

폭발하중과 방호구조물의 설계

Blast Load and Design of Protective Structures



변근주*
Keun-Joo Byun



김호진**
Ho-Jin Kim



남진원***
Jin-Won Nam

1. 서언

폭발하중에 의한 구조물의 거동 및 설계에 관한 연구는 국방 산업 혹은 석유화학산업 등과 같이 위험요소에 상대적으로 많이 노출되어 있는 기술자들에 의해 한정적으로 연구가 진행되어 왔다. 그러나 최근에는 911테러와 같이 군사구조물이 아닌 민간 건축·토목 구조물에도 폭발과 같이 매우 큰 충격하중이 적용될 수 있다는 사례를 바탕으로 폭발하중에 대한 구조물의 방호설계·해석 및 보강 기술에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

폭발하중에 대한 구조물의 설계는 단자유도계와 다자유도계의 집중질량 모델을 이용하여 근사적으로 설계하는 단순기법이 현재까지도 방호 구조물의 설계 및 해석분야의 보편적인 이론으로 통용되고 있다. 그러나 이러한 단순기법 이외에도 폭발하중에 의한 구조물 설계 및 평가 기법에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 최근에는 정밀 유한요소해석 및 최신 전산유체역학적인 해석기법들이 소개되고 있다.

한편, 일반적인 무기효과에 의한 구조물의 설계 및 해석에 대한 방법론은 TM5-855-1, AFPAM 32-1147, NAVFAC P-1080, DAHSCWEMAN-97 등과 같은 기준의 정립을 통해 체계화되었으며, 여기서는 방호 구조물의 설계 및 해석의 기준과 함께 폭발하중에 의한 구조물의 응답을 간단하고 신속히 평가할 수 있도록 다양하고 방대한 실험 자료들을 포함하고 있다.

한편, 폭발하중은 국가안보 및 군사보안과 밀접한 관련이 있기 때문에 국내외적으로 관련 연구분야의 정보 공유가 상당히 제한적이며, 이로 인해 국내에서 폭발하중을 받는 구조물의 거동에 대한 연구는 매우 제한적으로 수행되어왔다. 그러나 최근 미국 뉴욕시의 지하철에 방호설계가 적용된 것처럼 국내에서도

군사시설뿐만 아니라 민간시설물에 방호설계 개념을 도입하기 위한 기술력 확보에 대한 필요성이 대두되고 있다.

따라서 본 고에서는 폭발하중과 방호구조물 설계와 관련된 국내의 자료 및 기존 연구결과를 수집분석하여 폭발하중의 특성과 폭발하중을 받는 구조물의 방호설계에 관한 기술을 소개함으로써 이 분야에 대한 기술적 이해를 돕고 향후 지속적이고 적극적인 연구를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 폭발하중과 폭발효과

2.1 폭발하중

방호구조물 설계에서는 일반적인 구조설계에서 다루는 하중 이외에 폭발이라는 현상을 추가적인 하중으로 고려하게 된다. 폭발은 높은 열이나 충격에 의하여 높은 에너지가 매우 짧은 속도에 방출되는 일종의 화학작용으로 정의할 수 있으며, 폭발속도는 4,000 ~ 8,400 m/s 범위로 건축·토목에서 고려되는 하중에 비하여 매우 빠르다는 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 폭발에 의해 발생하는 아주 짧은 시간동안의 동적하중은 충격영역에 속하는 비진동 충격하중의 형태로써 고온·고압의 gas와 함께 압력과, 폭발물 혹은 구조물의 잔해에 의한 파편, 고온의 열을 방사한다. 그 중에서도 구조물에 높은 온도와 압력으로 작용하게 되는 압력파가 방호구조 설계시 주요 압력하중으로 고려된다. <그림 1>은 폭발에 의해 구조물에 작용하게 되는 전형적인 압력하중의 형태를 나타낸 것이다. <그림 1>의 시간에 따른 압력하중의 곡선은 정압력 단계와 부압력 단계로 나뉘게 되는데, 일반적으로 폭발하중에 대한 설계에서 부압력은 고려하지 않는다. 한편, 압력-시간 이력 곡선의 적분은 충격량을 나타낸다.

2.2 폭발하중 효과

구조물에 미치는 폭발하중의 효과는 폭발위치에 따라 자유공간

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 명예교수
byun@yonsei.ac.kr

** 정회원, (주)에이티맥스 기술연구소 차장

*** 정회원, Southern University at Baton Rouge,
Assistant Professor

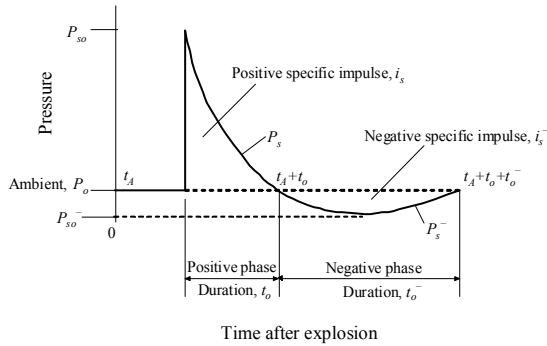


그림 1. 폭발하중의 압력-시간 이력곡선

폭발, 지표면 근접 폭발 및 지표면 폭발과 같이 구분할 수 있으며, 폭발위치에 따라 모두 상이한 압력전파 형태를 갖는다. 또한 폭발하중의 특성은 폭발물의 형상, 구조물과의 위치조건 등에도 영향을 받는다. 폭발하중의 크기를 산정하는 기법은 대부분 폭발실험 결과를 기반으로 하고 있기 때문에 이를 정식화하는 것에는 한계가 존재한다. 특히, 폭발하중은 국가방위와 밀접한 관계로 대부분의 자료에 접근이 극히 제한되어 폭발하중의 크기와 폭발하중이 구조물에 미치는 연구는 미국을 비롯한 일부 국가에 국한되어 진행되어 왔다. 현재는 폭발하중과 관련된 일부 실험 자료들을 UFC3-340-01, TM5-1300 및 DOE/ TIC-11268에서 제한적으로 제공하고 있으며, 최근 UFC3-340-01에 기초하여 전형적인 무기효과를 계산할 수 있는 프로그램인 ConWEP이 제한적으로 개발되었다. ConWEP은 압력과, 파편, 지표면 충격, 탄공 등의 효과를 고려한 폭발하중의 계산이 가능하며, 그 중 압력파의 경우 폭발각도를 고려하여 자유공간, 지표면 근접 및 지표면 폭발시의 폭발하중을 산정할 수 있다.

한편, 폭발물의 종류, 장약량 및 구조물에서 떨어진 거리가 결정되면, 압력과 특성을 평가하기 위해서 Hopkinson-Cranz에 의한 삼승근 환산법칙을 사용한 환산거리를 사용하게 된다. <그림 2>의 x축에 해당하는 환산거리(Z)는 폭발물로부터 구조물까지의 거리(R)와 TNT의 양으로 된 폭발물의 총중량(W)로 표현된다. <그림 2>는 지표면 폭발과 같이 반구형 폭발형태를 띠는 경우에 있어 환산거리를 이용하여 압력파의 특성을 나타내는 각종 변수를 제공하며, 구조물에 작용하는 압력하중 형태로서 시간에 따른 폭발하중을 결정하게 된다.

3. 폭발하중에 의한 구조물의 거동

3.1 재료거동

폭발하중에 의한 구조물의 거동은 재료적 거동과 구조적 거동으로 구분하여 고려할 수 있다. 먼저 재료적 거동을 살펴보면,

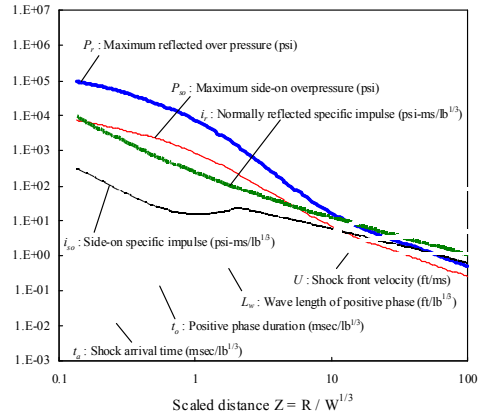
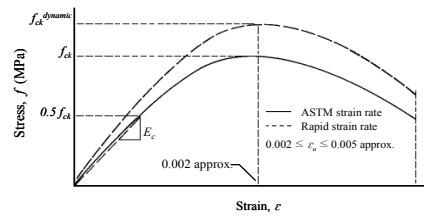


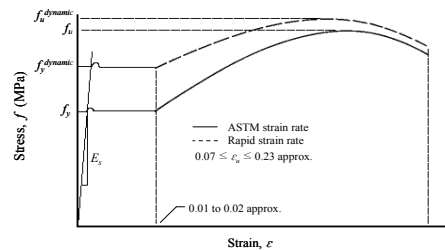
그림 2. 반구형 폭발형태의 TNT 지표면폭발시 압력파 특성 (TM5-1300, 1990)

동적하중에 대한 재료의 응답은 정적하중에 대한 응답과 매우 상이한 것으로 일반적으로 알려져 있다. 즉 하중의 재하 속도가 증가할수록 재료의 강도는 증가하는 경향이 있으며, 이러한 강도증가 효과는 변형률 속도 및 강도의 증가에 관한 연구와 실험을 통해 확인되고 있다.

특히 폭발하중의 경우에는 매우 짧은 시간동안 큰 변형률을 야기시키기 때문에 폭발하중에 의한 높은 변형률 속도는 재료의 강도를 증가시켜 국부적인 파쇄와 동적 전단파괴에 대한 저항을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 변형률 속도의 증가에 따른 콘크리트와 강재의 강도증진효과는 <그림 3>의 그래프를 통해 나타내었으며, 이를 반영하여 동적해석에 사용되는 저항함수를 유도해야 한다. 따라서 폭발하중에 대한 재료의 강도는 동



(a) Stress-strain curve for concrete



(b) Stress-strain curve for reinforcing steel

그림 3. 동적하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률 곡선

적증가계수와 그에 따른 강도증가계수를 고려하여 평가하도록 하고 있으며, 콘크리트의 경우에는 방호설계 요구조건에 부합될 수 있도록 최소 27 MPa 이상의 강도를 적용하는 것이 바람직하다고 제안된 바 있다. 철근 및 콘크리트에 적용되는 설계용 동적 증가계수는 <표 1>과 같다.

3.2 구조물 거동

폭발하중에 대한 구조물의 거동은 구조물의 형태, 파괴모드 그리고 적용가능한 해석기법 등에 의거하여 설명이 가능하다. 본 고에서는 충분한 강성 및 연성확보를 위하여 철근겹침 및 이음 등과 같은 세부설계가 적절히 수행된 철근콘크리트 구조요소 중 보, 슬래브, 기둥 및 벽체에 대하여 폭발하중에 대한 거동을 살펴본다.

3.2.1 보의 거동

폭발하중을 받는 보의 대표적인 파괴모드는 <그림 4>와 같다. 박막거동은 지점에서 구조물에 발생된 변형에 충분히 저항할 수 있는 강성을 확보한 경우에 인장단면에서의 철근이 항복

표 1. 폭발하중에 대한 동적증가계수

하중종류	원거리 설계범위			근거리 설계범위		
	철근		콘크리트	철근		콘크리트
	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f_{dc}/f_{ck}	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f_{dc}/f_{ck}
휨	1.17	1.05	1.19	1.23	1.05	1.25
사인장	1.00	-	1.00	1.10	1.00	1.00
직접전단	1.10	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10
부착	1.17	1.05	1.00	1.23	1.05	1.00
압축	1.10	-	1.12	1.13	-	1.10

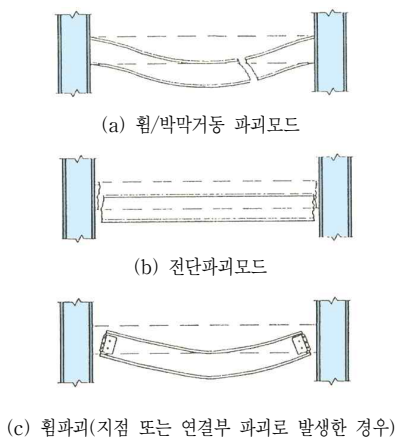


그림 4. 폭발하중을 받는 보의 파괴모드

으로부터 시작된다. 이러한 휨/박막파괴는 가장 대표적인 폭발하중에 의한 파괴형태로 이에 대한 응답 계산과 설계방법이 정립되어 있으며, 다양한 실험을 통해서도 입증된 바 있다.

전단파괴는 폭발하중에 대한 설계시 휨/박막파괴와 비교하여 상대적으로 중요도가 낮다. 일반적으로 폭발하중에 의한 보의 파괴형태는 전단파괴의 형태를 보일 것으로 예상하기 쉬우나 실제로는 그렇지 않은 것으로 알려져 있다. 이러한 전단파괴는 매우 국부적인 형태로 나타나며, 폭발물이 매우 가까운 위치에서 폭발한 경우 휨변형이 발생하기 이전단계에서 발생하게 된다.

또한 휨파괴는 부재내 소성힌지가 형성되어 발생하게 되는 파괴형태로써 휨/박막파괴와 전단파괴보다 훨씬 작은 하중에서 발생할 수 있다. 따라서 보의 연결부 및 지점부는 소성힌지가 발생되지 않도록 충분한 강성을 확보할 수 있도록 설계되어야 한다.

3.2.2 슬래브의 거동

폭발하중을 받는 일방향 슬래브의 거동은 보의 거동과 매우 유사하다. 그러나 이방향 슬래브의 경우에는 폭발하중이 2차원 상의 공간적인 개념으로 작용한다는 점에서 보와 다소 상이하다. 일반적으로 슬래브는 같은 역할을 하는 보의 경우보다 강도는 낮은 반면 더 많은 하중을 부담하게 되지만, 구조적 특성상 더 많은 여분의 하중전달 경로를 가지고 있기 때문에 이방향 슬래브의 경우에는 지점파괴에 대해 큰 저항력을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 슬래브는 일반적으로 <그림 5>와 같이 인장/박막파괴, 전단파괴와 휨파괴의 세 가지의 형태로 파괴되는 것으로 알려져 있다.

전술한 바와 같이 슬래브에 있어 박막/휨/전단파괴의 거동은 보에서 설명한 것과 유사하지만, 슬래브에서는 국지적인 파괴가

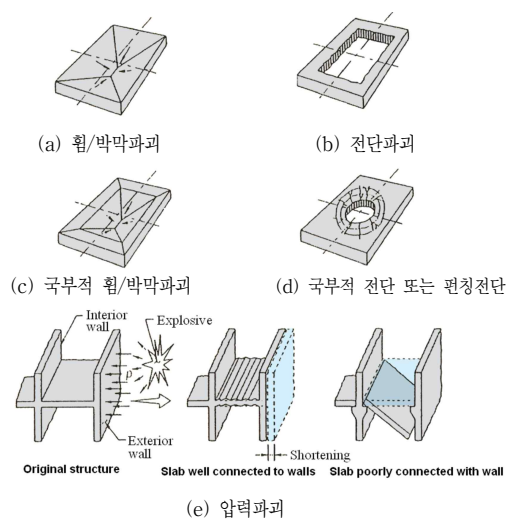


그림 5. 폭발하중을 받는 슬래브의 파괴모드

보다 일반적이며, 이러한 국지적인 파괴는 폭발물과의 이격거리와 슬래브의 상대적 강도와 연성도에 관련이 있다. 또한 <그림 5>의 압쇄파괴는 슬래브와 벽체에서만 발생하는 특이한 파괴형태로써 폭발하중에 의하여 과도하게 변형이 발생한 벽체 혹은 기둥에 의한 간접적 하중재하로부터 기인한다. 부적절한 연결부 설계가 이루어진 경우에는 슬래브를 지지점으로부터 분리시켜 극심한 파괴를 일으킬 수 있다.

3.2.3 기둥의 거동

폭발하중에 대한 기둥의 주요 응답으로는 P- Δ 응답과 전단응답이 있으며, P- Δ 응답은 기둥에서만 발생하는 응답형태로 보의 휨과괴 형태에 축방향력의 영향이 추가된 응답을 의미한다. 기둥에서의 축방향력은 폭발하중에 의해 발생하는 횡방향 변형을 증가시키는 요인으로 작용될 수 있다. 따라서 축방향력의 영향을 감소시키기 위해서는 기둥 연결부의 보강을 통해 부차적 하중경로를 구성하고, 설계시 일정 수준의 손상이 발생되면 인접 부재가 하중을 대신하여 저항할 수 있도록 기둥을 설계하는 개념이 필요하다.

기둥에서의 전단응답 거동 모드는 보의 경우와 유사하지만, 축방향력이 기둥의 전단강도를 증가시켜 전단파괴 강도가 증가되는 특성이 있다. 또한 기둥에서는 압쇄응답으로 인한 파괴가 일어날 가능성은 매우 낮은 것으로 알려져 있다.

3.2.4 벽체의 거동

폭발하중을 받는 벽체의 경우에는 기둥과는 달리 P- Δ 응답이 없는 슬래브에서와 유사하다. 내부 폭발을 받는 철근콘크리트 건물에서 내력벽의 거동은 주로 휨 및 박막작용인 것으로 알려져 있다. 폭발하중을 받는 벽체 거동에서 특이한 점은 벽돌구조의 벽체의 경우 변형발생시 아치작용으로 저항강도가 증가된다는 점을 들 수 있다.

4. 폭발하중을 받는 구조물의 설계 기준

일반적으로 폭발하중을 받는 구조물의 설계기준 및 규정은 부재의 변형이나 변위를 제한하는 방식이며, 허용되는 변형이나 변위는 구조물이나 구조부재의 손상 정도에 따라 달라진다. 또한 구조물의 손상 정도는 구조물 자체의 보호, 구조물 내의 인명 보호, 혹은 구조물 내의 기자재 보호 등과 같은 방호목적에 따라 허용되는 손상이 달라지게 된다.

구조부재의 손상을 유발하는 주된 요인인 국부적인 파괴는 부재에서 폭발원까지의 거리와 구조부재의 강도 및 강성에 영향을 받게 된다. 폭발하중과 같이 탄성한계를 넘어서는 변형을 유발

하는 높은 속도의 하중인 경우, 구조물의 국부적 파괴는 주로 휨 변형이나 지점의 변형각 및 전단 변형률에 의해 결정되며, <그림 6>과 같이 구조부재의 변형 한계는 지점 회전 θ 와 연성비 μ 에 의해 나타낼 수 있다.

연성비는 탄성한계에서의 변위와 구조부재에 발생한 총 변위량의 비로 정의되는 값이며, 경우에 따라서는 최대변위량과 항복변위량의 비로 나타내기도 한다. 일반적으로 철근콘크리트 부재의 변형은 지점회전으로 나타내고, 강재 부재의 변형은 연성비로 나타낸다.

<표 2>는 방호 목적과 구조부재의 종류에 따른 변형한계의 예를 나타낸 것이다. 폭발 시 발생하는 압력하중이나 파편효과로부터 구조물내의 인명 및 기자재를 보호하기 위해서는 첫 번째 방호 (범주 1)에서 제안하는 변형 한계값을 적용하게 되고, 폭발하중에 의한 구조부재 자체의 붕괴 및 파괴를 방지하기 위해서는 표에서 제안하는 두 번째 방호 (범주 2)의 변형 한계값을 적용하게 된다. 한편, <표 2>에서 제안하는 변형 한계값은 구조 부재에서 발생할 수 있는 소성 변형을 고려한 값이기 때문에 폭발하중을 받은 구조물을 다시 사용하기 위해서는 충분한 손상 평가를 통한 보수 및 보강에 대한 검토가 이루어져야 한다.

만일 보수 및 보강없이 구조물을 재사용하려고 한다면 발생하는 모든 변형이 탄성 범위 내, 즉 연성비가 1 이하로 평가되어야 한다. 하지만 이러한 구조물의 설계는 과다설계가 되기 쉬우며 결국 과도한 건설비용으로 연결된다. 따라서 폭발하중을 받는 구조물의 효율적인 설계를 위해서는 건설재료의 동적응답 특성 및 구조부재의 기준값을 제공하는 방호설계기준 및 지침을 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 설계기준 및 지침을 이용하면 목표

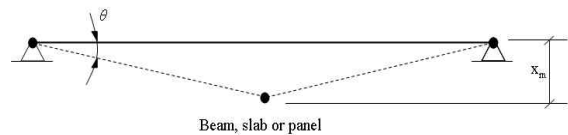


그림 6. 구조부재의 지점회전 형상 (TM5-1300, 1990)

표 2. 폭발하중을 받는 구조부재의 변형 한계

구조부재	방호단계			
	1		2	
	θ	μ	θ	μ
철근콘크리트 보와 슬래브	2° ¹⁾	-	4° ²⁾	-
강재보와 강판 ³⁾	2°	10	12°	20

- 1) 개방 또는 폐쇄된 공간에서의 폭발하중을 받는 전단철근은 반드시 슬래브의 경우에는 $\theta > 1^\circ$ 인 경우 해당된다. 폐쇄된 공간은 모든 보에 적용된다.
- 2) 8° 이상의 지점회전은 부재가 충분한 인장박막거동의 횡구속력이 있을 경우에만 가능하다. 더불어, 철근콘크리트 슬래브의 인장박막거동은 TM5-1300(1990)에서 확인할 수 있다.
- 3) 브레이싱은 연성거동에 따라 적절히 제공된다.

하는 구조물의 근사적인 방호성능을 즉각적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 현재의 방호설계기준 및 지침들은 수많은 실험 및 해석결과를 바탕으로 보다 합리적인 최적의 기준을 제시하기 위해 지속적으로 개정되고 있다. 그러나 설계자들이 이러한 방호설계기준 및 지침들을 이용하기 이전에 주의해야 할 점은 이러한 방호설계기준 및 지침들은 지점 변형이나 최대 변위량 등으로 구조물의 전체 거동을 고려하기 때문에 방호 구조물의 설계나 구조물의 근사해석에 제한되어 사용되어야 한다는 것이다. 다시 말하면 폭발하중을 받는 구조물의 정밀해석에는 사용될 수 없다는 것이다. 다음에는 방호구조설계에 주로 사용되는 5가지 설계기준 및 지침을 요약하여 나타내었다.

4.1 Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions (TM5-1300)

TM5-1300은 폭발하중에 대한 구조설계를 위해 가장 광범위한 내용을 담고 있는 설계지침이다. 이 설계지침의 목적은 폭발 및 폭발물에 관련된 모든 구조물이나 구조시설의 전반적인 방호설계 방법을 제안하는 것으로 폭발, 파편하중, 충격과 하중, 동적구조해석의 원리, 철근콘크리트 설계, 강재구조 설계, 폭발관련 시설 설계 등의 내용을 포함하고 있다. TM5-1300에서는 지점의 변형에 대한 제한으로 구조부재의 허용 설계값을 제시하고 있으며, 지점 변형값은 3점-힌지 원리를 이용하여 단순히 계산된다.

4.2 Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons (TM5-855-1)

기존 TM5-855-1은 철근콘크리트 부재에 대하여 최대변위에 대한 항복변위의 비인 설계 연성비를 5~10 범위로 적용하여 보 및 슬래브의 휨설계 기준을 제안하고 있으며, 지점 변형에 대한 설계 한계값은 제안하지 않았었다. 그러나 최근에 개정된 TM5-855-1에서는 지점 변형에 대한 설계 한계값을 적용하도록 수정 제안되었다. 하지만 TM5-855-1의 최신 개정판은 일반에게 공개되지 않고 있다.

4.3 Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effect (ASCE)

ASCE manual 42라고 불리는 이 설계지침은 핵무기의 공격에 대비한 구조물의 설계를 위해 정립되었다. 이 지침은 비공개 자료들로부터 공개가능한 범위의 정보들을 추출하여 작성된 것으로 좀 더 보편적이고 일반적인 설계방법을 제시하고 있다. 따라서 설계자들에게 방폭설계의 개념을 효과적으로 제공할 수

있지만 구조상세나 세부설계를 위한 지침으로서는 다소 부족하다고 할 수 있다. ASCE manual 42에서 제안하는 설계 한계값들은 다음의 <표 3>에 나타내었으며, 휨 설계에 대한 설계 연성비는 다소 보수적인 값으로 제안하고 있다.

4.4 Design of Blasts Resistant Buildings in Petrochemical Facilities (ASCE)

이 설계지침은 주로 석유화학 산업에서 사용되는 시설물에 대한 방호설계 및 시공방법을 위해 제안된 것으로 구조물의 손상 정도를 낮은 손상도, 중간 손상도 그리고 높은 손상도 3가지로 구분하여 각각에 대한 설계 한계값을 제안하고 있다. 여기서 낮은 손상도는 구조물이나 구조부재에 제한적인 국부손상이 발생되어 단순 보수를 통해 구조물을 재사용할 수 있는 경우로 정의된다. 중간 손상도는 구조물이나 구조부재에 전반적인 손상이 발생하여 구조물의 재사용을 위해서는 심각한 수준의 보수 및 보강이 필요한 경우를 의미한다. 마지막으로 높은 손상도는 구조물이나 구조부재가 구조적 기능을 상실하거나 붕괴에 이르는 상태를 나타낸다. 다음의 <표 4>는 이 지침에서 제안하는 철근 콘크리트 부재의 설계 한계값들을 나타낸 것이다.

표 3. 연성비의 응답설계 한계

기본 구조물의 재료, 형태, 파괴모드	최대 연성비, μ
철근콘크리트 보 ¹⁾ 와 일방향 슬래브 전단파괴(사인장)	1.3
전단파괴(전단-압축)	1.5
인장철근의 최소 1/4의 압축력을 받는 휨파괴 좌굴 또는 압축에 의한 보-기둥 ²⁾ 파괴	7.0
이방향슬래브와 플랫슬래브 전단파괴	1.5
휨파괴	2.0
휨파괴	10.0
철근 보 ³⁾ 와 플레이트거더 복부판의 파괴 또는 플랜지의 좌굴로 인한 파괴 휨파괴	1.5
압축력을 받는 보-기둥 ⁴⁾ 의 파괴	12.0
전반적 항복	2.0
좌굴	1.3
지붕, 벽면	1.0 ⁵⁾

- 1) 아치형태와 실린더 형태의 파괴모드를 포함함.
- 2) 아치형태, 실린더형태, 돔형태의 파괴모드를 포함함.
- 3) 아치형태와 실린더 형태의 휨파괴 모드를 포함함.
- 4) 아치형태, 실린더형태, 돔형태의 파괴모드를 포함함.
- 5) 프레임으로 전달되는 충격량을 적용함.

4.5 Structural Design for Physical Security (ASCE)

이 지침은 공식적인 설계도서는 아니지만 폭발하중, 구조거동, 각종 방호설계 및 보강방법에 대한 상세한 내용들을 담고 있으며, 건물의 창문이나 문 및 시설통로의 설계 그리고 기존 건물에 대해 폭발하중에 대한 보강 방법을 포함하고 있다. 이 지침에서는 각각의 철근 콘크리트 구조부재에 대해 지점 회전 및 단면

전단 변형률을 고려하여 손상도를 정의할 수 있는 한계값들을 다음의 <표 5>와 같이 제안하고 있다.

5. 결론

폭발하중은 매우 빠른 속도와 높은 압력으로 구조물에 작용하게 되기 때문에 기존의 일반적인 정적하중이나 동적하중에 대하여 설계된 구조물들에서는 이러한 비정상적인 하중으로 인하여 치명적인 부재의 손실이나 전체 구조물의 점진적인 붕괴가 발생할 수 있다. 따라서 폭발의 영향이 예상되는 구조물 설계시 폭발 파에 의한 초과압력하중을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 최근 민간 토목·건축 구조물에 폭발과 같이 매우 큰 충격하중이 작용된 해외사례들로 인하여 국내에서도 콘크리트 구조물의 방호설계·해석 및 보강 기술에 대한 연구가 증가되고 있다. 그러나 현재까지 관련분야로의 국내 연구는 전무하며, 방호개념에 기초하여 폭발하중을 고려한 구조물의 설계기법이 정립되어 있지 않은 실정이다.


특히 최근 발생한 연평도 포격도발과 같은 사건에서도 알 수 있듯이 우리나라는 불안정한 정세 속에 다양한 형태로 구조물에 매우 큰 하중이 작용할 위험성이 높다고 할 수 있다. 이러한 국내 상황을 고려할 때 방호설계에 대한 국내 기술력 확보는 필수적인 과제일 것이다. 분명 우리나라는 방호기술 분야의 후발주자이지만 그동안 눈부신 발전을 통해 축적된 우수한 기술력을 바탕으로 국내 실정에 맞는 독자적이고 선두적인 기술을 확보할 수 있는 충분한 잠재력을 가지고 있다고 확신한다. 따라서 정부 차원에서의 자료제공, 실험허가 등과 같은 적극적인 연구지원 및 정보공유를 바탕으로 폭발하중에 대한 이해를 증진시키고, 폭발하중에 의한 구조물의 거동을 체계적으로 분석하여 설계기법 정립, 정밀해석기술 개발 및 보수보강기법 구축 등에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 

표 4. 철근콘크리트의 응답기준

부재형태	응력형태	μ	지점회전, $\theta^{2)}$		
			하	중	상
보	휨 전단 ¹⁾ 콘크리트 콘크리트+스터립 스터립 압축	N/A	1	2	4
		1.3			
		1.6			
		3.0			
1.3					
슬래브	휨 전단 ¹⁾ 콘크리트 콘크리트+스터립 스터립 압축	N/A	2	4	8
		1.3			
		1.6			
		3.0			
1.3					
보-기둥	휨 압축(C) 인장(T) 압축과 인장사이 전단 ¹⁾	1.3 ³⁾	1	2	4
		10.0			
		1.3			
		1.3			
전단벽, 다이아프램	휨 전단 ¹⁾	3.0 1.5	1	1.5	2

- 1) 전단저항은 휨저항의 120%보다 적음
- 2) 스테립은 지점회전이 2° 이상 큰 경우 필요함
- 3) 연성비 = $0.05(\rho - \rho') < 10$

표 5. 철근콘크리트 부재의 전형적인 파괴기준

부재형태	재료물성	파괴형태	기준	경미한 손상	보통 손상	극심한 손상
보	철근콘크리트($\rho > 0.5\%$ / 전면)	휨/박막거동	경간대비 중앙처짐비, δ/L	4%	8%	15%
전단		단면의 평균전단변형률, γ_v	1%	2%	3%	-
슬래브		휨/박막	δ/L	4%	8%	15%
전단		γ_v	1%	2%	3%	-
기둥		압축	감소길이/높이	1%	2%	4%

참고문헌

1. ASCE Committee on Dynamic effect of the Structural Division, Design of Structures to Resist Nuclear Weapons effect, American Society of Civil Engineers, Manuals and Reports on Engineering Practice-No. 42, 1985.
2. ASCE Task Committee on Blast Resistant Design, Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, Task Committee Report on Blast Resistant

- Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers, 1997.
3. ASCE/SEI Task Committee, EJ Conrath, TK Krauthammer, KA Marchand, and PF Mlakar, Report of Structural Design for Physical Security, Task Committee on State of the Practice, Structural Engineering Institute of ASCE, 1997.
 4. Biggs, J. M., Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York, 1964.
 5. Dede, M., Lipvin-Schramm, S., Dobbs, N., and Caltagirone, J. P., "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Volume 6. Special Considerations in Explosive Facility Design", Amman & Whitney, 1985.
 6. Fu, H. C., Erki, M.A., and Seckin, M., Review of Effects of Loading Rate on Reinforced Concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No. 12, 1991.
 7. Huges, B. P. and Gregory, R., Concrete Subjected to High Rates of Loading in Compression. Magazine of Concrete Research, Vol. 24, No. 78, 1973, pp.25 ~ 36.
 8. Kaplan, S. A., Factors Affecting the Relationship between Rate of Loading and Measured Compressive Strength of Concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 32, No.111, 1980, pp. 79 ~ 88.
 9. Mays, G. C. and Smith, P. D., Blast effect on Buildings: Design of Buildings to Optimize Resistance to Blast Loading, Thomas Telford, 1995.
 10. Tang, T., Malvern, L.E., and Jenkins, D.A., Rate Effects in Uniaxial Dynamic Compression of Concrete. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118, No. 1, 1992, pp. 108 ~ 124.
 11. TM 5-855-1/AFPAM 32-1147/NAVFAC P-1080/DAHS CWEMAN-97, Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects, Joint Departments of the Army, Air Force, Navy and the Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, December 1997.
 12. TM5-1300/AFM 88-22/NAVFAC P-397, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Joint Departments of the Army, Air Force and Navy Washington, DC., 1990.
 13. Wiehle, C. K., "Evaluation of Existing Structures", Stanford Research Institute, Menlo Park, California, December, 1974.
 14. Williams, M. S., Modeling of Local Impact Effects in Plain and Reinforced Concrete. ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 2, 1994, pp. 178 ~ 187.
 15. Winget, D. G., Marchand, K. A., and Williamson, E. B., "Analysis and Design of Critical Bridges Subjected to Blast Loads", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 8, 2005, pp. 1243 ~ 1255.
 16. 김호진, 남진원, 김성배, 이우철, 변근주, '폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강성능에 대한 해석적 분석', 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 241 ~ 250.
 17. 남진원, 김호진, 김성배, 변근주, '폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조의 HFPB 해석', 대한토목학회논문집, Vol. 27, No. 3, 2007, pp. 433 ~ 442.
 18. 이평수, 강영철, 구조물 방호 설계, 육군사관학교 화랑대연구소, 2003.
-
- 담당 편집위원 :
정해문(한국도로공사 도로교통연구원) haimoon@ex.co.kr

<http://www.kci.or.kr>

KOREA CONCRETE INSTITUTE