

방폭구조물설계 (Building Design for Blast Resistance)



정석재
(주)쓰리디구조 소장

1. 머리말

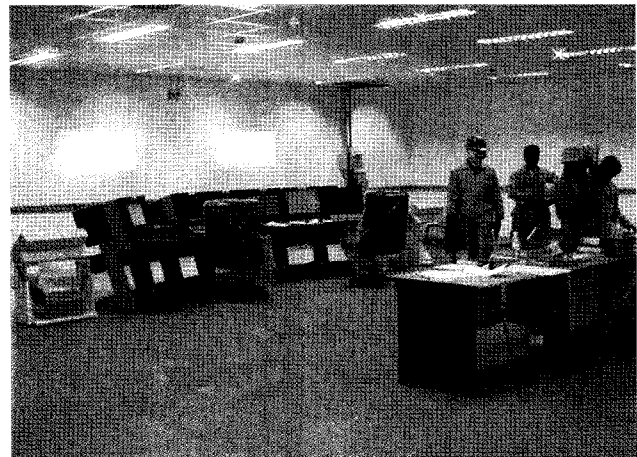
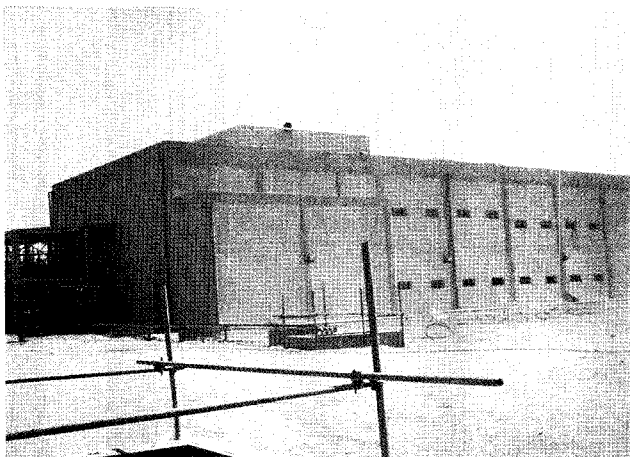
방폭구조물(Blast Resistant Building)이란 인화성 또는 가연성 물질(가스, 증기, 분진)의 화재 및 폭발, 특정거리에서 투하 또는 폭발하는 폭탄이나 폭발물의 폭발로 발생하는 폭발하중(Blast Load)에 의한 피해 및 붕괴, 인명피해 등을 최소화하도록 설계되는 구조물을 말한다. 구조물의 용도 및 목적, 작용하는 폭발하중의 특성 및 크기 등에 따라 상당히 다양한 방폭구조물이 존재하지만, 주로 많이 접하게 되는 구조물은 크게 3가지 정도로 구분된다.

첫째, 탄화수소(hydrocarbons) 등 여러 가지 위험물을 취급하는 석유화학 프로세스 플랜트 공장의 구조물이다. 주로 화공프로세스 상 중추적인 기능을 수행하여야 하는 건물, 예를 들면 주 제어동(Main

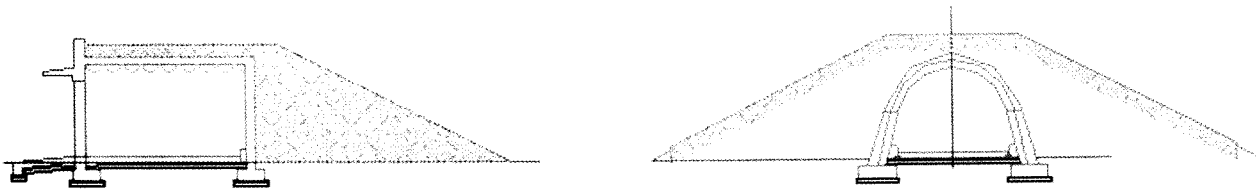
Control Building) 등의 건물이 이에 해당된다. 이와 같은 건물은 폭발원(Blast Source)으로부터 적절한 거리를 유지하도록 계획되어야 하며, 폭발에 의한 폭발하중에 견디도록 설계되어야 한다.

둘째, 포탄(砲彈)이나 폭탄(爆彈) 등 적의 공격으로부터 보호받아야 하는 구조물로, 주로 군사적 목적의 방호구조물(Protective Structure)이나, 군시설물이 아니더라도 유사시에도 주요한 기능을 수행해야 하는 건물(예를 들면, 공공청사나 대사관, 관제탑 등)이 이에 해당된다. 포탄이나 폭탄에 의한 폭발하중 뿐만 아니라, 구조물을 강타했을 때의 충격(Impact), 관입(penetration), 파편(fragment)의 효과 등을 추가로 고려하여야 한다.

셋째, 각종 방폭실험실, 폭발물감압시설 등과 같이 주로 밀폐된 공간에서 인위적인 폭발시험을 수행하는 구조물로서 폭발의 개념은 상



[그림 1-1] 주 제어동(Main Control Building) 외부 및 내부 전경



[그림 1-2] 방호구조물

기 두 가지 분류의 구조물과 유사하지만 협소한 공간에서 폭발이 발생하므로 압력이 상대적으로 크고, 각종 관측창 및 방폭문, 방폭조명 시설, 폭발 후 고압가스를 적절히 배출시킬 수 있는 배기시설 등을 고려하여 계획하여야 한다.

2. 방폭설계기준

국내에는 방폭구조물에 대한 별도의 설계기준은 없으나, 『산업안전 기준법 제27조』에 화학공장의 위험요인 및 제어동의 위치 등에 대해 규정하고 있으며, 군시설물 관련해서 국방부 제정 『국방부 제정 방호구조물 설계기준』에 비핵무기(재래무기)의 폭풍효과와 설계하중 산정 및 방호구조물의 구조해석, 동적응답 산정 방법에 대해 비교적 자세히 규정되어 있다. (이 기준은 미국방부의 『Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons(TM-5-855-1)』의 내용을 참조하여 작성되었음)

국외의 방폭구조물 설계기준 및 시공지침으로는 미국방부 (Department of the Army, Navy, and Air Force)의 『Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (TM 5-1300)』가 가장 널리 알려져 있다. TM 5-1300에는 방폭설계에 대한 개요, 폭발하중(blast load), 파편(fragment), 충격하중(shock load)의 산정방법, 동적해석의 원리, 철근콘크리트 및 철골구조, 각종설비의 방폭설계기준 및 절차, 시공지침 등이 매우 상세히 기술되어 있어 여러 가지 구조물의, 다양한 방폭조건에 대해 설계가 가능하다.

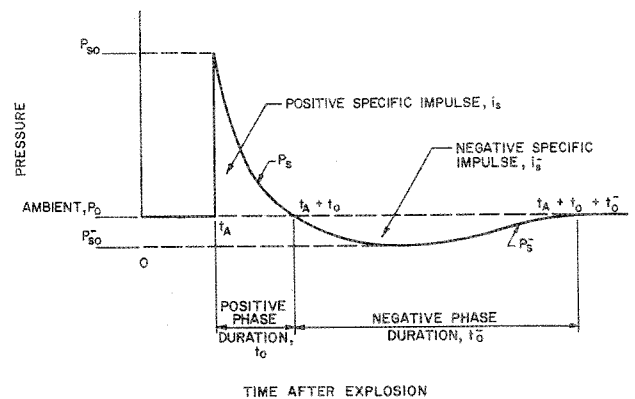
석유화학 프로세스 플랜트 공장 방폭구조물의 설계기준은 주로 ASCE(American Society of Civil Engineers)의 『Design of Blast Resistant Building in Petro-chemical Facilities』 및 MCA(Manufacturing Chemical Association)의 『Siting and Construction of New Control Houses for Chemical Manufacturing Plants (SG-22)』가 널리 사용되고 있다. 이외에 우수 엔지니어링 회사들은 자체적으로 방폭설계기준 및 시방서를 작성, 설계 및 시공에 반영하고 있다.

3. 폭발하중의 산정

3.1 폭풍파 현상

공중에서 폭발이 발생하여 큰 에너지가 갑자기 방출되면 폭발지점의 압력이 급격히 증가하면서 동시에 사방으로 퍼져나간다.

이와 같은 폭풍파(blast wave)의 충격선단(shock front)이 타시간에 어느 한 지점에 도달하면 그 지점의 압력은 [그림3-1]에서처럼 대기압 상태에서 최대입력압력(peak incident pressure, P_{so})으로 순간적으로 급상승한 다음 감소하여 t_0 시간 후에 대기압 수준으로 되 돌아오는 정압단계(positive phase)를 거치고 t_0 시간동안 계속하여 대기압 이하로 감소하였다가 $t_0+t_0^*$ 시간에서 대기압으로 복귀하는 부압단계(negative phase) 과정을 거쳐 소멸된다. 부압단계의 최대 압력을 최대흡입압력(peak suction pressure)이라 하는데 정압에 비해 적다. 압력-시간곡선에서 정, 부압단계의 면적이 충격량에 해당 된다.

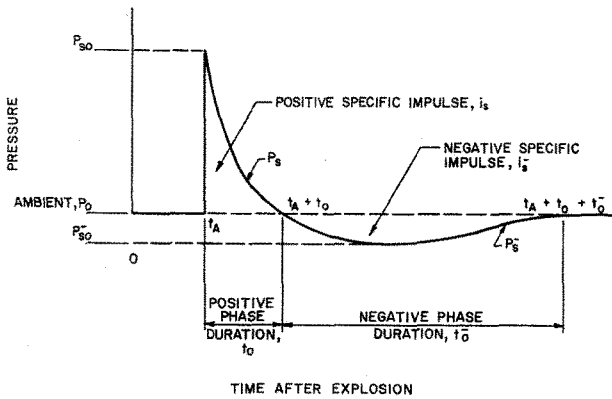


[그림 3-1] 폭풍파 압력-시간이력곡선

압력의 차이에 의해 발생하는 폭풍파와는 달리 폭발시 발생한 가스 입자들도 충격선단을 따라 이동하게 되는데, 이와 같은 가스입자들에 의한 최대작용압력을 최대동압력(peak dynamic pressure, q_0)이라 하며, 폭풍파와 구분된다.

충격선단이 어떤 물체의 표면과 접촉하면 입사파는 반사되면서 압력과 충격량이 증가되는데, 반사되는 최대압력, 즉 최대반사압력(peak reflected pressure, P_r)의 크기는 입사압력, 입사각의 각

도, 그리고 반사면의 크기에 따라 달라진다. [그림 3-2]는 무한평면 상에서 반사될 경우 전형적인 압력의 변화를 보여준다.



[그림 3-2] 폭풍파 압력-시간이력곡선 (무한평면반사)

3.2 폭발력 결정인자

폭발의 위력은 초과압력(overpressure)이나 동압력(dynamic pressure)등의 세기를 갖고 평가하는데 폭발위력에 결정적인 영향을 미치는 인자는 폭발지점으로부터 떨어진 거리와 폭발물의 중량이다. 폭발 위력은 폭발물 중량의 삼승근에 비례함이 실험을 통해 밝혀졌다. 일반적으로 폭발물은 TNT를 기준으로 하며, 그밖의 폭발물에 대해서는 아래 식(3-1)에 따라 TNT등가중량(TNT equivalency)을 구하여 사용한다.

$$W_E = (H_{EXP}^d / H_{TNT}^d) \times W_{EXP} \quad \text{식(3-1)}$$

여기서, \$W_E\$: TNT등가중량

\$W_{EXP}\$: 대상폭발물 중량

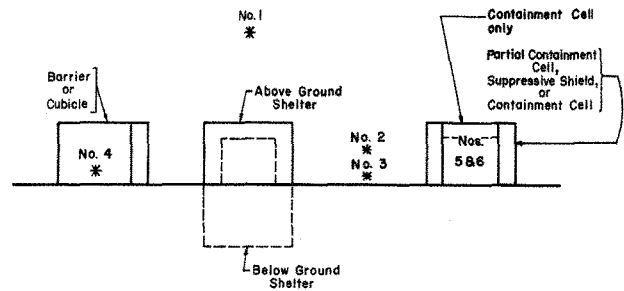
\$H_{EXP}^d\$: 대상폭발물 폭발반응열(heat of detonation)

\$H_{TNT}^d\$: TNT의 폭발반응열

3.3 폭발하중 범주(blast-loading categories)

구조물에 작용하는 폭발하중은 폭발물의 구조조건에 따라 비구속폭발(unconfined explosion)과 구속폭발(confined explosion)로 나뉜다.

비구속폭발은 다시 장애물이 전혀 존재하지 않은 자유공중폭발(free air burst)과 장애물이 있는 공중폭발(air burst) 그리고 지표면폭발(surface burst)로 구분되며, 구속폭발은 완전배기폭발(fully vented), 부분배기폭발(partially vented), 완전구속폭발(fully confined)로 구분된다. 폭발물의 구속조건, 폭발위치에 따라 폭발하중의 크기와 양상이 상당한 차이를 보이므로 그에 따른 구조물의 형태로 다르게 계획되어야 한다.



BLAST LOADING CATEGORIES			
CHARGE CONFINEMENT	CATEGORY	PRESSURE LOADS	PROTECTIVE STRUCTURE
Unconfined Explosions	1. Free Air Burst 2. Air Burst 3. Surface Burst	a. Unreflected b. Reflected	Shelter
	4. Fully Vented	c. Internal Shock d. Leakage	Cubicle
	5. Partially Confined	c. Internal Shock e. Internal Gas d. Leakage	Partial Containment Cell or Suppressive Shield
6. Fully Confined	c. Internal Shock e. Internal Gas	Full Containment Cell	

[그림 3-3] 폭발하중 범주

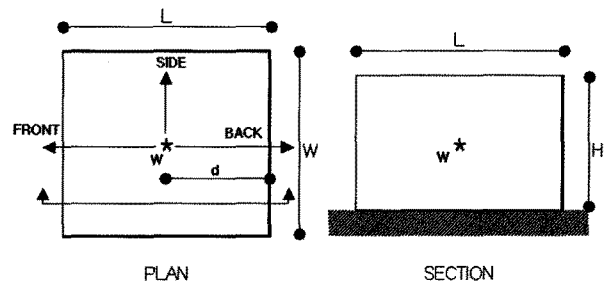
3.4 폭발하중 산정에 (TM5-1300)

(1) 산정조건

구조물크기 : 16m(L) × 6m(W) × 6m(H)

방폭조건 : Composition C-4, w=5kgf

폭발거리 : d=6m



* : location of explosives

(2) TNT등가중량 (TNT equivalency)

$$H_{EXP}^d(C-4) = 2.22e6 \text{ ft} \cdot \text{lb/lb}$$

$$H_{TNT}^d(TNT) = 1.97e6 \text{ ft} \cdot \text{lb/lb}$$

$$W_E = (H_{EXP}^d / H_{TNT}^d) \times W_{EXP} = 12.4 \text{ lbs} (5.635 \text{ kgf})$$

$$\therefore W_E = 14.9 \text{ lbs (안전율 1.2 고려)}$$

(3) 최대입력압력(peak incident pressure, \$P_{so}\$)

$$\text{Scaled distance } Z = d / W_E^{1/3} = 8.0 \text{ ft/lbs}^{1/3}$$

$$P_{so}(\text{front}) = 28.5 \text{ psi} (20 \text{ tf/m}^2) \quad \text{Figure 2-168}$$

(4) 최대입력충격량(peak incident impulse, I_s)

$$I_s/W_E^{1/3} = 10.5 \text{ psi} \cdot \text{ms}/\text{lb}^{1/3} \quad \text{Figure 2-172}$$

$$\therefore I_s(\text{front}) = 156.5 \text{ psi} \cdot \text{ms}$$

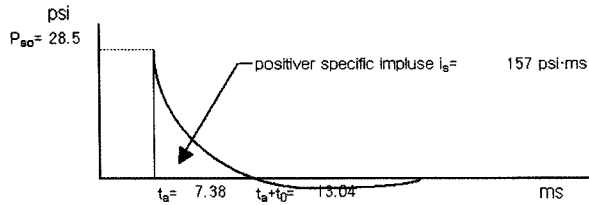
(5) t_o , t_a

$$t_o/W_E^{1/3} = 2.3\text{ms}/\text{lb}^{1/3} \quad \text{Figure 2-5}$$

$$t_a/W_E^{1/3} = 3.0\text{ms}/\text{lb}^{1/3} \quad \text{Figure 2-5}$$

$$\therefore t_o = 5.66\text{ms}, t_a = 7.38\text{ms}$$

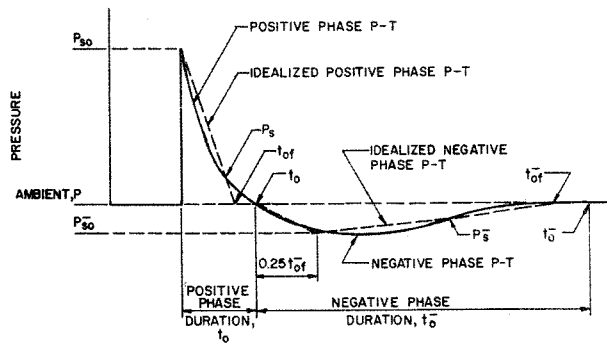
(최대반사압력 P_r 도 Figure 2-5를 이용, 동일한 방법으로 산정하며, 최대동압력 q_o 는 Figure 2-3을 이용하여 산정한다.)



3.5 등가 삼각형 펄스 (equivalent triangular pulse)

3.4절에서 산정한 압력-시간이력곡선은 설계에 그대로 사용하기에는 복잡하므로 등가삼각형의 압력-시간 펄스로 근사화하여 해석 및 설계에 이용한다. 즉, 식(3-2)를 이용, 압력-시간 이력곡선의 정(正) 충격량 I_s 에 해당하는 면적과 동일한 면적의 삼각형으로 단순화하여 적용한다. 이러한 삼각형을 등가삼각형펄스라고 하며 부(負)충격량 부분이나 반사압력에서 모두 적용할 수 있다. (그림3-4참조)

$$t_{of} = (2 \times I_s) / P_{so} \quad \text{식(3-2)}$$



[그림 3.4] 등가삼각형펄스

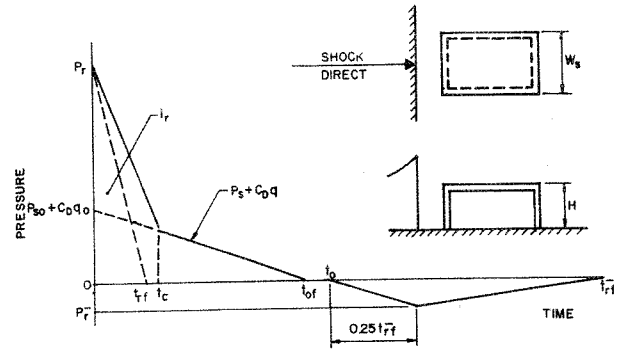
3.6 설계용 폭발하중

폭발원에 면한 구조물은 위에서 언급했듯이 입사압력(incident pressure), 동압력(dynamic pressure), 반사압력(reflected pressure) 그리고 흡입압력(suction pressure)을 받는다.

① 전면벽체(front wall)

폭풍과 충격선단이 전면 벽체에 도달하는 순간 반사압력이 형성되고,

소멸시간(clearing time, t_c)까지 감소된 후, 소멸시간 이후에는 입사 압력과 견인압력(drag pressure)의 합력을 받는다. (그림3.5 참조)



[그림 3.5] 그림 전면벽체의 설계용 압력-시간이력곡선

$$t_c = 4S / (1+R) Cr \quad \text{식(3-3)}$$

여기서, S : H 와 $W_s/2$ 중 작은 값(그림 3.5참조)

$$R : S/G,$$

$$G : H \text{와 } W_s/2 \text{ 중 큰 값 (그림 3.5참조)}$$

$$Cr : \text{반사구역의 음속(TM 5-1300 Figure 2-192 참조)}$$

견인압력(drag pressure)은 폭발시 발생한 가스입자의 이동에 의한 동압력(dynamic pressure, q)에 견인계수(drag coefficient, C_D =전면벽체인 경우 일반적으로 1 적용)의 곱으로 구한다.

② 지붕(roof)과 측면벽체(side wall)

측면벽체와 지붕벽체는 반사압력이 작용하지 않으므로 전면벽체보다 상대적으로 작은 압력을 받으며, 식(3-4)에 의하여 산정한다.

$$PR = C_E P_{of} + C_D q_{of} \quad \text{식(3-4)}$$

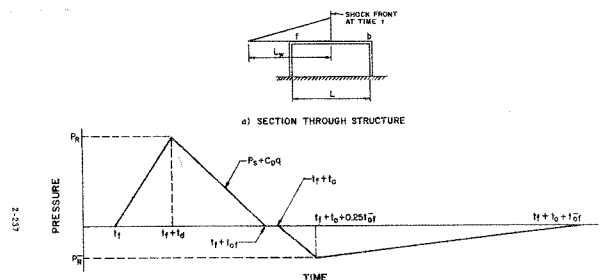
여기서, P_{of} : 절점에서의 입사압력 (그림3.6참조)

q_{of} : 절점에서의 동압력 (그림3.6참조)

C_E : 등가하중계수 (TM 5-1300 Figure 2-196 참조)

C_D : 견인계수

$$(0 \sim 25\text{psi}:0.4, 25 \sim 50\text{psi}:0.3, 50 \sim 130\text{psi}:0.2)$$



[그림 3.6] 지붕 및 측면벽체의 설계용 압력-시간이력곡선

③ 후면벽체(rear wall)

후면벽체 하중은 전면벽체하중과 반대방향으로 작용하며, 안전측

설계를 위하여 일반적으로 고려하지 않는다.

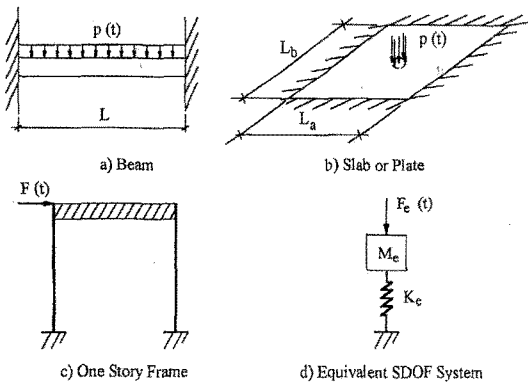
4.0 방폭구조물의 동적해석

4.1 폭발하중의 크기에 따른 해석방법

폭발하중을 받는 각 부재의 해석방법은 최대입사압력(P_{so})의 크기에 따라 결정되어야 한다. 폭발원에서 상당히 멀리 떨어져 있어서 도달하는 압력의 크기가 매우 작은 경우에는 동적하중을 구조물의 동적 특성을 고려한 등가의 정적하중으로 고려하는 등가정적해석방법(equivalent static method)을 사용할 수 있는데 구조물의 탄성해석을 전제로 하며, 압력의 크기가 풍하중과 비슷한 수준일 경우에만 적용하는 것이 바람직하다. (참고문헌5)에 등가정적해석방법에 대하여 상세히 기술되어 있음) 이와 같이 특별한 경우를 제외하고는 압력-시간이력곡선을 고려한 동적해석을 수행하는 것이 일반적이다.

4.2 단자유도계(single degree of freedom)

전체구조물을 구성하는 요소들, 예를 들면 보, 슬래브, 1개층 전단벽 등은 대표적인 단자유도계라 할 수 있다.



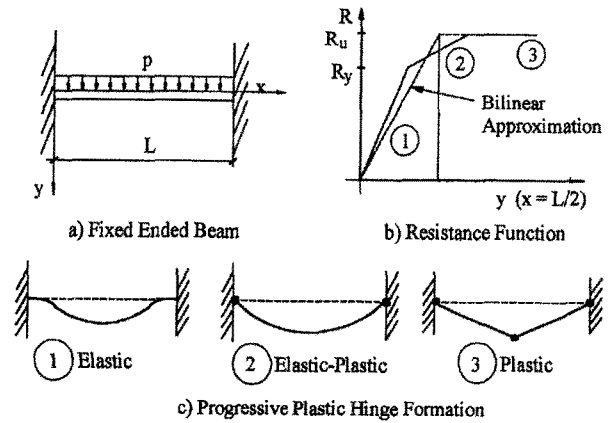
[그림 4.1] 단자유도계

단자유도계의 비감쇠 시스템의 운동방정식은 다음식과 같다. (일반적으로 방폭설계시 감쇠는 고려하지 않음)

$$Ma + R = F(t) \tag{4-1}$$

식(4-1)이 해는 탄성계(elastic system)인 경우 하중의 최대값을 적용했을 때의 정역학적 처짐에 대한 어떤 시간에서의 동적 처짐의 비로 정의되는 동하중계수(DLF : dynamic load factor)를 이용

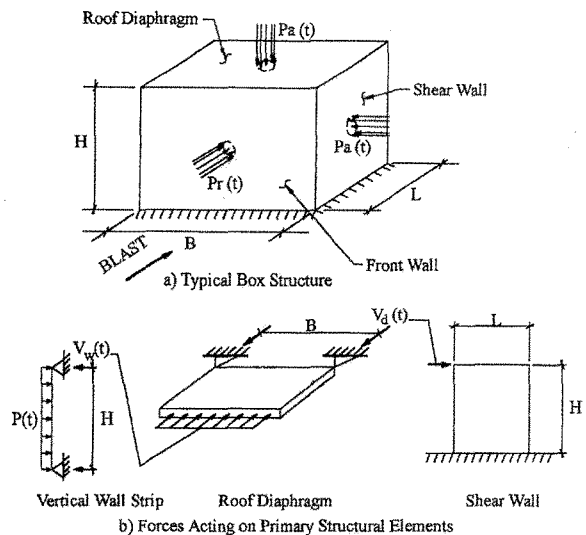
하여 쉽게 구할 수 있다. 탄소성계(elasto-plastic system)의 경우는 그림4.2와 같이 탄성, 탄소성, 소성의 세 부분으로 나뉘지며, 탄-소성계의 최대응답을 구하는 방법으로는 미리 준비된 차트를 이용하는 차트해방법(graphical solution method)과 수치적분방법(numerical integration method, time history method) 등이 있다.



[그림 4.2] 저항함수 (R)

4.3 하중전달경로(load path)에 따른 근사해석

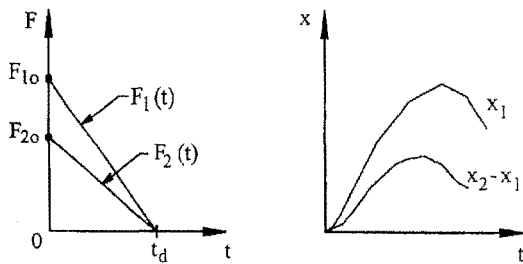
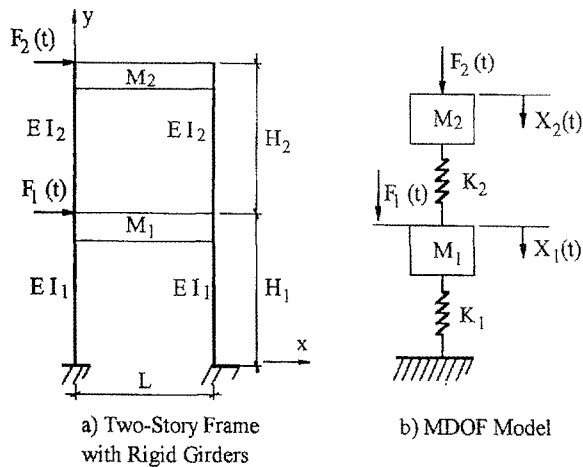
폭발하중이 구조물에 작용했을 때, 엔지니어의 경험과 판단에 의해 연속적인 하중전달경로를 선정하고 각 단계별 해당 부재의 응답을 단자유도계로 해석하여 구하고 그 응답반력을 다음 경로 해당 부재의 하중데이터로 입력하는 근사적인 해석방법으로 주요 부재간의 동적상호작용 효과는 고려되지 않는다. (참고문헌4)에 하중전달경로에 따른 근사해석에 대하여 상세히 기술되어 있음)



[그림 4.3] 하중전달경로를 이용한 근사해석방법

4.4 다자유도계 (multi degree of freedom)

2개층 이상의 구조물은 다자유도계 해석을 수행하여야 한다.



[그림 4.4] 다자유도계

4.5 유한요소해석 (finite element analysis)

지지시스템에 대한 해당 부재의 고유진동수 비가 0.5보다 크고 2보다 작을 경우, 시간이력지점반력을 필요로 하는 경우, 비틀림, 대변형 P-delta 영향 등을 고려해야 할 경우, 비대칭, 불규칙 질량, 강성이 있을 경우 유한요소해석을 통해 거동을 확인하는 것이 바람직하다.

5. 맺음말

지금까지 방폭구조물에 대한 폭발하중 산정과 해석방법에 대하여 개략적으로 설명하였으며, 각 구조시스템별 상세설계 및 변형제어방법, 접합부설계와 방폭문 및 각종 설비개구부 등에 대한 방폭설계 방법 및 설계사례에 대해서는 다음 기회에 소개하도록 하겠다.

방폭설계는 일부 플랜트 구조물이나 군사시설물 등에 국한되어 왔으나, 향후에는 일반건물에 대해서도 시설물의 중요도에 따라 잠재적인 폭발위험에 대비할 수 있도록 유도하고 있는 추세이다. 따라서 향후 진행될 각종 구조물의 방폭설계 업무에 기술적으로 조금이나마 도움이 되길 바란다.

참고 문헌

- 1) TM 5-1300, "Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions", Department of the Army, Navy and Air Force.
- 2) TM 5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons", Department of the Army, Navy and Air Force.
- 3) 방호구조물 설계기준, 국방부
- 4) ASCE, "Design of Blast Resistant Building in Petrochemical Facilities", 1997
- 5) MCA, "Siting and Construction of New Control Houses for Chemical Manufacturing Plants (SG-22)", 1978
- 6) CIA, "Process Plant Hazard and Control Building Design", 1992
- 7) "군사구조물", 육군사관학교