정확하게 기술하기에는 한계가 있다. 따라서 부재의 다양한 거동과 재료적 특성을 고려하여 신뢰성있는 P-I 곡선을 도출하기 많은 연구가 진행 중에 있다.¹⁹⁾⁻²¹⁾

3.4.1.3 복잡한 폭압 형태에서의 피해

일반적인 구조 동해석 시 폭압을 고려할 때 폭압은 그림 3과 같이 단순한 형태로 가정된다. 하지만 3.2장에서 기술되었듯이 개활지의 기폭을 제외하고 대부분의 경우 폭압의 형태는 다수의 침단을 가지며 그림 3으로 가정되기 어렵다. 특히 구조물 내부 기폭의 경우 충격파 외에 기체압력이 추가적으로 발생함으로 그 형태는 더욱 복잡해진다. 각각의 압력-시간 이력 형태에 대해서 P-I 곡선을 도출할 수는 있으나, 존재할 수 있는 형태가 무한대임으로 이러한 접근은 현실적인 못하다. 따라서 압력-시간 이력을 최대 입사과압 및 충격량으로 나타내는 것이 아닌 새로운 접근법이 필요하다.²²⁾

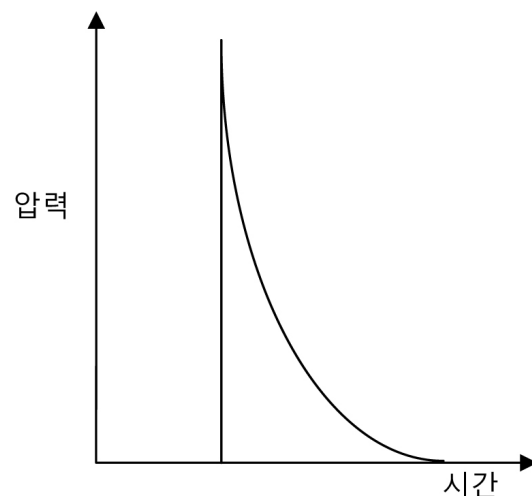


그림 3 일반적인 압력-시간 이력

3.4.1 구조 시스템 피해 분석

표 1에서 기술된 GSA와 UFC 매뉴얼에서는 건축 구조물의 연쇄붕괴와 관련하여 하나의 기둥이 완전히 손상되었을 때 구조물이 붕괴되지 않으면 안전한 것으로 취급한다. 하지만 일반적인 폭발 하중에서는 하나의 기둥이 파괴되는 것이 아니라 다수의 기둥이 피해를 입을 수 있으며, 완전 파괴가 아닌 잔류 강도를 가질 수 있으므로, 하나의 기둥을 제외하고 분석하는 방법은 폭발 하중에서 구조 시스템의 피해 분석에는 적절하지 않을 수 있다. 따라서 다음과 같은 방법을 이용한 연쇄붕괴 해석이 추천된다:

- 폭발 하중 산정
- 폭발에 의한 구조 부재들의 피해 즉 잔류강도 분석
- 각 부재의 잔류강도를 구조 시스템에 입력으로 사용
- 피해를 입은 구조물의 구조 안정성에 의한 붕괴여부 판단

3.5 구성품 피해

구조물이 폭발 하중을 받을 때 구조물 자체가 생존하더라도 구조물 내부에 있는 주요 자산(인원, 장비 등)이 파괴되면 구조물의 역할을 다했다고 보기 어렵다. 따라서 3.2장에서 기술된 방법으로 분석된 폭압 및 파편이 내부 구성품의 생존성에 미치는 영향을 분석해야 한다. 이를 위해서 폭압에 의한 생존확률은 P-I 곡선을(이때 피해 정도는 살상 확률 P_{kp} 로 한다), 파편에 의한 생존확률(P_{kf})은 살상 확률-파편속도 및 무게 곡선을 사용한다. 이 두 곡선을 이용하면 구성품의 생존확률은 $1-(1-P_{kp}) \times (1-P_{kf})$ 로 산출될 수 있다.

3.6 시스템 피해 분석

구조물과 구성품의 피해 분석이 완료되고 나면, 3.3장에서 도출된 Fault Tree를 이용하여, 시스템의 피해를 종합적으로 도출해 낼 수 있다. 이를 통해 취약부위를 정량적으로 분석할 수 있고, 이를 보완하는 최적화 설계 안을 도출할 수 있으며, 다수의 시설물이 존재할 때 방호등급(Protection Level)과 결합하여 우선적으로 보완되어야 하는 시설물과 그 방법을 결정할 수 있다.

4. 총 합


시설물의 방호와 관련된 공학적 분야에 대해 개략적으로 소개하였다. 방호 설계 및 해석을 위해서는 다양한 기술 분야가 필요하며, 이는 개인 혹은 한 기관의 독자적인 연구로 해결하기에는 그 범위가 너무 광범위하다. 따라서 지속적인 정부, 대학 및 산업체 협업을 통한 R&D가 필요하며, 그 연구 분야는 아래와 같이 정리될 수 있다:

- 위험 평가(위협, 자산, 취약성 평가)
- 하중 정의(구조물 내·외부 기폭에 의한 폭압 전파, 구조물-폭압 상호 작용, 폭압, 일차 파편, 이차 파편을 동시에 고려한 하중 등)
- 재료 거동(변형률속도, 크기효과 등)
- 전산 해석(검증을 위한 실험 방법 개발 및 수행, 실험 결과와 비교를 통한 현재 사용 가능한 해석 툴의 정확

도 산출, CSD 및 CFD 코드 개발, CSD-CFE-열역학 상호작용 코드 개발)

참고문헌

1. Krauthammer, T. and Park, J.Y., "Challenges in Protective Structures R&D," 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12), 2012
2. Dalenius, R., Lidström C., and Magnusson J., "Handbook for Protection of Buildings," 4th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures, 2012
3. Department of the Army, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual TM 5-855-1, November 1986.
4. Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Revision 1 (Department of the Army Technical Manual TM 5-1300, Department of the Navy Publication NAVFAC P-397, Department of the Air Force Manual AFM 88-22), November 1990.
5. Hopkinson, B., British Ordnance Board Minutes, 13565, 1915.
6. Cranz, C., Lehrbuch der Ballistik, Springer-Verlag, Berlin, 1926.
7. Huffington, N.J., Jr., and Ewing, W.O., Reflected Impulse Near Spherical Charges, Technical Report BRL-TR-2678, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, September 1985.
8. Hyde, D.W., User Guide for Microcomputer Code ConWep, Instruction Report SL-88-1, US Army, Waterways Experiment Station, April 1988 (Revised 22 February 1993).
9. NCEL, SHOCK Users Manual, Version 1.0, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, CA, January 1988.
10. Britt, J.R., Enhancements of the BLASTX Code for Blast and Thermal Propagation in Protective Structures: BLASTX Version 2.0, prepared for U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, by Science Applications International Corporation, November 2, 1992.
11. U.S. Army Corps of Engineers, "Single Degree of

- Freedom Response Limits for Antiterrorism Design,” PDC-TR-06-08, 2006
12. Shi, Y., Hao, H. and Li, Z.X. , “Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads,” *International Journal of Impact Engineering*, 35, 2007
 13. Park, J.Y., and Krauthammer, T., “Pressure impulse diagrams for simply-supported steel columns based on residual load-carrying capacities,” *Structural Engineering and Mechanics*, 39(2), 2011
 14. Elfahal, M.M. and Krauthammer, T., Dynamic Size Effect in Normal and High Strength Concrete Cylinders,” *ACI Materials Journal*, 102(77), 2005.
 15. Park, J.Y., and Krauthammer, T., “Development of an LEFM dynamic crack criterion for correlated size and rate effects in concrete beams,” *International Journal of Impact Engineering*, 36(1), 2009.
 16. Oswald, C.J. and Skerhut, D., FACEDAP User’s Manual, Southwest Research Institute and U.S. Army Corps of Engineers, Omaha District, April 1993.
 17. Kiger, S.A. et al., Vulnerability of Shallow-Buried Flat Roof Structures, Technical Report SL-80-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1980-1984.
 18. Slawson, T.R., Dynamic Shear Failure of Shallow-Buried Flat-Roofed Reinforced Concrete Structures Subjected to Blast Loading, Final Report SL-84-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1984.
 19. Soh, T.B., and Krauthammer, T., “Load-Impulse Diagrams of Reinforced Concrete Beams Subjected to Concentrated Transient Loading,” Final Report to U.S. Army, ERDC, PTC-TR-006-2004, Protective Technology Center, Pennsylvania State University, April 2004.
 20. Blasko, J.R. and Krauthammer, T., “Pressure Impulse Diagrams of Structural Elements Subjected to Dynamic Loads,” Final Report to U.S. Army ERDC, PTC-TR-002-2007, Protective Technology Center, Penn State University, January 2007.
 21. Ng, P.H. and Krauthammer, T., “Pressure-Impulse Diagrams for Reinforced Concrete Slabs,” Final Report to U.S. Army, ERDC, PTC-TR-007-2004, Protective Technology Center, Pennsylvania State University, November 2004
 22. Park, J.Y. and Krauthammer, T. “Alternative Approach of Pressure-Impulse Diagram for Multi-Peak Pressure,” 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM’12), 2012 

[담당 : 조정래, 편집위원]