

폭발이 구조물에 미치는 영향

윤용균^{1)*}

Effects of Explosion on Structures

Yong-Kyun Yoon

Abstract Information on overpressure, positive phase duration, and impulse are required to assess the effects of shock waves or pressure waves on the structure. In this study, the overpressure and positive phase duration were determined by applying the Multi-Energy Method, which is found to be effective in analyzing the explosion of vapor clouds. Based on the total heat of combustion estimated in the cyclohexane vapor cloud explosion in the Nypro Ltd(UK), overpressure and positive phase duration at the distance of 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360(m) from the source of explosion were evaluated. Overpressure was shown to decrease exponentially and positive phase duration increased almost linearly with distance. A probit function was used to assess the probability of damages for the structures at each distance using the overpressure and impact obtained at the above mentioned distances. The Analyses of probability of damages have shown that there is a high probability of collapse at distances within 120m, major damage to structures within 240m, and minor damage and breakage of window panes of structures occur over the entire distances.

Key words Overpressure, Positive phase duration, Impulse, Multi-Energy Method, Probit function, Probability of damages

초 록 충격파나 압력파가 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 과압, 양의 압력 지속시간, 충격량에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 증기운 폭발 해석에 효과적인 다중에너지법을 적용하여 과압 및 양의 압력 지속시간을 결정하였다. 영국 Nypro 화학회사에서 발생한 싸이클로헥산 증기운 폭발 사고에서 추정된 총 폭발열을 기반으로 폭발원으로부터 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360(m) 이격된 지점에서의 과압, 양의 압력 지속시간을 평가하였다. 거리에 따라 과압은 지수적으로 감소하는 것으로 나타났고, 양의 압력 지속시간은 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 상기의 각 거리에서 구한 과압 및 충격량을 이용하여 각 거리에서의 구조물의 손상 확률을 평가하기 위해서 프로비트 함수를 사용하였다. 손상 확률을 평가한 결과 120m 이내 지점에서는 붕괴의 가능성이 크고, 240m 이내에서는 심각한 구조물의 손상이, 구조물의 가벼운 손상과 유리창 파손은 전 범위에 걸쳐서 발생하는 것으로 나타났다.

핵심어 과압, 양의 압력 지속시간, 충격량, 다중에너지법, 프로비트 함수, 손상 확률

1) 세명대학교 소방방재학과 교수

* 교신저자 yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2019년 12월 11일

심사 완료일 : 2019년 12월 17일

게재 승인일 : 2019년 12월 23일

1. 서론

고압으로 저장된 액화가스류가 용기의 파열 등에 의해 유출되는 경우 압력이 대기압 상태로 떨어지면서 공기와 혼합되어 증기운(Vapor cloud)을 형성하고 주변에 발화원이 존재하는 경우 증기운 폭발이 발생한다. 폭발에 따라 순간적으로 발생한 고온, 고압 상태의 연소 생성물이 팽창하면서 주변 대기에 압력 상승을 유발하여 폭풍파가 형성된다. 폭풍파의 이동 속도가 음속보다 빠른 경우 충격파가 발생하고 음속보다 낮은 경우에는 압력파가 형성된다(Mercx and van den Berg, 2005).

폭탄 테러, 화약 운반 시 폭발, 증기운 폭발 등과 같이 대기 중에서의 자유 폭발이 발생하는 경우 충격파나 압력파에 의한 압력이 구조물에 작용하여 유리창 파손부터 구조물의 붕괴에 이르는 여러 피해를 발생시킬 수 있다. 자유 폭발에 대비하기 위한 구조물의 내압설계를 하기 위해서는 발생된 압력의 크기에 따라 구조물의 손상 정도가 발생할 확률을 평가하는 것이 중요하다. 화약류나 증기운의 폭발이 구조물에 미치는 가장 중요한 영향 요소로는 과압(Overpressure), 충격량(Impulse), 양의 압력 지속시간(Positive phase duration)을 들 수 있다. 일반적으로 가장 잘 알려진 TNT 등가법(TNT Equivalency Method)의 경우에는 과압에 대한 정보만을 제공하는 반면에 다중에너지법(Multi-Energy Method)은 과압, 양의 압력 지속시간, 충격량에 대한 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 싸이클로hexan 증기운 폭발 사고로부터 추정된 총 폭발열을 기반으로 폭원에서 부터 360m 이격지점까지 40m 간격으로 각각 과압, 양의 압력 지속시간을 평가하였다. 또한 프로비트 함수(Probit function)를 적용하여 각 분석지점에 구조물이 있다고 가정하였을 경우 구조물의 붕괴(Collapse), 심각한 손상(Major damage), 가벼운 손상(Minor damage), 유리창 파손(Breakage of window panes)의 단계별 발생 확률을 결정하였다.

2. 폭풍파 및 다중에너지법

2.1 폭풍파

화약이나 증기운과 같은 폭발성 물질이 지상이나 공중에서 폭발하는 경우 고온의 연소생성물이 팽창하면서 주변 대기를 압축하여 압력 상승이 발생하고 상승된 압력은 폭풍파의 형태로 전파한다. 일반적으로 증기운이나 가스 폭발의 경우 폭연이 발생하면서 폭풍파는 압력과 형태로 전파하고, 화약이나 아주 강력한 가스 폭발의 경우에는 폭풍이 발생하면서 충격파의 형태로 폭풍파가 이동한다(Miller, 2004; Mercx and van den Berg, 2005; Larcher, 2007). 폭풍파의 전파에 따른 폭원으로부터 이격된 임의 지점에서의 대기압의 변화를 살펴보면 폭풍파가 그 지점에 도달하는 순간 압력이 급상승하였다가 폭풍파가 통과하면서 과압이 급격히 대기압까지 감소하고(양의 압력 단계), 뒤이어 대기압 이하로 감소하였다가 다시 대기압 상태로 돌아오게 된다(음의 압력 단계).

사람과 구조물에 크게 영향을 미치는 것은 양의 압력 단계에서의 압력과 충격량이기 때문에 충격파와 압력파에 대한 양의 압력 구간을 도식적으로 단순히 표현하면 Fig. 1과 같다(Mercx, 1992; Assael and Kakosimos, 2010).

그림에서 P_s 는 과압, t_p 는 양의 압력 지속시간, P_a 는 대기압을 나타낸다. 충격량(i_s)은 양의 압력 구간의 면적에 해당하기 때문에 (1)식과 같이 구해진다.

$$i_s = \int_{t_p} P_s(t) dt \tag{1}$$

Fig. 1과 같이 양의 압력 곡선을 단순화 시킨 경우 충격량은 삼각형의 면적을 구하는 것과 같아지기 때문에 (2)식을 이용하여 구할 수 있다.

$$i_s = \frac{1}{2} \times P_s \times t_p \tag{2}$$

2.2 다중에너지법

다중에너지법에서는 확산된 증기운이 한 번에 전부 폭발하는 것이 아니고 시설물이나 건물 등이 밀집한 혼잡지역이나 부분적으로 밀폐된 지역에 퍼져있는

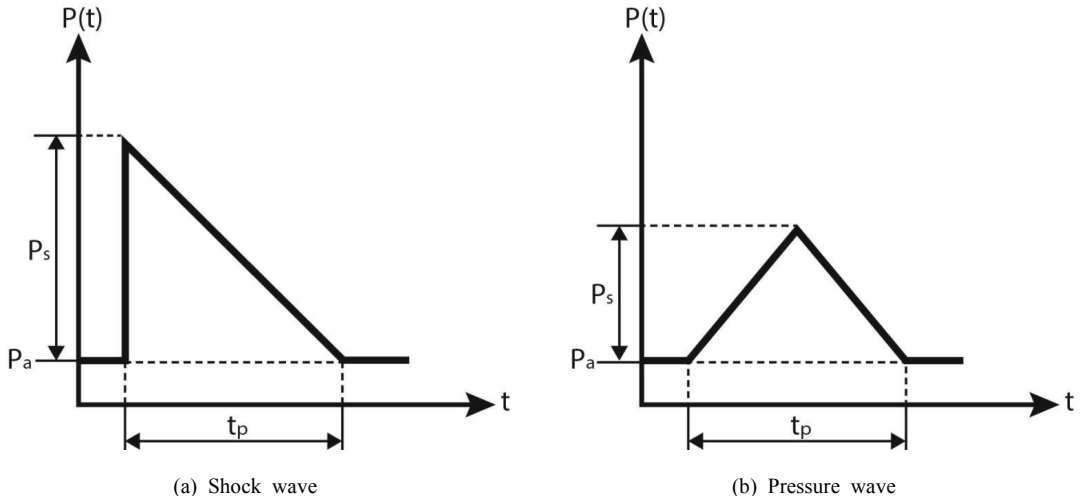


Fig. 1. Simplified diagrams of blasting wave.

증기운만이 폭발하고 나머지 지역에 확산되어 있는 증기운은 천천히 연소하는 것으로 가정한다. 따라서 증기운이 퍼져있는 지역이 여러 곳의 혼합지역을 포함하고 있다면 각 혼합지역에서 폭발이 발생할 수 있다(Mercx and van den Berg, 2005).

다중에너지법에서는 폭발강도계수(Coefficient of strength of explosion blast)가 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10인 경우의 환산과압-연소에너지 환산거리 도표를 이용하여 폭발원으로부터 거리에 따른 과압의 크기를 구할 수 있도록 하였다. 폭발강도계수가 10인 경우 폭굉을 나타내고 1로 갈수록 폭발강도가 낮아져 낮은 정도의 폭연이 발생하는 것을 뜻한다.

폭발강도계수가 10인 경우에는 환산과압-연소에너지 환산거리 도표 대신에 (3)식과 (4)식을 이용하여 거리에 따른 과압을 계산할 수 있다(Mercx and van den Berg, 2005; Assael and Kakosimos, 2010).

$$P_s = 100 \times 10^{(-b \cdot \log_{10} r' - c)} \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$

$$r' = r \left(\frac{E}{P_a} \right)^{1/3} \quad (4)$$

여기서 r' : 연소에너지 환산거리($0.25 < r' < 1.0$ 인 경우 $b=2.3721$, $c=0.3372$, $1.0 \leq r' \leq 2.5$ 인 경우 $b=1.5236$, $c=0.3372$, $r' > 2.5$ 인 경우 $b=1.1188$, $c=0.5120$), r : 폭발원으로부터 임의 지점까지의 거리

(m), E : 폭발로부터 발생한 총에너지(MJ), P_a : 대기압(0.1MPa)이다.

양의 과압 지속시간(t_p)은 (5)식을 통해 계산한다.

$$t_p = \frac{t_p'}{C_s} \left(\frac{E}{P_a} \right)^{1/3} \quad (5)$$

여기서 t_p' : 환산 양의 과압 지속시간, C_s : 음속(340m/s)이다. (5)식을 이용하여 t_p 를 구하기 위해서는 먼저 t_p' 를 결정해야 하는데 Fig. 2에는 폭발강도계수가 10인 경우의 t_p' - r' 그래프가 표시되어 있다(van den Berg, 1985). 기존 문헌에는 1부터 10까지 각각의

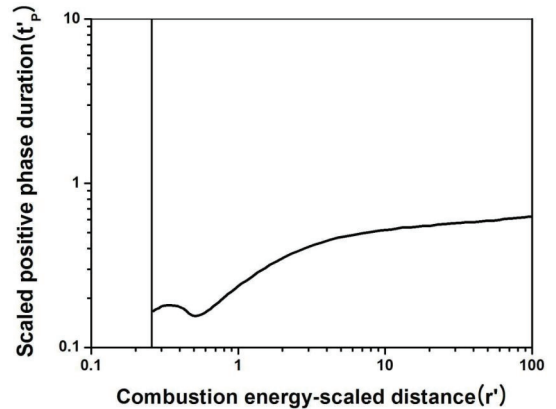


Fig. 2. Scaled positive phase duration vs combustion energy-scaled distance.

폭발강도계수에 대한 그래프가 표시되었지만 본 연구에서는 폭풍을 대상으로 하기 때문에 폭발강도계수가 10인 경우만 선택하여 표시하였다. 그림 내에 표시된 직선은 t_p' 를 읽을 수 있는 시작 위치를 나타내며 대략 $r' = 0.25$ 이상이 되어야 t_p' 를 결정할 수 있다.

3. 과압과 충격량이 구조물에 미치는 영향에 대한 확률론적인 평가

폭발이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서 보통 용량반응곡선(Dose-response curve)이 사용된다. 폭발의 경우 용량반응곡선은 특정한 과압이나 충격량이 구조물에 가해졌을 때 구조물에 어느 정도의 피해가 발생했는지를 측정하는 실험실 실험이나 현장 실험 결과로부터 얻어진다. 용량반응곡선은 S자 모양의 시그모이드 함수(Sigmoid function) 형태로 표시되며, 용량반응곡선을 선형식으로 변환하는데 자주 사용되는 것이 프로빗 함수(Probit function)이다(Mercx and van den Berg, 2005).

구조물이 손상되거나 붕괴될 확률은 프로빗 함수를 이용하여 다음 확률 식으로 계산할 수 있다(Mercx and van den Berg, 2005; Assael and Kakosimos, 2010).

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\operatorname{Pr} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (6)$$

여기서 P : 폭발로 인한 구조물의 손상이나 붕괴가 발생할 수 있는 확률, Pr : 프로빗 함수, erf : 에러함수로 $x \geq 0$ 이고 $\operatorname{error} < 5 \times 10^{-4}$ 인 경우 $\operatorname{erf}(x) = 1 - (1 + 0.278393x + 0.230389x^2 + 0.000972x^3 + 0.078108x^4)^{-4}$ 로 나타나며 $\operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x)$ 의 관계가 성립한다.

프로빗 함수는 식 (7)과 같이 표시된다.

$$\operatorname{Pr} = c_1 + c_2 \ln S \quad (7)$$

여기서 S : 구조물에 미치는 영향 정도(유리창 파손, 손상 또는 붕괴)에 따라 달라지는 변수로 상수 c_1, c_2 에 따라 달라진다.

구조물의 붕괴, 구조물의 심각한 손상, 구조물의 가벼운 손상, 유리창 파손의 경우에 대한 프로빗 함수를 구하기 위한 식은 다음 (8)~(14)와 같다.

① 구조물의 붕괴

$$\operatorname{Pr} = 5.0 - 0.22 \ln S \quad (8)$$

$$S = \left(\frac{40,000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i_s} \right)^{11.3} \quad (9)$$

② 구조물의 심각한 손상

$$\operatorname{Pr} = 5.0 - 0.26 \ln S \quad (10)$$

$$S = \left(\frac{17,500}{P_s} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{i_s} \right)^{9.3} \quad (11)$$

③ 구조물의 가벼운 손상

$$\operatorname{Pr} = 5.0 - 0.26 \ln S \quad (12)$$

$$S = \left(\frac{4,600}{P_s} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{i_s} \right)^{5.0} \quad (13)$$

④ 유리창 파손

$$\operatorname{Pr} = -16.58 + 2.53 \ln P_s \quad (14)$$

4. 구조물의 손상 확률 분석

본 연구에서는 1974년에 발생한 영국 Nypro사 화학공장의 씨클로hexan 유출에 따른 증기운 폭발사고(사망자 : 28명, 부상자 : 76명)를 분석 대상으로 하였다. 씨클로hexan은 온도 150°C, 10기압 상태로 40톤이 유출되었으며 이중 70%인 28톤이 증기운을 형성한 것으로 상정하였다. 기존 연구에 따르면 폭발강도계수를 10으로 적용할 수 있는 시설물이 밀집된 혼잡지역에 확산된 증기운의 부피는 88,850m³이고 증기운 내 씨클로hexan의 부피는 2,066m³으로 나타났으며 이를 총 폭발열로 환산하면 271,782MJ이 된다(Assael and Kakosimos, 2010; 윤용균, 2018).

다중에너지법에서 증기운의 범위 내에서는 과압과 양의 압력 지속기간을 평가할 수 없기 때문에 증기운의 반경을 먼저 구한 후 증기운 반경을 초과하는 지점을 분석 지점으로 선정해야 한다. 증기운이 반구 형태를 띤다고 가정하면 증기운의 반경(R)은 증기운의 부

Table 1. Overpressure, positive phase duration, and impulse at each distance

Parameters of shock wave	Distance from the source of explosion (m)								
	40	80	120	160	200	240	280	320	360
P_s (kPa)	891.4	172.2	65.8	37.4	26.6	20.1	15.9	13.0	10.7
t_p (ms)	71.3	66.2	87.1	104.7	120.6	133.5	144.0	151.4	159.3
i_s (Pa · s)	31,796	5,700	2,867	1,957	1,604	1,344	1,146	984	848

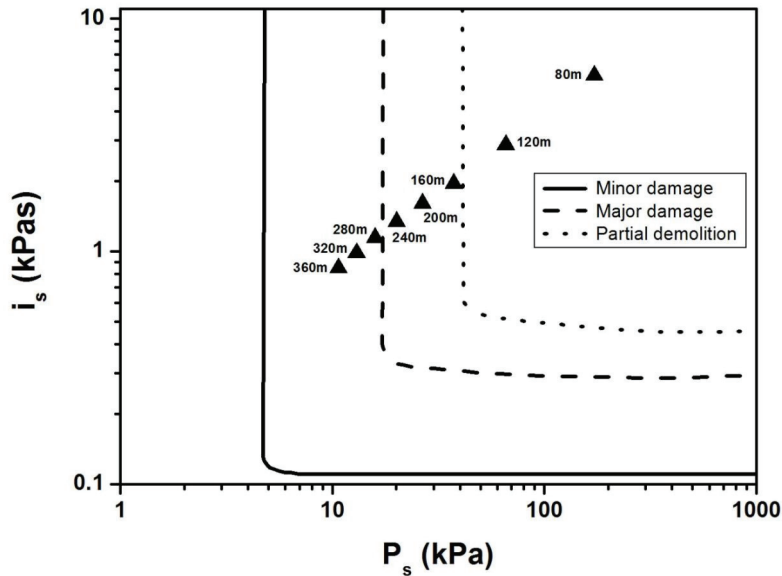


Fig. 3. Possibility of damages at each distance.

피(V)를 이용하여 $R = \left(\frac{3V}{2\pi}\right)^{1/3} = \left(\frac{3 \times 88850}{2\pi}\right)^{1/3} \approx 34.9m$ 이 된다. 따라서 본 연구에서는 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360(m) 지점을 분석 지점으로 선정하였다.

Fig. 2를 이용하여 각 분석 지점에서의 t_p' 를 읽은 후 이를 (5)식에 대입하여 양의 과압 지속시간(t_p)을 계산한다. 과압(P_s)과 충격량(i_s)은 (3), (4)식을 적용하여 구한다. Table 1에는 각 분석 지점에서 계산된 과압, 양의 압력 지속시간, 충격량이 표시되어 있다. 적용 폭발열이 매우 컸기 때문에 모든 지점에서 과압과 충격량은 크게 계산되었다.

Table 1에 제시된 각 지점에서 계산된 과압과 충격량을 이용하여 구조물의 파괴 정도를 평가하기 위해 서 과압(P_s)-충격량(i_s) 도표에 각 지점을 표시한 것은

Fig. 3과 같다(Mercx and van den Berg, 2005). Fig. 3에서 폭원으로부터 280, 320, 360(m) 이격된 지점에 존재하는 구조물은 가벼운 손상이, 160, 200, 240(m) 떨어진 지점의 구조물은 심각한 손상이, 80, 120(m) 이격된 지점의 구조물은 부분적인 붕괴(벽체의 50~75%)가 파괴되거나 안전하지 않은 경우가 발생한다는 것을 보여준다. 40m 이격된 지점은 Fig. 3 도표의 범위에서 벗어나기 때문에 구조물이 완전히 붕괴하는 것으로 간주할 수 있다.

Table 1을 고려한 각 지점에 구조물이 있는 경우 프로빗 함수를 이용하여 구한 구조물의 붕괴(Collapse), 구조물의 심각한 손상(Major damage), 구조물의 가벼운 손상(Minor damage), 유리창 파손(Breakage of window panes)의 손상 확률을 Table 2에 표시하고 있으며 이를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 4이다. 발생 확

Table 2. Probability of damages at each distance

Damage probability for level of damages (%)	Distance from the source of explosion (m)								
	40	80	120	160	200	240	280	320	360
Collapse	99.9	99.1	79.1	45.5	25.3	13.2	6.6	3.3	1.5
Major damage	99.9	99.9	99.7	95.1	81.9	62.0	41.8	25.7	13.9
Minor damage	99.9	99.9	99.6	98.3	96.2	93.2	89.5	85.3	80.2
Breakage of window panes	100	100	99.9	99.9	99.9	99.9	99.7	99.1	97.0

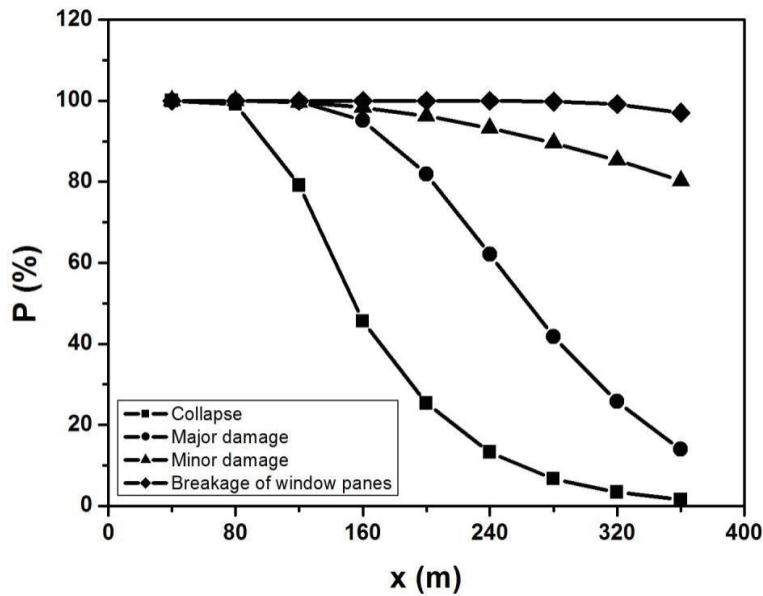


Fig. 4. Probability of damages with distance from the source of explosion as a function of each damage level.

를 50% 이상에서 해당 손상이 발생할 가능성이 높다고 가정하면 120m 지점까지는 구조물의 붕괴가, 240m 지점까지는 구조물의 심각한 손상이, 전 범위에서는 구조물의 가벼운 손상과 유리창 파손이 발생하는 것으로 나타났다.

Table 3은 Flixborough(Nypro사) 폭발사고 후 폭원 주변 실제 구조물의 손상 정도를 통해 유추한 거리별 과압의 크기를 나타낸다(Assael and Kakosimos, 2010). 사례를 통해 추정한 과압의 크기와 Table 1의 다중에너지법에 의해 계산한 과압의 크기를 비교하면 대략

Table 3. Overpressure based on the level of damages at the Flixborough(Nypro Ltd.) accident

Distance from explosion point (m)	Type of structures	Overpressure (kPa)
120	Offices	50
130	Restaurant	40
220	Communications	25
230	Machine shop	25
290	Storage tanks	18

적으로 유사하다는 것을 알 수 있다. Table 3에 표시된 지점에 존재한 구조물이 붕괴되지는 않았지만 심각한 손상 이상의 파괴가 발생했다는 점을 고려하면 240m 지점까지는 구조물의 심각한 손상이 발생할 확률이 있다는 본 연구 결과가 타당성이 있다고 생각할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 1974년에 영국에서 발생한 Nypro 화학공장 폭발 사고를 분석하기 위해서 다중에너지법을 적용하였다. 유출된 싸이클로hex산이 증기운을 형성하여 폭굉하였을 때 발생한 총 폭발열을 이용하여 각 설정 지점에서의 과압, 충격량, 양의 압력 지속시간을 평가하였다. 또한 과압과 충격량을 프로빗 함수에 적용하여 구조물의 붕괴, 심각한 손상, 가벼운 손상, 유리창 파손의 경우에 대한 발생 확률을 계산하였으며 결과는 다음과 같다.

1) 각 분석지점에 구조물이 존재하는 경우 구조물의 손상 정도를 과압(P_s)-충격량(i_s) 도표를 이용하여 평가한 결과 40, 80, 120(m) 지점에서는 붕괴 또는 일부 붕괴가, 160, 200, 240(m) 지점에서는 심각한 손상이, 280, 320, 360(m) 지점에서는 가벼운 손상이 발생하는 것으로 나타났다.

2) 프로빗 함수를 이용한 손상 정도에 따른 발생 확률을 평가한 결과 120m 이내 지점에서는 붕괴의

가능성이 크고, 240m 이내에서는 심각한 구조물의 손상이, 가벼운 손상과 유리창 파손은 전 범위에 걸쳐서 발생하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비를 지원해준 학교에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤용균, 2018, 폭발성 물질의 폭발에 따른 폭발압력 평가, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 36, No. 4, pp. 26-34.
2. Assael, M.J. and K.E. Kakosimos, 2010, Fires, explosions, and toxic gas dispersions; Effects calculation and risk analysis, CRC Press, pp. 123-206.
3. Larcher, M., 2007, Simulation of the effects of an air blast wave, JRC, pp. 6-8.
4. Mercx, W.P.M., 1992, The consequences of explosion effects on humans, Ch. 3 of CPR 16E, Committee for the Prevention of Disasters, pp. 3.1-3.44.
5. Mercx, W.P.M. and A.C. van den Berg, 2005, Vapour cloud explosions, Ch. 5 of CPR 14E, Committee for the Prevention of Disasters, pp. 5.1-5.81.
6. Miller, P., 2004, Towards the modelling of blast loads on structures, Master's thesis, University of Toronto, pp. 4-7.
7. van den Berg, A.C., 1985, The Multi-Energy Method; A framework for vapour cloud explosion blast prediction, J. of Hazardous Materials, Vol. 12, pp. 1-10.



윤용균

세명대학교 소방방재학과 교수

Tel: 043-649-1318

E-mail: yoon63@semyung.ac.kr