

폭발하중을 받는 방호구조물의 계획과 설계

Planning and Design of Protective Structures under Blast Loading



글 | 邊根周
(Byun, Keun Joo)

- 건설안전기술사
- 공학박사
- 연세대학교 토목환경공학과 명예교수

E-mail: byun@yonsei.ac.kr



글 | 南軫元
(Nam, Jin Won)

- 공학박사
- 미국 Southern University at Baton Rouge, Louisiana Assistant Professor



글 | 邊宰漢
(Byun, John)

- 공학박사
- University College London, Research Fellow



글 | 金鎬鎭
(Kim, Ho Jin)

- 공학박사
- (주)에이티맥스 기술연구소 차장

Design of blast resistant structures (protective structures) require the adequate design and construction practices as well as the knowledge of characteristics of the blast loads, behavior of structures and their components under these loads. This paper focuses on how to design and evaluate the structures for blast resistance, and provides principles and discussion on analysis and design capability in protective technology and recommendations.

1. 방호구조물의 계획 및 설계개념

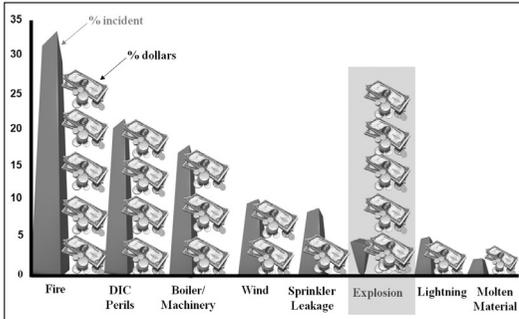
세계 도처의 모든 시설물은 지진, 해일, 태풍, 화산폭발 등의 천재(天災)와 산업 시설물의 운영 중 폭발, 기술적 결함에 기인한 대형붕괴 사고, 화재 및 가스폭발, 원전폭발 등과 같은 인재(人災), 그리고 국가 간의 침공이나 사업 경쟁자들의 파괴 행위, 테러, 범죄행위, 국지적 저항세력의 파괴 행위, 문화 파괴행위 등에 의한 폭발사고에 항상 노출되어 있다.

재해 유형별로 살펴보면 <그림 1>과 같이 폭발 사고(explosion)는 발생빈도에 비하여 그로인한 피해규모는 천문학적 수준이고, 파괴현상은 <그림

2>와 같이 재앙적 수준이다. 이러한 폭발은 대규모의 인명과 자산피해, 자원손실 뿐 아니라 경제 활동 위축 및 사회의 불안정 조성 등을 야기시키므로 최근 모든 국가에서 큰 관심의 대상으로 부각되었다.

일반적으로 사회기반시설, 산업시설, 민간시설은 매우 복잡한 취성 구조 시스템의 특성을 가지고 있어서 폭발에 대한 큰 취약점을 가지고 있는 경우가 많다. 현 단계에서 방호시설의 일차 목표는 폭발하중 하에서 인명의 생존확률과 자산의 잔존 확률을 개선하는데 있으며, 방호 기술의 도입이 결코 시설물의 안전성을 보장하는 절대적인 개념이 아니라는 점을 주목해야 한다. 과도한 방호

는 절약 가능한 자원을 낭비하게 되므로 방호에 사용되는 비용과 잠재 손실비용의 균형을 고려하는 수준의 대책을 수립하는 것이 필요하다.



〈그림 1〉 재해유형별 경제적 손실



〈그림 2〉 폭발사고로 인한 구조물 붕괴사례

방호기술은 1993년 테러에 의한 미국 무역센터의 지하주차장 대형 폭발사고로 많은 인명피해와 자산의 손실을 입은 이후에 미국과 영국을 중심으로 급속도로 발전해왔다. 이러한 과정에서 방호구조의 계획과 설계에 있어 구조부재 연결부의 연성과 회전 성능, 구조의 안정성과 건전성, 폭발사고 후 시설물의 복원 성능 등이 매우 중요하게 인식되면서 많은 신기술들이 개발되기 시작했다. 또한, 유체동역학 기반의 수치해석기법을 도입하여 폭발하중을 전보다 합리적으로 예측할 수 있는 기술들이 개발되고, 폭발하중에 의한 점진적인 진행성 붕괴(progressive collapse)의 구조거동 평가에 이르기까지 관련 기술이 발전하게 되었다.

한편, 방호시설의 계획에서는 구조물의 배치(layout)와 배열(arrangement)을 고려하여 폭발피해를 최소화 할 수 있는 계획을 수립하는 것이 필요하다. 즉 폭발하중이 빗겨나가게 하는 방안, 대상 시설물의 위장 및 분산배치, 방호벽이나 방호기둥 등을 이용한 접근성 차단, 폭발하중이 작

용한 경우에 대비한 에너지 흡수시설 등을 계획하는 것이 중요하다.

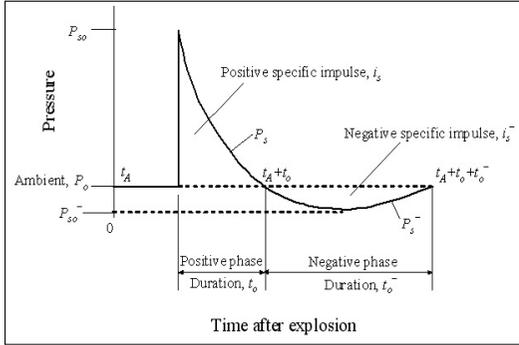
방호시설의 설계에서는 단순한 블록형의 원형 구조 형상 적용, 구조시스템 전체의 관성을 최대한 활용, 부재 연결부의 연성을 확보하여 전단 파괴 방지, 구조의 횡방향 안정성 확보, 붕괴유발부재의 제거, 구조 내부의 다양한 대피로, 대피시설 및 견고한 칸막이 설치, 철저한 구조상세 설계를 고려하는 것이 필요하다.

2. 폭발하중의 특성

폭발사고는 자연재해, 산업현장에서의 각종 사고, 그리고 전쟁, 테러, 등과 사회 저항세력들에 의한 파괴행위 등의 다양한 원인에 의하여 예상치 못한 순간 갑작스럽게 발생하게 된다. 폭발은 폭발에너지를 높은 압력이나 파동의 형태로 순간적으로 대기 중에 전달하는 특성을 가지고 있다. 따라서, 폭발지점으로부터 충격파와 압력과 형태로 시설물에 전달되는 폭발하중의 크기와 형상을 모형화 하는 것과 더불어, 폭발에 의해 발생하는 다양한 형태와 특성을 갖는 하중들이 구조물에 미치는 영향을 반영할 수 있는 방법을 고려하는 것도 매우 중요하다.

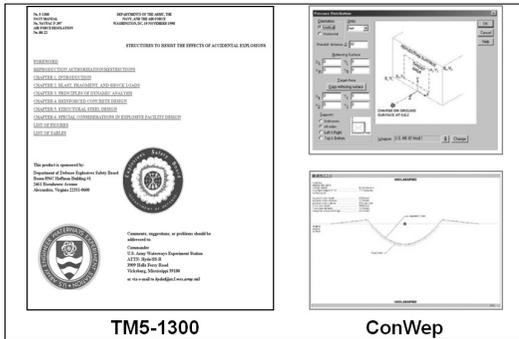
한편, 지진, 돌풍 및 기계진동 등에 의한 대표적인 동적하중은 작용시간이 수십 분의 일초 수준으로 알려져 있다. 반면, 충격하중은 일반적인 동적하중에 비하여 훨씬 짧은 1/1,000초 단위의 작용시간을 가지며, 그 중에서도 폭발하중은 일반적인 충격하중의 영역을 넘어 약 4,000~9,000 m/s의 매우 빠른 속도로 구조물에 작용하는 동시에 매우 높은 에너지를 방출하는 특성이 있다.

일반적으로 폭발에 의해 발생하는 다양한 형태의 하중들 중에서 압력파가 방호구조 설계시 주요한 하중으로 고려된다. 〈그림 3〉은 폭발에 의해 구조물에 작용하는 전형적인 압력하중의 형태를 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 폭발하중의 압력-시간 이력곡선

폭발하중의 크기를 산정하는 기법은 대부분 폭발실험 결과를 기반으로 하고 있다. 폭발실험은 미국을 비롯한 일부 국가에서만 국한되어 진행되어 왔기 때문에 폭발하중과 관련된 실험 자료들은 극히 제한적으로 일부 제공하고 있다.

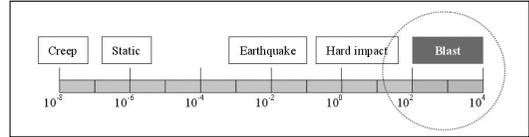


〈그림 4〉 폭발하중 산정 프로그램 예시

3. 폭발하중을 받는 구조의 거동 특성

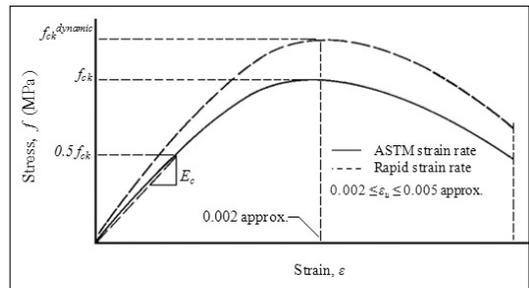
구조의 시간 의존성 거동은 〈그림 5〉와 같이 구조부재의 변형률속도(strain-rate)에 따라 크리프, 정적, 동적, 지진, 충격 및 폭발하중 거동 등으로 구분될 수 있다. 폭발하중에 의해 발생하는 구조부재의 변형률속도는 매우 순간적이고 빠르기 때문에 폭발하중을 받는 구조를 일반적인 동적거동이나 발파 해석기술로는 거동해석이 불가능하다.

한편, 폭발하중을 받는 구조의 설계에서는 구조적 동적특성과 함께 재료적 동적특성도 고려해야 한다. 일반적으로 폭발하중은 매우 빠른 속도



〈그림 5〉 동적하중별 변형률 속도 효과

로 구조의 변형을 야기시키며, 이로 인해 발생된 변형률속도는 〈그림 6〉과 같이 재료의 강도를 증가시켜 국부적인 파쇄와 동적 전단파괴에 대한 저항성을 향상시키는 것으로 알려져 있다.



〈그림 6〉 변형률속도에 따른 콘크리트의 응력-변형률 관계

또한, 일반적인 하중상태에서의 구조의 거동은 탄성한계 내에 존재하지만, 폭발하중을 받는 구조의 설계에서는 구조가 폭발에너지를 어느 정도 흡수할 수 있도록 비선형 소성변형을 허용한다. 그러므로 폭발하중을 받는 구조와 부재의 설계에서 구조의 여유도(redundancy)와 연성(ductility)은 탄성 후 거동 성능에 크게 기여하는 중요한 설계인자로 고려된다.

4. 방호구조물의 해석 및 설계

(1) 방호구조물의 계획절차

방호구조물의 설계, 해석 및 시공을 포함한 전반적인 계획절차는 다음과 같다.

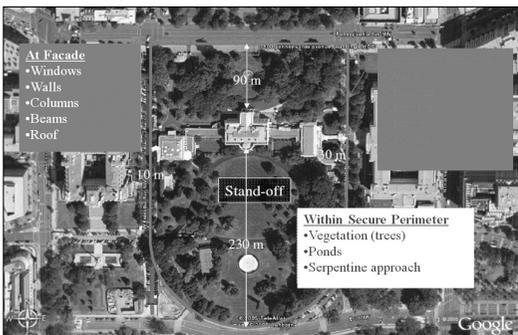
- ① 구조물의 요구성능 정의
- ② 해석-설계-시공에 대한 품질보증 기준 설정
- ③ 위험 및 위험성 평가 → 위험요소 도출
- ④ 설계 폭발하중 종류, 위치 및 크기 결정
- ⑤ 결정된 폭발하중에 대한 하중조건 산정

- ⑥ 부지결정, 시설물 배치 및 설계기준 구축
- ⑦ 등가정적하중을 받는 방호구조의 1차 설계
- ⑧ 정밀 폭발하중 계산
- ⑨ 파편, 폭발 산란물, 지반충격에 의한 하중계산
- ⑩ 하중조합 및 동적해석 수행
- ⑪ 방호기준 한계에 근거한 시설물 재설계
- ⑫ 필요한 경우 특수 하중조건 추가 검토
- ⑬ 설계결과 검증
- ⑭ 설계도서 작성
- ⑮ 공중 별 계약 및 시공 착수
- ⑯ 준공검사
- ⑰ 구조물 운용

이상의 방호구조물 계획단계에서 수행되는 설계 및 해석에는 단순기법을 적용하는 것이 일반적이지만, 설계결과와 검증에는 정밀해석기법을 사용하는 것이 바람직하다.

(2) 방호구조의 설계기법

방호구조의 설계 개념은 잠재적 폭발장소로부터 인명과 시설을 이격 및 격리시키는 공간배치 개념의 방호설계 방법과 대상시설 및 인명을 적극적으로 보호하기 위하여 폭발하중에 저항할 수 있는 구조로 설계하는 방법으로 크게 구분할 수 있을 것이다. 원자력 발전소와 같이 발전소 자체를 완전한 격리시설로 설계하거나 대사관 및 정부 주요청사 등을 <그림 7>과 같이 폭발위험요소로부터 이격시키고 직·간접적인 접근차단 시설을 배치하는 것



<그림 7> 공간배치 개념의 방호설계 예시

이 공간배치 개념의 방호설계가 적용된 대표적인 사례이다. 실제로 이러한 공간배치 개념의 방호설계만으로도 테러 및 폭발사고에 의한 피해를 상당 부분 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

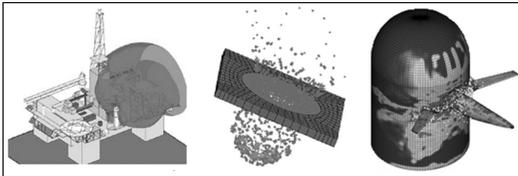
한편, 폭발하중은 구조물에 작용하는 지속시간이 매우 짧고, 하중의 크기가 매우 크기 때문에 구조물의 일반적인 동적거동과는 달리 감쇠(damping)효과가 크지 않은 특징이 있다. 이러한 이유로 구조물의 거동을 단순화시켜 준 정적(quasi-static)인 현상으로 간주하고 단순 설계하는 것이 일반적이다. 폭발하중을 받는 구조물의 설계기준 및 지침은 부재의 변형이나 변위를 제한하는 방식으로 제시되며, 허용되는 변형이나 변위는 구조물이나 구조부재의 종류, 손상정도 등을 고려하여 규정된다. 이러한 설계기준 및 지침을 이용하면 구조물의 방호성능을 즉각적으로 근사적 평가가 가능하다는 장점이 있지만, 폭발하중을 받는 구조물의 복잡한 거동을 정밀하게 평가하기 위한 용도로는 사용될 수 없다. 방호구조의 설계에 주로 사용되는 주요 설계기준 및 지침은 미국 국방성의 TM 5-1300(Tri-Service Manual), TM 5-855-1(Army Technical Manual), TMO 853(The Security Engineering Manual), 미국토목학회의 Structural Design for Physical Security, Guidelines for Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, 영국의 UK Building Regulations 등이 있다.

(3) 해석기법

폭발하중을 받는 구조의 해석기법으로는 단자유도 및 다자유도계 모델에 근거한 단순해석기법과 비선형 재료모델을 사용하는 정밀해석기법 등이 있다. 정밀해석기법은 해석결과는 정확하지만, 해석절차 및 소요시간의 측면에서 비효율적이기 때문에 설계시에는 일반적으로 간단하고 신속한 단순해석기법을 사용하며, 설계결과와 검증 및 정밀거동평가를 위해서 정밀해석기법이 널리

사용되고 있다.

폭발하중에 대한 구조의 거동을 정밀하게 해석하기 위해서는 명시적(explicit) 시간적분에 기초한 고차원적인 동적 해석기법을 적용해야 한다. 폭발하중에 의한 구조의 비선형 소성변형 등을 고려하기 위해서는 유체동역학 이론에 근거한 정밀 해석 프로그램(hydrocode)이 필요하며, 최근에는 진보된 다양한 해석이론이 개발되어 폭발하중을 받는 구조물의 응답해석에 사용되는 유체동역학 프로그램에 추가 반영되고 있다. 유체동역학 프로그램을 이용한 해석 예를 도시하면 <그림 8>과 같다.



<그림 8> 유체동역학 프로그램을 이용한 폭발 및 충격 해석 예시

5. 기존 구조물의 방폭 보강 기술

기존 구조에 적용할 수 있는 전형적인 방폭 보강은 중량증가, 강도증가, 경계조건 변경, 공간감소, 하중에 노출된 면적 축소 및 취약부재를 제거하는 방법 등이 있으며, 방폭 보강방법은 구조의 강도 증진 및 에너지 흡수능력 개선, 구조 변경과 보강비용의 최소화, 구조물의 성능 및 용도 유지 등을 고려하여 결정해야 한다. 이러한 고려사항 등으로 인하여 최근에는 과거의 전형적인 방폭 보강방법보다는 최신 건설재료를 이용하여 단면 강성을 보강하는 방식의 방폭 보강 기술이 활발히 개발되고 있다.

특히 섬유보강재(FRP)의 경우 다양한 기능적 장점과 시공의 편리함 때문에 방폭 보강 재료로의 사용이 빠르게 증가되고 있다. FRP를 이용한 방폭 보강 기술이 보다 적극적으로 활용되기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

- ① FRP 재료 및 공법의 선정 기준 수립
- ② FRP의 모델링 방법 정립
- ③ FRP와 구조물의 부착면 거동 규명
- ④ FRP 보강 설계지침의 개발
- ⑤ FRP의 에너지 흡수 능력 규명
- ⑥ FRP 보강 구조물의 파괴거동 평가기법구축

6. 방호구조물의 기술동향

현재 소개되어 있는 방호기술은 대부분 경험적인 기술에 기초하고 있다. 폭발하중을 받는 방호구조의 거동은 1/1,000초 단위의 매우 짧은 시간에 발생하는 거동이므로 현재까지도 이론해석적 방법을 적용하는 것이 용이하지 않고, 실험적인 방법 또한 매우 복잡할 뿐 아니라 기대만큼 정확한 결과를 얻기도 힘든 상황이다. 또한, 현재 널리 활용되고 있는 수치해석기법도 신뢰성 있게 하중을 시뮬레이션하지 못하고, 해석시 너무 많은 가정을 필요로 하는 문제가 있으며, 재료특성과 관련된 신뢰할 만한 자료 또한 부족한 실정이다.

한편, 현존하는 설계 및 해석 기술들이 주로 미국을 중심으로 한 소수 국가에서 군사용으로 개발되었기 때문에 기술의 대부분이 구체적으로 공개되지 않고 있어서 이용이 매우 제한적이다. 또한, 사용되고 있는 기술도 간략 단순화 되어 있어서 군사 목적으로는 수용이 가능할 수도 있지만, 군시설과 민간시설의 특성 차이로 민간시설에 적용하려면 엄밀한 기술적 검증이 요구되는 등 많은 문제점과 한계점이 존재하고 있다.

폭발과 비산 물체의 영향을 연계한 폭발하중의 모형화를 위하여 개발된 매개물질-구조 상호작용 (medium-structure interaction) 기술에도 불확실성의 문제들이 미해결 상태이다. 설계에 필요한 방호구조의 설계기준 및 지침, 신뢰성 있는 재료 모델, 단순 간략화된 설계기술, 종래의 P-I상관도 (pressure-impulse diagram) 기법의 재평

가, 안전률 평가기법의 구축, 검증용 축소모형 실험 기술의 개발, 신뢰성 있는 수치해석기법을 구축해야 하는 과제들이 미해결 상태로 남아 있다.

또한, 폭발 후의 후속적인 영향 즉 화재, 연기, 진행성 붕괴 등과의 연계기술, 기존 구조의 방호 성능 평가기법, 폭발 후의 복구기법 및 복구기준의 구축, 지속적으로 개발되고 있는 다양한 신무기 및 신종 테러기법의 출현에 따른 대응기술이 시급히 개발되어야 한다.

국내에서는 필자의 연구진과 군 연구기관에서 방호기술을 구축해 오고 있으며, 최근에는 국방부의 방호구조물 설계기준의 개정, 국토해양부의 건축물의 테러예방 가이드라인, 서울시의 초고층 건물 테러예방 및 안전관리계획 기준 등이 준비되면서 방호기술의 필요성과 중요성에 대한 인식이 확산되고 있다. 그러나 국내의 방호기술은 아직 매우 초보적인 수준에 머무르고 있으므로 향후 기술 도입과 연구개발에 많은 투자를 해야 할 것이다.

7. 맺음말

테러에 의한 미국 뉴욕 세계무역센터의 비행기 충돌 폭발사고, 지진 해일로 인한 일본 원자력 발전소의 폭발사고, 대구 지하철의 공사중 가스 폭발사고, 북한의 연평도 포격 도발사건 등과 같은 폭발사

고가 세계 도처에서 끊임없이 발생하고 있고 앞으로 계속 이어질 전망이다. 한편, 현대의 사회시스템, 사회기반시설, 산업시설, 공공 및 민간 건축물 등과 같은 시설물들은 매우 복잡한 취성 구조시스템으로 구성되어 있어서 항상 폭발 위험에 무방비 상태로 노출되어 있는 것은 주지의 사실이다.

본고는 새로 건설할 시설물의 방호구조 설계방법, 기존 시설물의 방호성능 평가기법, 폭발 후 손상을 입은 시설물의 보강공법, 방호구조기술의 미래 방향 등을 개괄적으로 소개한 것이다.

방호기술의 도입은 폭발로부터 시설물의 절대적 안전성을 보장하는데 있는 것이 아니고, 인명의 생존확률과 자산과 자원의 잔존확률을 개선하고, 폭발로 피해를 입은 시설물의 복구를 가능케 하는데 목표를 두고 있다.

현재 초보 단계에 있는 국내의 방호구조 기술을 연구 발전시키고, 이 방호구조기술을 교통 시스템, 수자원 시스템, 환경 시스템, 에너지 시스템 등의 사회기반시설, 산업 플랜트 시설, 군사 시설, 공공 건축물, 민간 건축물 등 모든 중요 시설물의 건설에 적용하여 폭발사고를 예방하고 인명과 시설물의 손상과 피해를 최소화하는데 방호구조 기술이 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. 변근주, 김호진, 남진원, "폭발하중과 방호구조물의 설계", **한국콘크리트학회지**, Vol. 23, No. 2, pp.16-22, 2011.
2. Nam, J. W., Kim, H. J., Kim, S. B., Kim J. H. J. and Byun, K. J., "Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads", **International Journal of Damage Mechanics**, Vol. 18, No.12, pp.461-490, 2009.
3. ASCE Task Committee, **Structural Design for Physical Security: State of the Practice Report**, Task Committee on Physical Security, American Society of Civil Engineers, New York, pp.4.1-4.48, 1999.
4. Buchan, P. A. and Chen, J. F., "Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonry Structures-A State-of-the-art Review", **Composites Part B: Engineering**, Vol. 38, Issues 5-6, pp.509-522, 2007.
5. Krauthammerr, T., **Modern Protective Structures**, CRC Press, pp.1-40, 2008.
6. ASCE Task Committee, **Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities**, ASCE, pp.2-1-5-22, 2010.