

방폭설계의 이해 및 일반하중에 대해 설계된 건축물의 방폭성능 평가

홍종국^{1*}

Understanding of Blast Resistant Design and Performance Evaluation of a Building designed for Conventional Loads

Jong-Kook Hong^{1*}

Abstract: Considering the increased threats from worldwide terrors and the increased demands on the blast resistant design of commercial buildings, this study is aimed at understanding the basic concept of blast resistant design and evaluating the blast performance with an actual design example. Although there are many differences between earthquake and blast loads, the design concept against both loads is similar in terms of allowing the plastic behavior of a structure and sharing the ductile detailing. Through the blast performance evaluation of a target building provided in this study, it is noted that a well-designed building for the conventional loads can have a certain level of blast resistance. However, this cannot be generalized since the blast load on a structure varies depending on the type of weapon, TNT equivalence, standoff distance, etc. Architectural planning with positioning the sacrificial structure or maintaining a sufficient standoff distance from the expected detonation is the simple and effective way of improving the blast resistance of a building.

Keywords: blast resistant design, ductility ratio, dynamic increase factor (DIF), level of protection, plastic behavior, standoff distance, support rotation angle

1. 서론

과거 방폭설계는 중요도가 매우 크거나 국방과 관련한 건물에 국한하여 특수 전문가(Super-Expert) 집단에 의해 수행되었다. 폭발에 의해 유발되는 압력하중은 비정형성이 매우 커서 하중 자체 뿐 아니라 폭발하중에 대한 구조물의 거동 파악이 매우 어렵기 때문이다. 또한 대부분의 경우, 국가안보와 직결되는 경우가 많았기 때문에 해석 기법이나 설계방법은 제한적으로 극소수에게만 공유되었다. 이러한 이유로 일반 구조기술자들에게 다가갈 수 없는 영역으로 여겨져 왔던 것이 사실이다.

하지만 테러의 세계적인 추세를 살펴보면, 국가기관이나 국방관련 특수시설보다 훨씬 더 많은 테러공격이 경제 중심지나 인구 밀집지역의 상업건물들에 집중되는 것을 알 수 있다 (US Department of State, 2003). 상대적으로 테러공격에서 자유롭다고 생각되었던 일반 상업건물들도 초극한 상황

에 노출될 수 있다는 인식이 사회 전반에 걸쳐 널리 퍼지게 되었고, 미국의 구조기술자들을 중심으로 일반건물에 대한 방폭설계(Blast resistant Design)의 필요성을 인식하기 시작하게 되었다.

최근들어 American Society of Civil Engineers (ASCE)에서는 “ASCE/SEI 59-11 *Blast Protection of Buildings* (2011)” (이하 ASCE Blast Standards)을 발간하였다. ASCE Blast Standards의 목적은 그동안 접근이 제한되었던 방폭설계에 관한 정보를 공유하고 설계기준을 제시하여, 구조동역학 (Structural Dynamics)에 대한 일반적인 지식이 있는 보통의 구조기술자(Ordinary Structural Engineer)라면 폭발이 충분히 원거리인 경우(Far Design Range)에 대하여 기본적인 수준의 방폭설계를 수행할 수 있도록 하기 위함이다.

물론 이 기준은 강제적인 것은 아니고 자발적인 형식을 취하고 있으며 최소한의 방폭설계에 대한 개념을 주고자 하는 것이다. 하지만 그 내용면에서 국방 목적으로 이미 체계화된 미국의 Unified Facilities Criteria (UFC)나 Department of Defence (DoD)의 기준을 그대로 반영하는 경우가 많기 때문에 실제로 일반건물의 방폭설계 기준으로 사용되는 경우가 자주 있다. 그 결과 현재는 많은 건물들이 최소한의 방폭설계를 이미 적용하고 있으며 앞으로 더욱더 다양하고 많은 프로젝트에 방폭설계가 적용될 것으로 예상되고 있다.

¹정회원, 주식회사 탑인프라 이사 (전 MHP Structural Engineers, California USA, Senior Project Engineer), 교신저자

*Corresponding author: jkhong2002@gmail.com

Topinfra Co., Ltd. #613 Opulence Bldg., 245 Seocho-daero, Seocho-gu, Seoul, 06647, Korea

• 본 문에 대한 토의를 2018년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

우리나라의 경우 연평도 포격사건 등 안보에 대한 위험이 도사리고 있고 국제 테러단체의 위협이 지속되고 있기 때문에 방폭설계에 대한 중요성은 상당히 크다. 본 연구의 목적은 미국을 중심으로 일반화된 방폭설계의 기본개념을 고찰하고 구조 기술자로서 최소한의 방폭설계를 위해 고려해야 할 점들을 파악하고자 한다. 또한 간단한 사례를 통해 일반하중에 대하여 설계된 실제 건축물의 방폭성능을 살펴보았다.

2. 방폭설계의 이해

2.1 내진설계와 방폭설계

구조설계 시 흔히 고려되는 극한하중의 하나인 지진하중과 비교하여 폭파에 의한 하중은 확연히 다른 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 지진하중(Earthquake Load)은 상대적으로 작은 여러개의 충격파로 이루어진 가속도(Acceleration) 하중이 지반을 통해 구조물 전체에 간접적으로 전달되며, 수 초에서 수 분간 비교적 긴 시간에 걸쳐 작용한다. 따라서 지진하중에 대한 설계는 비교적 긴 시간동안 구조물 전체의 거동과 응력 상태를 고려하여 붕괴에 이르지 않도록 하는 전체 시스템 단위의 설계(System-Based Design)의 형태를 취한다.

반면, 폭파하중(Blast Load)은 상당히 큰 하나의 충격파로 이루어진 압력(Pressure) 하중으로 수천분의 1초에서 기껏해야 수 초동안의 아주 짧은 시간에 걸쳐 구조물에 직접적으로 작용하며, 하중작용 후 곧바로 사라지는 특성을 보인다. 전체 구조시스템 상의 거동이 발생하기 전에 하중이 제거되며, 폭발원에서 거리가 멀어짐에 따라 폭발압은 급격히 감소하기 때문에 방폭설계는 하중이 직접적으로 작용하는 부분에 대한 국부적인 영향을 고려하는 부재 단위의 설계(Component-Based Design) 개념을 따른다. 이것이 구조물의 방폭설계가 내진설계와 구분되는 가장 기본이 되는 가정이며 차이점이다.

또 다른 중요한 차이점은 구조물의 질량이 구조체에 미치는 영향이다. 구조물에 작용하는 지진하중은 뉴턴의 제 2법칙에 따라 식 (1)과 같이 질량(m)과 가속도(a)의 곱으로 정의된다.

$$F = m \times a \quad (1)$$

이때 가속도가 일정하다고 가정하면 질량이 클수록 구조체에 가해지는 하중은 커지게 되어, 구조물에 불리하게 작용한다. 그러나 폭파하중은 매우 짧은 시간동안 발생하고 구조물이 반응하기 전에 사라지는 특성을 가지고 있으므로, 더 많은 질량이 구조물에 더해질수록 폭파하중에 대한 관성저항능력(Inertial Resistant Capacity)이 커져서 구조물에 더 유리한 측

면이 있다.

앞서 내진설계와 방폭설계는 하중면에서 그 차이점을 확인 하였으나, 간과해서는 안 되는 유사점 또한 존재한다. 내진설계와 방폭설계는 극한의 하중상태에서 구조물의 안정성을 경제적으로 구현한다는 목표를 추구하고 있기 때문에, 설계시 구조물이 탄성거동(Elastic Behavior) 상태를 넘어 소성거동(Plastic Behavior) 상태에 이르도록 가정한다. 구조물이 소성 거동을 하는 동안 붕괴(Collapse)되지 않고 하중을 지탱하기 위해서는 구조물이 충분한 연성(Ductility)을 확보할 수 있는 상체가 필요하다. 따라서 내진설계에 적용하는 내진상세(Seismic Detailing)는 구조물의 방폭성능을 향상시킨다.

또 하나의 유사점은 내진설계와 방폭설계가 성능기반 설계(Performance-Based Design)를 기반으로 하는 점이다. 발주자는 구조물의 사용성 및 경제성 등을 고려하여 설계하중이 발생한 후, 허용 가능한 구조물의 변형상태에 따른 성능수준(Performance Level)을 정하고, 설계자는 요구되는 성능수준을 만족할 수 있도록 구조물의 설계를 수행한다. 내진설계의 요구성능은 구조물의 허용 변형량에 따라 즉시거주(Immediate Occupancy), 인명안전(Life Safety), 붕괴방지(Collapse Prevention) 성능수준으로 나뉜다. 유사하게 방폭설계도 허용가능한 구조물의 변형량에 따라 보호수준(Level of Protection, LOP)을 I - 매우 낮음(Very Low), II - 낮음(Low), III - 중간(Medium), IV - 높음(High)으로 나뉜다.

2.2 폭파하중의 특성 및 산정

폭파하중은 폭약량과 목표물까지의 거리, 즉 쏫점거리(Standoff Distance)에 의해 결정된다. 실제 사용되는 폭약은 등가의 질량을 갖는 TNT로 치환하여 폭압(Air Pressure)이나 폭발 충격력(Blast Impulse)를 구하게 된다.

Fig. 1은 폭파하중의 특성을 나타내는 것으로 공간상의 한 위치에서 폭발에 의한 압력과 시간의 이력곡선을 보여주고 있다. 폭발이 발생하면 곧바로 정압(Positive Pressure)이 최대치로 급상승하여 일정시간에 걸쳐 소멸되며 정압이 사라짐과 동시에 부압(Negative Pressure)이 발생하게 된다. 폭발 충격력(Impulse)은 정압단계의 폭압을 나타내는 선과 시간축으로 형성되는 면적으로 계산된다.

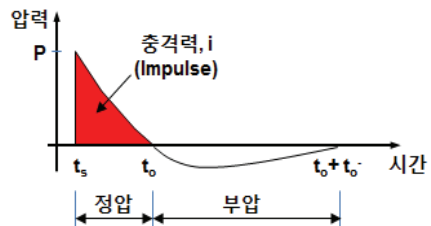


Fig. 1 Blast Pressure Characteristic

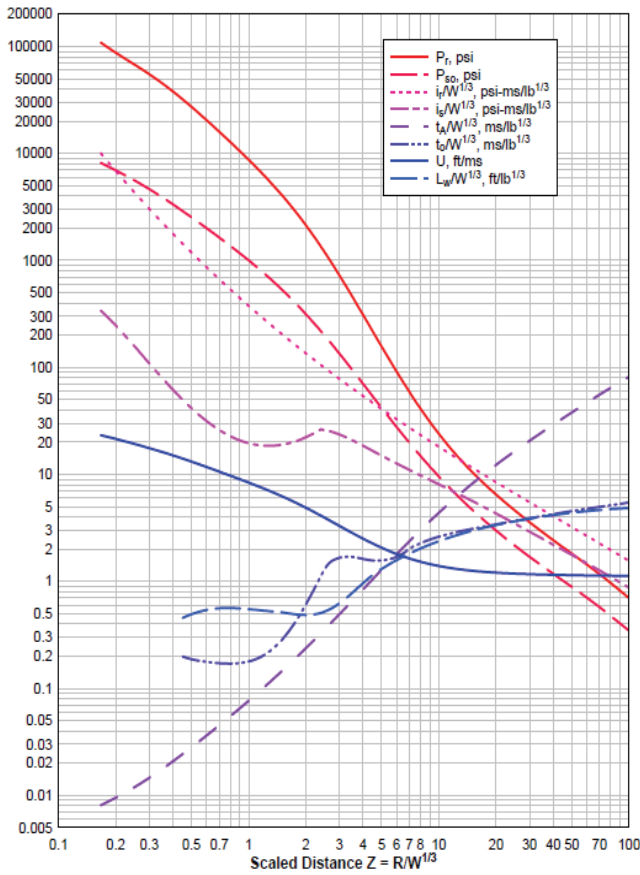


Fig. 2 Positive Phase Shock Wave Parameters for a Hemispherical TNT Explosion on the Surface at Sea Level (UFC 3-340-02)

건축물의 방폭설계는 일반적으로 정압만을 고려하고 부압은 무시한다. 그 이유는 첫째 부압이 상대적으로 정압에 비해 그 크기가 작고, 둘째 하중이 아주 짧은 시간동안만 작용하므로 정압이 이미 소멸된 후에 구조물은 반응하게 되는데, 이때 부압이 구조물의 반응을 억제하는 효과가 있으므로 보수적인 설계를 위해서 이다.

따라서 설계에서는 정압에 해당하는 폭압-시간의 이력곡선을 식 (2)와 같이 등가의 삼각형으로 가정한다.

$$t_{of} = 2i_r / P_r \quad (2)$$

여기서, t_{of} 는 하중 작용시간(Duration), i_r 은 반사 충격력(Reflected Impulse), P_r 은 최대 반사압력(Peak Reflected Pressure)을 나타낸다. 대기압 상태에서 폭파에 의해 발생되는 최대 입사압력(Peak Incident Pressure)은 어떤 물체의 표면과 부딪치면 반사되면서 충격량이 증가한다. 이러한 이유로 설계에서는 최대 반사압력, P_r ,을 이용한다.

폭파하중은 일단 등가의 TNT(Equivalent TNT)량과 목표물까지의 거리, 즉 쏫점거리(Standoff Distance)가 결정되면

폭발물의 위치(공중 또는 지표면)에 따라 구형파 또는 반구형파의 폭발형태로 가정되며, 그 다음 폭압이 계산된다. 폭파하중은 ConWep (US Army Corps of Engineer, 1992)이나 LS-Dyna (Livermore Software Technology Corporation, 2018) 등의 소프트웨어를 이용하여 구할 수 있으나 일반인의 접근이 제한되거나 고가의 사용료가 요구된다.

일반 건축물에 대해 최소한의 방폭설계를 위해서는 일반에 공개된 ASCE Blast Standards (2011) 또는 Fig. 2와 같이 UFC 3-340-02 (Department of Defense, 2008)의 그래프를 활용해 개략적인 값을 얻을 수 있다. 그래프는 최대 반사압력, 반사 충격력, 정압의 작용시간 등이 환산거리(Scaled Distance, Z)를 이용해 로그 스케일로 도식화 되어 있다. 환산거리, Z, 는 수많은 실험데이터를 기반으로 도출해낸 경험식으로 다음의 식 (3)과 같이 정의된다.

$$Z = R / W^{1/3} \quad (3)$$

여기서, Z는 환산거리(ft/lb^{1/3}), R은 목표물과의 직선거리(ft), W는 등가질량(lbs)의 TNT를 나타낸다. 환산거리(Z)가 계산되면, 설계에 사용되는 하중값(P_r, i_r)은 해당되는 그래프의 수직눈금을 읽음으로써 찾을 수 있다.

2.3 구조물의 해석 및 설계

2.3.1 설계강도 (Design Strength)

일반적인 정적하중을 기준으로 설계를 하는 경우, 구조물의 설계강도는 공칭강도(Nominal Strength)에 강도저감계수(Strength Reduction Factor, ϕ)를 사용하고 추가적으로 하중계수(Load Factor)를 적용하여 안전성을 확보하게 된다. 그러나 하중이 급속히 구조물에 작용하는 경우에는 변형율 속도효과(Strain Rate Effect)에 의해서 구조물은 공칭강도보다 훨씬 더 큰 하중에서 파괴에 이르게 된다.

Table 1은 ASCE Blast Standards (2011)에서 제안된 동적증가계수(DIF)로 구조물의 재료와 재하되는 하중의 유형에 따라 분류되고 있다. 설계에서는 동적증가계수(DIF)와 사용되는 재료의 항복강도, 극한강도, 또는 공칭강도 등과 곱하여 실제 재료의 강도를 산정한다. ASCE/SEI 41-17 *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (2017)등을 적용하여 성능기반 내진설계를 수행할 경우, 재료의 실제 강도를 반영하기 위하여 쓰이는 계수를 동적증가계수(DIF)를 대신하여 방폭설계에 적용하는 것도 일반적으로 허용된다.

또한 부재의 강도를 산정함에 있어서 모든 파괴모드에 대하여 강도감소계수(ϕ)를 적용하지 않는다. 따라서 ϕ 1.0이 적용된다.

Table 1 Dynamic Increase Factor (DIF) (ASCE Blast Standards)

Material and Property	Failure Mode	DIF
Concrete Compressive Strength	Flexure	1.19
	Compression	1.12
	Direct Shear	1.10
Masonry Compressive Strength	Flexure	1.19
	Compression	1.12
	Direct Shear	1.10
Deformed Rebar Yield Strength	Flexure	1.17
	Compression	1.10
	Direct Shear	1.10
	Bond	1.17
Welded Wire Rebar Yield Strength	Flexure	1.10
Hot-Rolled Steel Yield Strength	Flexure/Shear	1.19
	Tension/Comp.	1.12
Hot-Rolled Steel Ultimate Strength	All	1.05
Cold-Formed Steel Yield Strength	Flexure/Shear	1.10
	Tension/Comp.	1.10

* for items not listed, DIF = 1.0

** for ASTM A36/A36M steel, DIF = 1.29 for yield in flexure or shear, DIF = 1.19 for yield in tension or compression, DIF = 1.0 for ultimate strength

2.3.2 동적해석 (Dynamic Analysis)

앞서 언급되었듯이 방폭설계는 부재관점의 설계(Component-Based Design)가 고려되므로, 해당 부재를 등가의 단자유도(Single Degree of Freedom, SDOF)를 갖는 시스템으로 단순화 하여 동적해석(Dynamic Analysis), 즉 시간이력해석(Time History Analysis)를 하게 된다. 이때 등가 단자유도 시스템의 경계조건을 고려하여 등가의 질량(Equivalent Mass)과 등가의 강성(Equivalent Stiffness)을 적용한다.

등가질량(m_e)은 등분포하중이 작용하는 부재의 질량을 식 (4)와 같이 변위형상(Deflected Shape)에 따라 유도된 계수(C_m , Coefficient)를 이용하여 집중질량(Lumped Mass)으로 변환한다.

$$m_e = C_m m \quad (4)$$

ASCE Blast Standards (2011)에 따르면, 부재의 양단이 고정되거나 단순지지인 경우, 일단고정-일단힌지의 경우는 $C_m = 0.78$ 이며, 캔틸레버인 경우는 $C_m = 0.65$ 가 된다. 부재의 질량(m)은 폭압에 대하여 관성저항(Inertial Resistance)에 영향을 미치는 모든 질량을 포함하여야 한다. 따라서 조적벽 등 비구조체의 질량과 일체로 구성된 RC보-슬래브에서 RC 보 양측의 슬래브 무게의 20%를 포함하는 것이 일반적이다.

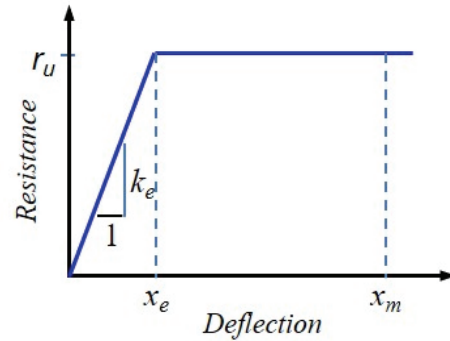


Fig. 3 Resistance vs Deflection of a System

Table 2 Coefficient for Equivalent Stiffness of a Element with Uniformly Distributed Load (ASCE Blast Standards)

Boundary Condition	C_k
Fix-Fix	384 (307*)
Fix-Pin	185 (160*)
Cantilever	8
Pin-Pin	76.8

* valid only if the positive and negative moment capacities of a member are the same

Fig. 3은 구조물의 설계에 사용되는 이상화된 구조물의 변위와 저항성능 관계를 나타내고 있다. 구조물은 하중이 가해지면 일정수준의 강성을 가지고 탄성거동(Elastic Behavior)을 하다가, 항복강도(Yield Strength)에 이르게 되면 이후 소성거동(Plastic Behavior)을 하게 된다. 등분포하중이 작용하는 구조물의 등가강성은 일반적인 구조역학의 하중-변위 관계에 의하여, 경계조건에 따라 식 (5)와 같이 결정되며 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

$$k_e = C_k EI / L^4 \quad (5)$$

2.3.3 성능평가 (Performance Evaluation)

구조물의 성능을 평가하는 지표로 지점부에서의 회전각(Support Rotation Angle, θ)과 연성비(Ductility Ratio, μ)가 있다. 지점에서의 회전각(θ)은 소성힌지(Plastic Hinge)가 발생한 후, 비탄성 변형에 대한 크기를 반영하는 것으로 취성이 큰 재료인 콘크리트나 조적조의 방폭성능에서 매우 중요한 요소이다. 반면, 연성비(μ)는 항복변형이 발생한 후 비탄성 변형에 대한 에너지 흡수능력을 반영한 것으로 철골조의 방폭성능에 매우 중요한 요소이다.

허용가능한 수준의 피해정도를 고려하여 보호수준(Level of Protection)에 대한 목표를 정하면, 구조물 지점부에서의 회

전각(θ)과 연성비(μ)에 대한 최대 허용범위가 결정된다. 최대 허용범위는 구조물에 사용되는 재료(콘크리트 또는 철골 등), 구조형식(보, 기둥, 벽체 등), 작용하중(휨, 압축 등) 등을 고려하여 정해지는데 실험데이터를 바탕으로 UFC 3-340-02 (2008), ASCE Blast Standards (2011) 등에서 기준을 제시하고 있다. 참고로, ASCE Blast Standards (2011)에 따르면 조밀단면(Compact Section)을 갖는 철골보가 주요 구조부재(Primary Structural Element)로 사용되는 경우에 있어서 낮은 보호수준(Low Level of Protection)을 고려할 때 지점부의 최대 회전각(θ_{max})은 3° 이고 부재의 최대 연성비(μ_{max})는 3이다. 단, 취성 파괴를 방지하기 위하여 어떠한 경우에도 지점에서 부재의 전단저항성능은 작용하는 최대 전단력보다 커야 한다.

3. 대상건축물의 방폭성능 평가

3.1 대상건축물

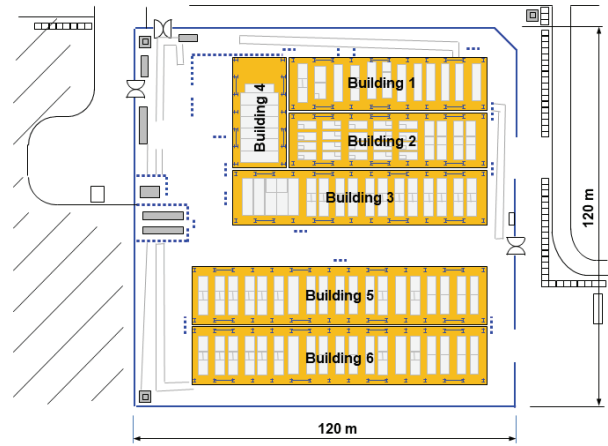
Fig. 4는 중동의 한 지역에 건설된 방폭설계 대상 건축물이다. 로켓공격으로 폭발을 유발하고 최소한의 초점거리(Standoff Distance)를 확보하는 역할을 하는 희생구조물(Sacrificial Structure)과 폭발로 발생하는 폭발하중을 견딜 수 있도록 설계되는 보호빌딩(Protecting Building), 보호빌딩에 의해 안전이 확보되며 인간이 거주하고 활동하는 보호되는 빌딩(Protected Building)으로 구성되어 있다. 본 연구의 대상 건물은 보호빌딩이다.

대상건물은 *International Building Code 2009* (ICC, 2009) 과 *AISC 13th Edition* (AISC, 2005)를 근간으로 구조설계가 실시되었다. 보호빌딩에 적용된 하중은 구조물의 자중과 지붕설계에 적용하는 활하중인 1.0kN/m^2 이다. 풍하중으로 기본 풍속 140km/h (3초 거스트)과 노출도(Exposure Category)는 C가 적용되었다. 내진설계는 $S_s = 1.24g$, $S_1 = 0.56g$ 와 보통 모멘트골조 ($R = 3$)을 적용하였다. 일반하중(Conventional Loads)을 바탕으로 설계된 부재의 치수는 Table 3과 같다.

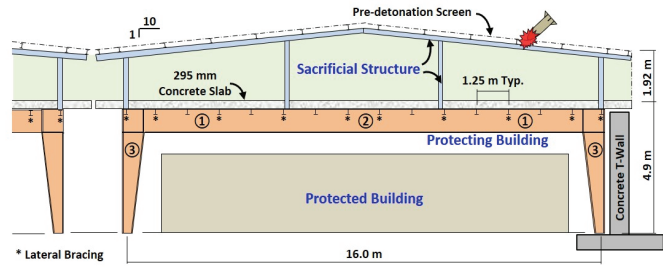
3.2 방폭설계

3.2.1 폭발하중(Blast Load)

해당지역에서 사용빈도가 높은 무기류를 바탕으로 설계에 반영되어야 할 등가의 TNT량은 10kg 이며, 구조물의 중요도와 인명안전을 고려하여 중간 보호수준(Medium LOP)의 성능을 확보하는 것으로 한다. 단, 본 연구에서는 파편에 의한 충격(Fragmentation Impact)은 고려하지 않는다.



(a) Campus Plan



(b) Frame Elevation at Each Building

Fig. 4 Target Building

Table 3 Structural Sections designed for Conventional Loads

Component	Outer Flange (mm)	Web (mm)	Inner Flange (mm)	
Main Frame* (6m Space)	①	350 × 15	1050 × 12	350 × 15
	②	350 × 12	1050 × 8	350 × 15
	③	350 × 15	450/1050 × 10	350 × 15
Floor Beam*	H-350 × 150 × 6.5 × 9 @ 1.25m Space Typ.			
Concrete Slab**	295mm Concrete over 25mm Metal Deck Rebar: D13@225mm			

* $F_y = 350\text{ MPa}$

** $f_{ck} = 30\text{ MPa}$

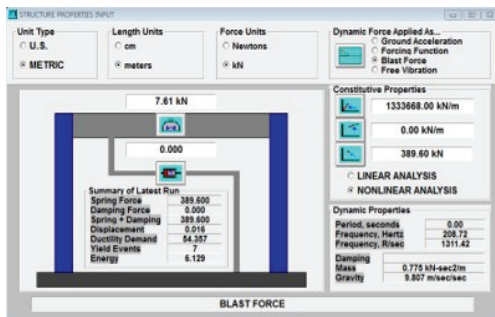
3.2.2 콘크리트 슬래브(Concrete Slab)

일방향 메탈데크 위에 형성되는 콘크리트 슬래브는 바닥보 간격이 1.25m임을 고려하여 그 설계 대상면적을 $1.25\text{m} \times 1.25\text{m}$ 로 단순화하고 보수적인 설계를 위하여 양단 단순지지로 가정함이 합리적이다. 폭발하중 파라미터는 Fig.2와 같이 그래프를 이용하여 구하거나 ConWep (US Army Corps of Engineer, 1992) 등의 소프트웨어를 통해 구하여 해당 면적에 대한 평균값을 적용하여 설계에 반영한다.

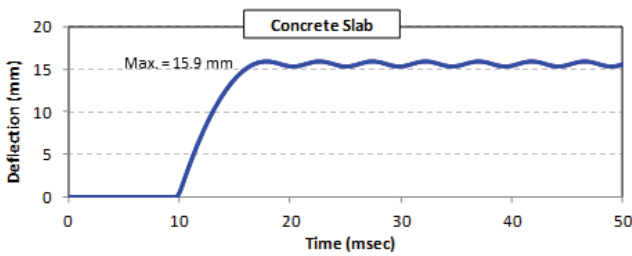
10kg의 등가 TNT량과 목표물과의 직선거리(Standoff Distance) 1.92m를 적용하면, 1.25m × 1.25m 면적에 작용하는 최대 반사압력(P_r)의 평균은 6,129kPa이고 최대 반사충격력(i_r)의 평균은 1,296kPa-msec이다. 식 (2)에 따라 하중 작용시간(t_{of})은 0.422msec이 된다.

Fig.5와 같이 슬래브의 거동과 성능을 평가하기 위해서는 등가의 강성과 등가 질량을 적용한 단자유도(SDOF) 시스템의 비선형 시간이력해석(Inelastic Time History Analysis)을 수행해야 한다. 방폭설계에서 감쇠(Damping)의 효과는 일반적으로 고려하지 않는데, 폭발하중이 작용하면 곧바로 설계에서 중요한 최대 변형이 발생하기 때문이다. 해석결과 슬래브 중앙에서 최대 처짐은 15.9mm 임을 알 수 있다.

보조 구조부재(Secondary Structural Element)로서 콘크리트 슬래브의 성능평가는 ASCE Blast Standards (2011)에 따라, 중간 보호수준(Medium LOP)에 대하여 지점부 최대 회전각(θ_{max})은 2°이고 부재의 최대 연성비(μ_{max})는 고려되지 않는다. 따라서 단부에서 회전각은 $\tan^{-1}[15.9/(1,250/2)] = 1.46^\circ$ 로 중간 보호수준을 만족함을 알 수 있다.



(a) SDOF Analysis (Nonlin)

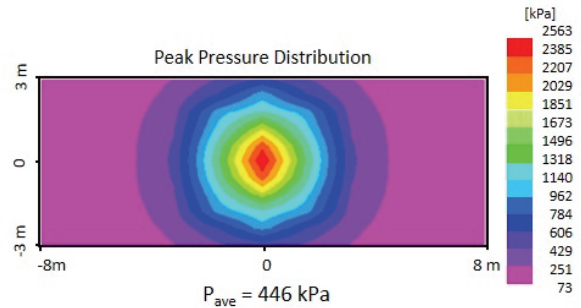


(b) Deflection at Slab Center

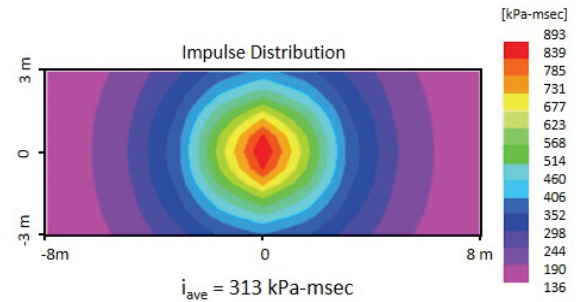
Fig. 5 Concrete Slab Performance

3.2.3 주요 골조(Main Frame)

주요 골조(Main Frame)는 보통 모멘트 골조 시스템으로 설계된 단경간 메탈빌딩(Single Span Metal Building)으로 기둥 사이의 간격은 16m이며, 주요 골조는 매 6m 간격으로 배치되어 있다. 보수적인 방폭설계를 위하여 해당되는 폭발하중이 주요 골조의 정중앙에 작용하는 것으로 가정한다. Fig. 2의 그



(a) Peak Pressure Distribution



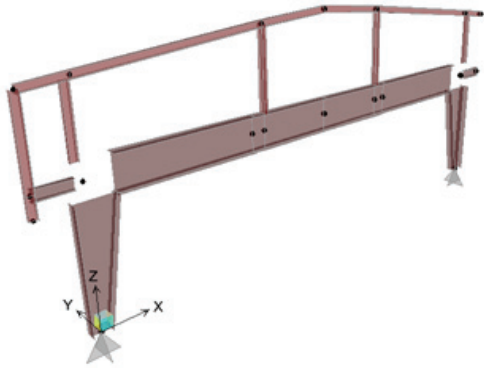
(b) Impulse Distribution

Fig. 6 Blast Load for Main Frame

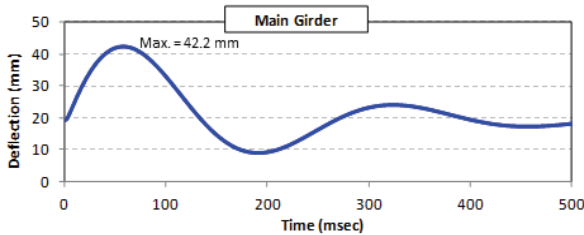
래프 또는 유한요소해석을 통해 골조의 영향면적(Tributary Area)인 16m × 6m 면적에 작용하는 최대 반사압력(P_r)의 평균은 446kPa이고 최대 반사충격력(i_r)의 평균은 313kPa-msec으로 밝혀졌다 (Fig. 6 참조). 이때 등가 삼각형 가정에 의하여 하중 작용시간은 1.403msec이다.

방폭설계는 부재단위의 설계를 기본으로 하기 때문에 거더와 기둥을 각각 분리하여 고려할 수 있다. 본 연구에서는 Fig.7과 같이 골조시스템의 거동을 동시에 고려하고자 구조해석 범용 소프트웨어인 SAP2000 (Computer and Structures, 2011)을 이용하여 평가하였다. 일반하중(Conventional Load)에서 활화중(Live Load)은 주요골조의 상부에 접근할 수 없는 건축적 특성을 반영하여 고려하지 않고 사하중(Dead Load)만을 골조에 작용한 후, 폭발하중(Blast Load)인 최대 반사압력의 평균치를 골조에 하중 작용시간동안 작용하였다. 부재의 비선형성을 반영하기 위하여 AISC 13th Edition (AISC, 2005)에 따른 각 부재의 강도를 산정하였고, 거더(Girder)의 양단부와 중앙부, 기둥의 상부에 소성힌지(Plastic Hinge)가 발행할 수 있도록 하였다. 방폭성능을 평가할 경우, 감쇠(Damping)는 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 못하지만 일반적인 철골 구조물임을 고려하여 2%를 가정하였다.

일반하중을 작용한 후, 거더 중앙에서의 초기 처짐은 20mm였으며, 이후 폭발하중에 의한 시간이력해석 결과 거더 중앙부에서 최대 처짐이 42.2mm로 관찰되었다. 이때 폭발하



(a) Structural Model (SAP2000)



(b) Deflection at Center of Girder

Fig. 7 Performance of Main Frame

중에 의한 최대 처짐은 22.2mm로 거더 양 단부에서의 회전각은 $\tan^{-1}[42.2/(16,000/2)] = 0.30^\circ$ 로 허용 회전각인 3° 이내로 중간 보호수준을 만족하고 할 수 있다.

폭파하중이 제거된 후, 거더 중앙에서의 처짐은 점차 안정화되고 감쇠효과(Damping Effect)로 초기 처짐인 20mm로 수렴하고 있다. 이는 부재에 소성현상이 발생하지 않았음을 의미하며, 설계 폭파하중에 대하여 구조물은 탄성변형을 하는 것을 알 수 있다. 거더 양단부 및 중앙부, 기둥상부에 작용하는 최대 모멘트 하중은 각각 1,060kN-m, 1,243kN-m, 1,268kN-m이다. 해당 위치에서 부재의 강도를 고려한 연성비(μ)는 각각 0.274, 0.474, 0.362로 ASCE Blast Standards (2011)에서 제시한 비조밀단면 (Non-Compact Section)이 주요부재(Primary Element)로 사용되는 경우에 있어서 최대 허용 연성비인 0.7 이하로, 중간 보호수준을 만족한다.

4. 결론

본 연구에서는 구조동역학에 어느 정도 지식이 있는 보통의 구조엔지니어가 방폭설계를 수행할 수 있도록 그 기본개념에 대하여 살펴보았다. 또한, 간단한 사례를 통하여 방폭설계가 어떻게 적용되는지 알아보았고 일반하중으로 설계된 구조물에 대한 방폭성능을 확인하였다.

1. 비교적 긴 시간동안 구조물에 가속도 하중으로 작용하는 지진하중을 적용하는 내진설계와는 달리, 방폭설계에서 폭파하중은 매우 짧은 시간동안 구조물에 압력하중으로 작용한다. 내진설계에서 구조물의 질량이 클수록 가속도 하중에 의해 구조물에 전달되는 하중은 크게 되어, 구조물에 성능에 불리하게 작용한다. 방폭설계에서는 하중의 작용시간이 매우 짧아 구조물이 반응하기 전에 폭파하중은 사라지게 되므로, 구조물의 질량이 클수록 관성저항 능력이 크게 되어 구조물의 저항성능에 유리하게 작용한다. 따라서 내진설계와 방폭설계의 요구사항을 동시에 충족할 수 있도록 구조물의 질량(무게)을 최적화하는 노력이 필요하다.

2. 방폭설계와 내진설계는 성능기반 설계를 기반으로 하고 있다는 유사점이 있다. 구조물에 허용할 수 있는 피해수준을 고려하여 요구 성능수준을 결정하게 되면, 구조물의 변형을 요구 성능수준에 해당되는 허용 변형량 이내로 제한되도록 설계하는 방식이다. 또한 두 설계방법은 구조물의 비선형 거동을 이용하여 경제적인 설계를 추구하는 목표를 가지고 있으므로, 부재가 충분한 연성을 발휘하도록 상세를 하는 것이 중요하며, 내진상세의 적용은 구조물의 방폭성능에도 매우 효과적이다.

3. 폭파하중은 유한요소해석 등을 통하여 정확히 구할 수 있으나, 일반구조물의 설계에서는 UFC나 ASCE 기준을 적용하면 상황에 따른 준비된 그래프를 이용할 수 있고 비교적 정확한 값을 구할 수 있다. 구조물의 비선형 시간이력 해석은 구조부재의 등가 단자유도 시스템이나 구조물 전체시스템을 고려하여 수행할 수 있는데, 일반적으로 구조해석에 사용하는 범용 구조해석 소프트웨어를 활용할 수 있기 때문에 기본적인 수준의 방폭설계는 보통의 구조엔지니어가 어렵지 않게 수행할 수 있음을 알 수 있다.

4. 일반하중에 대하여 잘 설계된 구조물은 기본적인 수준의 방폭성능을 확보할 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 다만, 폭파하중은 구조물에 위협을 주는 대상무기의 종류와 등가의 TNT량, 충돌거리 등에 따라 작용되는 하중의 크기가 현격히 차이가 나기 때문에 일반화하기는 어렵다. 따라서 주요 구조부재가 폭발이 발생할 가능성이 높은 곳으로부터 충분한 충돌거리를 갖도록 건축적인 계획을 하거나 인위적으로 희생구조물을 배치하는 등의 방법은 건축물의 방폭성능을 향상시킬 수 있다.

감사의 글

방폭설계가 적용된 구조물의 제공과 기술적 검토를 수행해 주신 MHP Structural Engineers사의 Mr. Garry Myers와 Mr. David Houghton, SidePlate Systems사의 Mr. Jesse Karns에게 감사의 뜻을 전합니다.

References

- American Institute of Steel Construction (2005), AISC 13th Edition, AISC, Chicago
- American Society of Civil Engineers (2011), ASCE/SEI 59-11 Blast Protection of Buildings, ASCE, Virginia
- American Society of Civil Engineers (2017), ASCE/SEI 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE, Virginia
- Computer and Structures (2014), SAP2000 V16.1.0, Computer and Structures, Walnut Creek, CA
- International Code Council (2009), International Building Code 2009, ICC
- Livermore Software Technology Corporation (2018), LS-Dyna, Computer Software
- U.S. Department of State (2003), Patterns of Global Terrorism 2002, Department of State Publication 11038, 164-166
- US Army Corps of Engineer (1992), Conventional Weapons Effects (ConWeb), US Army Corps of Engineer, Dallas, TX
- US Department of Defense (2008), UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, US Department of Defense, 89-91

Received : 03/26/2018

Revised : 06/26/2018

Accepted : 06/30/2018

요 지 : 전 세계적으로 테러의 위협이 가중되고 일반 상업건축에 대한 방폭설계의 요구가 증가하고 있는 현실을 직시하여, 본 연구에서는 기본적인 방폭설계의 개념을 정립하고 실제 설계사례를 통하여 방폭성능을 평가하는데 목표를 두고 있다. 비록 지진하중과 폭파하중에는 많은 차이점이 있지만, 그 설계법은 구조물의 소성거동을 허용하고 연성을 갖도록 설계한다는 점에서 유사하다. 본 연구에서 제시된 대상 건물에 대한 방폭성능 평가를 통하여, 일반하중에 대하여 잘 설계된 건물은 어느 정도 수준의 방폭성능을 확보하는 것으로 나타났다. 그러나 구조물에 작용하는 폭파하중은 무기의 종류, 등가의 TNT량, 폭발점에서 목표물까지의 최단거리인 쏠점거리 등에 따라 달라지기 때문에 일반화하기에는 무리가 있다. 희생구조물을 배치하거나 예상되는 폭발점에서 주요 구조부재까지의 쏠점거리를 일정수준 이상으로 유지하는 건축 계획적인 노력은 건물의 방폭성능을 향상시킬 수 있는 쉽고 효과적인 방법이다.

핵심용어 : 방폭설계, 연성비, 동적증가계수, 보호수준, 소성거동, 쏠점거리, 지점회전각
