화약・발파(대한화약발파공학회지)
제41권 제4호, 2023년 12월, pp. 1~8

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 41, No. 4, 2023, pp. 1-8
https://doi.org/10.22704/ksee.2023.41.4.001

베이루트항에서 발생한 질산암모늄 폭발에 의한 영향 평가

윤용균[1)*]

An Evaluation of the Impact of Ammonium Nitrate Explosion Occurred in Beirut Port

Yong-Kyun Yoon

Abstract On August 4, 2020, 2750 tons of ammonium nitrate stored in a storage warehouse at the Port of Beirut exploded. This explosion is said to be the largest ammonium nitrate explosion ever. By applying the TNT equivalency method, TNT equivalent amount corresponding to the explosion energy of 2750 tons of ammonium nitrate was calculated, and it is found to be 856 tons. Overpressure and impulse were calculated in a range up to 3600 m from the blast using the Kingery-Bulmash explosion parameter calculator tool. As the distance from the explosion center increases, the overpressure and impulse decrease exponentially, but the overpressure decreases more significantly, showing that overpressure is more affected by distance than the impact. As a result of applying the damage criteria to evaluate the effects of overpressure and impulse on the structure, the critical distances at which partial collapse, major damage, and minor damage to the structure occur are found to be approximately 500, 800, and 2200 m from the center of the explosion, respectively. The probit function was applied to evaluate the probability of damage to structures and human body. The points where the probability of collapse, major damage, minor damage, and breakage of window-panes to structures are greater than 50% are found to be approximately 500, 810, 2200, and 3200 m, respectively. For people within 200 m from the center of the explosion, the probability of death due to lung damage is more than 99%, and the 50% probability of eardrum rupture is approximately 300 m. The points with a 100% probability of death due to skull rupture and whole body impact due to whole body displacement are evaluated to be 300 and 100 m, respectively.

Key words Ammonium nitrate, Beirut port, TNT equivalency method, Overpressure, Impulse, Probit function, Damage probability

초 록 2020년 8월 4일에 베이루트항 저장 창고에 저장되었던 2750 ton의 질산암모늄이 폭발하였다. 이 폭발은 지금까지의 질산암모늄 폭발 중 가장 규모가 큰 것으로 알려졌다. TNT 등가법을 적용하여 2750 ton의 질산암모늄의 폭발 에너지에 상응하는 TNT 등가량을 구한 결과 856 ton으로 나타났다. Kingery-Bulmash 폭발 특성 계산기 툴을 활용하여 폭원으로부터 3600 m 까지의 범위에서 과압과 충격량을 산정하였다. 폭원으로부터 멀어짐에 따라 과압과 충격량은 지수적으로 감소하지만 과압이 더 크게 감소하여 과압이 충격량보다 거리에 따른 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 과압과 충격량이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서 구조물의 손상 기준을 적용한 결과 구조물의 부분적 붕괴, 심각한 손상, 가벼운 손상이 발생하는 임계거리는 폭원으로부터 각기 약 500, 800, 2200 m로

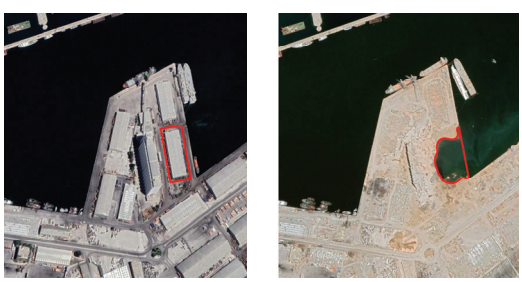
1) 세명대학교 소방방재학과 교수
* 교신저자 yoon63@semyung.ac.kr
접 수 일 : 2023년 12월 5일
심사완료 : 2023년 12월 16일
게재승인 : 2023년 12월 19일

나타났다. 구조물과 인체의 손상 확률을 평가하기 위해서 프로빗 함수를 적용하였다. 구조물의 붕괴, 구조물의 심각한 손상, 구조물의 가벼운 손상, 창유리의 파손 가능성이 50% 이상이 되는 지점은 각기 약 500, 810, 2200, 3200 m가 되는 것으로 나타났다. 폭원으로부터 200 m 이내 지점에 있는 사람의 경우 폐 손상으로 인해 사망할 확률이 99% 이상인 것으로, 고막 파열이 발생할 확률이 50%인 지점은 약 300 m인 것으로 나타났다. 전신 이동에 따른 두개골 파열과 전신 충격에 의해 사망할 확률이 100%인 지점은 각기 300, 100 m인 것으로 평가되었다.

핵심어 질산암모늄, 베이루트항, TNT 등가법, 과압, 충격량, 프로빗 함수, 손상 확률

1. 서론

2020년 8월 4일에 레바논, 베이루트항에 있는 12번째 저장 창고에 저장되어 있던 약 2750 ton의 질산암모늄(Ammonium nitrate, NH_4NO_3)이 폭발하였다. 폭발에 의해 약 200명 이상의 사망자와 6500여명 이상의 부상자, 30만명 이상의 집 없는 난민이 발생하였다. Fig. 1에는 폭발이 일어나기 전과 후의 베이루트항구의 모습이 나타나 있다. Fig. 1(a)에는 질산암모늄이 보관된 12번 저장 창고의 위치가 적색 사각형으로 표시되어 있다. Fig. 1(b)에는 질산암모늄이 저장되어 있던 창고가 사라지고 폭발에 의해 생성된 폭발 화구가 나타나 있다. 그림에는 폭발에 의해 사라져 바닷물에 의해 침수된 지상 부분이 적색선으로 표시되어 있다. 저장 창고 인근 바다까지 연결된 폭발 화구의 폭은 약 140 m 정도인 것으로 평가되었다(Al-Hajj et al., 2021; Yu et al., 2021; Hassel et al., 2021; El Sayed, 2022).



(a) Before(2020. 07. 31) (b) After(2020. 08. 16)

Fig. 1. Satellite photograph for the Port of Beirut explosion (Obtained from Google Earth).

베이루트항에서 발생한 질산암모늄 폭발은 지금까지 발생한 질산암모늄 폭발 중에서 가장 규모가 크고 가장 큰 피해를 발생한 것으로 알려져 있다. 생존한 항구 노동자들의 증언에 따르면 12번 저장 창고에는 질산암모늄뿐만 아니라 수량 미상의 꽃불류가 비닐백에 담겨있었다고 한다. 화재 및 폭발의 원인은 아직 조사 중이지만 저장 창고에 있는 꽃불류가 발화하면서 발생한 화재가 저장 창고 내로 급속히 확산되었고, 이로 인해 화염이 질산암모늄의 화재를 촉발하면서 2번의 폭발이 발생한 것으로 추정된다. CCTV 영상에 따르면 첫 번째 폭발은 18:07분에, 더 큰 규모의 두 번째 폭발은 35초 뒤에 발생한 것으로 나타났다. 두 번째 폭발은 리히터 규모 3.3에 해당하는 지진파를 유발하였고, 베이루트항에서 200 km 이상 이격된 싸이프러스섬에서도 폭발음이 들렸다. 또한, 폭원으로부터 10 km 떨어진 지점에 있는 건물의 유리창이 파손되었다(Al-Hajj et al., 2021; Yu et al., 2021).

본 연구에서는 베이루트항에서 발생한 질산암모늄 폭발이 구조물과 인체에 미치는 영향을 평가하였다. 폭원으로부터 거리에 따른 과압(Overpressure)과 충격량(Impulse)을 계산하기 위해서 TNT 등가법(TNT equivalency method)을 적용하였다. 또한 프로빗 함수(Probit function)를 이용한 확률식(윤용균, 2018; 윤용균과 주은혜, 2021)을 적용하여 거리에 따른 구조물의 파괴 확률과 인체의 손상 확률을 평가하였다.

2. 질산암모늄의 특성

질산암모늄은 농업용 질소 비료와 ANFO 등과 같은 폭약을 구성하는 산화제로 널리 사용되는 위험물이다. 위험물안전관리법 시행령에 따르면 질산암모늄은 제1류 위험물로 산화성 고체에 속한다(법제처,

2023). 산화성 고체는 자체적으로 연소하지는 않지만 보통 산소를 포함한 강력한 산화제이기 때문에 다른 가연물을 연소시킬 수 있는 조연제로 작용한다. 질산암모늄은 상온에서 안정하지만 무기산 등과 같은 불순물에 오염되거나 화재가 발생하거나 밀폐 상태로 저장되면서 온도가 올라가는 경우 폭발할 수 있다(Chaturvedi & Dave, 2013; Babrauskas & Leggett, 2020; Yu et al., 2021)

질산암모늄은 백색의 괴상 결정으로 냄새가 없으며 조해성(Deliquescence)과 흡습성이 강하고 열이나 마찰 또는 충격을 가하면 폭발할 수 있는 특성을 가지고 있다. 1기압 230℃ 근처에서 분해반응이 시작되고, 325℃ 이상에서 폭연한다. 밀폐 상태에서 온도가 260~300℃에 이르면 폭발할 수 있다(Chaturvedi & Dave, 2013)

질산암모늄의 분해반응 시 자극성이 있는 백색 및 암갈색의 연기가 발생하는데 베이루트항 폭발에서도 유사한 색깔의 연기가 대량 발생하여 도시에 확산되었다. 질산암모늄이 구속상태에서 분해반응을 하는 경우 NO_x 가스가 발생한다. 베이루트 시내에 있는 CCTV에 촬영된 베이루트항 폭발 영상을 보면 NO_2로 추정되는 대량의 적오렌지색 연기가 발생했음을 알 수 있다(da Silva, 2020; Al-Hajj et al., 2021).

Table 1에는 폭약의 원료로 사용되는 질산암모늄의 물성이 표시되어 있다.

3. TNT 등가법

베이루트항 저장 창고에 저장되었던 2750 ton의 질산암모늄 중 폭굉 폭발한 질산암모늄의 정확한 양을 알기는 어렵다. 저장 창고 내에서 발생한 화재로 인해 질산암모늄의 일부가 연소를 하다 2회에 걸친 폭발로 이어졌고, 두 번째 폭발이 충격파가 발생한 폭굉 폭발이기 때문에 폭굉된 질산암모늄의 양을 추정하기가 쉽지 않다. Stennett 등(2020)은 여러 목격자가 촬영한 영상을 토대로 폭굉한 질산암모늄의 질량과 등가인 TNT의 질량을 추정하였다. 폭원으로부터 각 카메라까지의 거리를 구글 지도에서 구하고, 카메라에 잡힌 폭풍파의 도착시간을 결정하였다. UN SaferGuard 웹싸이트에 탑재된 Kingery-Bulmash 폭발 특성 계산기 툴(Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator, 2023)를 이용하여 평가된 폭발파 도착시간과 유사한 결과를 보이는 TNT의 질량을 시행착오적으로 추정하였다. 베이루트항에서 폭발한 질산암모늄의 추정 TNT 등가 질량은 637 ton으로 평가되었고, 상한과 하한은 각기 407 ton과 936 ton으로 제시하였다.

본 연구에서는 TNT 등가법을 적용하여 질산암모늄의 TNT 등가 질량을 구하였다. TNT 등가법은 군용 폭약의 표준폭약으로 사용되는 TNT에 대한 수많은 실험 결과를 토대로 제안된 환산식이다. TNT 이외의 폭약, 가연성 기체나 증기 등과 같은 폭발성 물질에 대한 실험 자료가 없거나 부족한 상황에서 과압, 충격량, 충격파 전파속도 등과 같은 폭발 특성을 평가하기 위해서 TNT 등가법을 사용한다.

평가 대상 폭발성 물질이 폭발하는 경우 발생하는

Table 1. Material properties of ammonium nitrate(After Chaturvedi & Dave, 2013)

Material property	Value
Density	1,725 kg/m^3
Color	Colorless
Heat of explosion	1,447.7 kJ/kg
Available oxygen	20%
Estimated flame temperature	1,500℃
Detonation velocity	1,250~4.650 m/s

총 폭발열과 동일한 폭굉열을 방출하는 TNT의 등가 질량을 구하는 식은 다음과 같다(Karlos and Solomos, 2013).

$$M_{TNT} = \frac{\Delta H_C}{\Delta H_{TNT}} \times M_E \quad (1)$$

여기서, M_{TNT} : TNT 등가 질량(kg), ΔH_C : 평가 대상 폭발성 물질의 폭발열(kJ/kg), ΔH_{TNT} : TNT의 폭굉열(kJ/kg), M_E : 평가 대상 폭발성 물질의 질량(kg)이다.

4. 질산암모늄 폭발이 구조물과 인체에 미치는 영향

4.1 폭원으로부터 거리에 따른 과압 및 충격량 평가

저장된 질산암모늄 모두가 폭굉 폭발한 것은 아닌 것으로 알려져 있으나 실제 어느 정도의 양이 폭발한 것인지는 모르기 때문에 본 연구에서는 2750 ton의 질산암모늄이 모두 폭굉 폭발한 것으로 가정하였다.

질산암모늄의 폭발열은 Table 1에 제시된 1,447.7 kJ/kg로, TNT의 폭굉열은 4,650 kJ/kg으로 가정하였다(윤용균, 2018). 식 (1)을 이용하여 구한 2,750 ton의 질산암모늄에 대한 TNT 등가 질량은 약 856 ton으로 나타났다.

TNT 등가법으로 구한 TNT 등가량이 폭발하는 경우 발생하는 과압 및 충격량을 Kingery-Bulmash 폭발 특성 계산기를 이용하여 계산하였다. Kingery-Bulmash가 제안한 식은 삼승근 환산거리가 40 이하인 경우에 적용되기 때문에 폭원으로부터의 거리를 3600 m로 제한하였다. Fig. 2에는 거리에 따른 과압과 충격량이 표시되어 있다. 그래프를 보면 폭원으로부터 멀어짐에 따라 과압과 충격량이 유사한 형태로 감소되지만 과압의 경우가 충격량보다 거리에 따른 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

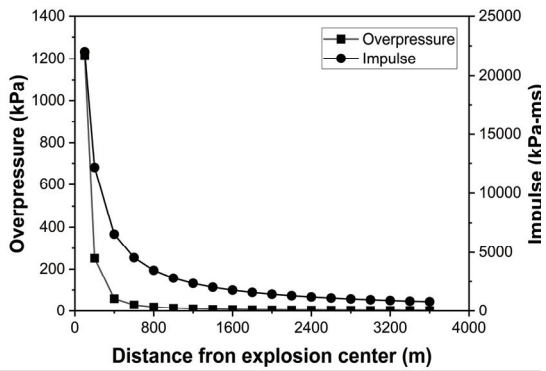


Fig. 2. Variations of overpressure and impulse as a function of distance.

본 연구에서 얻어진 TNT 등가량이 폭발하는 경우 실제 폭발 결과와 얼마나 근사한지를 평가하기 위해서 Stennett 등(2020)이 제안한 결과와 비교하였다. Table 2에는 폭발 순간을 촬영한 6명의 목격자 위치(위도와 경도로 표시됨)와 폭원 중심으로부터 각 목격자까지의 추산된 거리 및 폭발파 도착시간이 표시되어 있다. Table 3에는 비교를 위해서 각 목격자의 위치에서 Kingery-Bulmash 폭발 특성 계산기를 이용하여 구한 폭발파 도착시간과 폭발파의 속도가 나타나 있다. 모든 위치에서 Kingery-Bulmash식에 의해 구한 폭발파 도착시간이 실제 측정된 폭발파 도착시간에 비해 약간 더 짧은 것으로 나타난다. 이러한 결과로부터 TNT 등가법으로 구한 TNT 등가량이 실제 폭발량보다 약간 많다고 추정할 수 있지만 그 차가 크지 않

Table 2. Observer's position, distance to blast and arrival time of blast wave(After Stennett et al., 2020)

No.	Location of observer		Distance from explosion center (m)	Arrival time of blast wave (s)
	Latitude (°)	Longitude (°)		
1	33.903115	35.523928	510	0.917
2	33.896351	35.518557	566	1.067
3	33.896182	35.522357	655	1.303
4	33.897752	35.507118	1,168	2.719
5	33.889115	35.516197	1,374	3,294
6	33.896292	35.540627	1,996	5.077

Table 3. Arrival time and velocity of blast wave estimated by Kingery-Bulmash formulae at each observer's position

No.	Arrival time (s)	Velocity (m/s)
1	0.873	391
2	1.019	384
3	1.254	375
4	2.659	356
5	3.236	353
6	5.016	348

기 때문에 본 연구에서 얻어진 TNT 등가량은 적절하다고 판단할 수 있다.

4.2 질산암모늄 폭발이 구조물에 미치는 영향

여러 지점에 존재하는 구조물의 손상 정도를 평가하고자 각 지점에서 구한 과압과 충격량을 과압-충격량 도표에 점으로 표시하였다(Fig. 3 참조). 그림에는 손상 기준선이 표시되어 있다. 손상 기준선 중 구조물의 가벼운 손상(Minor damage)은 조인트와 파티션이 뒤틀리는 손상, 구조물의 심각한 손상(Major damage)은 거더가 파괴되는 손상, 구조물의 부분적 붕괴(Partial demolition)는 구조물 벽체의 50~75%가 파괴되는 손상을 뜻한다. 그림에서 보듯이 폭원으로부터 250 m 이내 지점에 작용하는 과압과 충격량은 도표의 표시 영역을 넘어서기 때문에 250 m 이내 지점에 있는 구조물에는 심각한 붕괴가 발생했을 것으로 예상된다. 구조물의 부분적 붕괴, 심각한 손상, 가벼운 손상이 발생하는 임계거리는 폭원으로부터 각기 약 500, 800, 2,200 m로 나타난다.

Fig. 4에는 구조물의 손상 정도가 발생할 확률이 표시되어 있다. 손상 확률을 계산하기 위해서 구조물의 손상 정도를 나타내는 프로빗 함수를 이용한 확률식을 사용하였다(윤용균, 2018). 그림에서 Breakage of window-panes는 구옥에 설치되어 있는 창유리의 파손을 나타낸다. Minor damage는 구조물에 발생하는 가벼운 손상으로 유리창 파손, 문틀과 창틀의 변형, 지붕 손상을 의미한다. Major damage는 구조물의 심각한 손상으로 가벼운 손상을 포함하여 벽체에 균열 발생 및 일부 벽체의 붕괴가 발생함을 말한다. Collapse는 구조물의 붕괴로 손상이 광범위하게 발생하여 구조물이 붕괴되는 경우를 뜻한다. 확률이 50% 이상인 경우 해당 손상이 발생할 가능성이 높다고 가정할 수 있다. 구조물의 붕괴, 구조물의 심각한 손상, 구조물의 가벼운 손상, 창유리의 파손 가능성이 50% 이상이 되

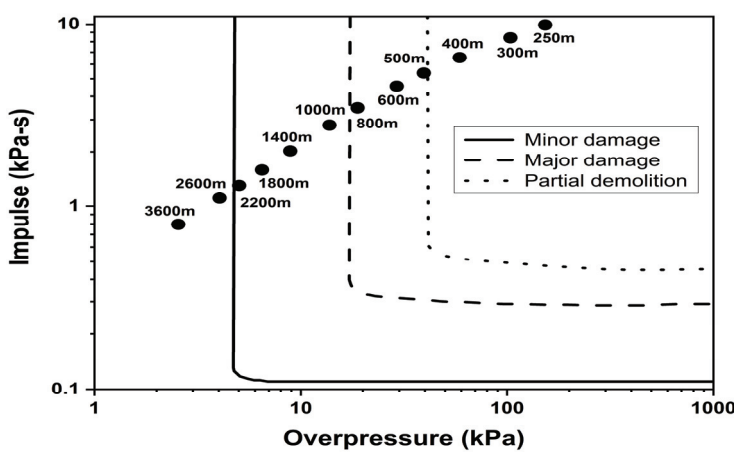


Fig. 3. Overpressure-impulse diagram.

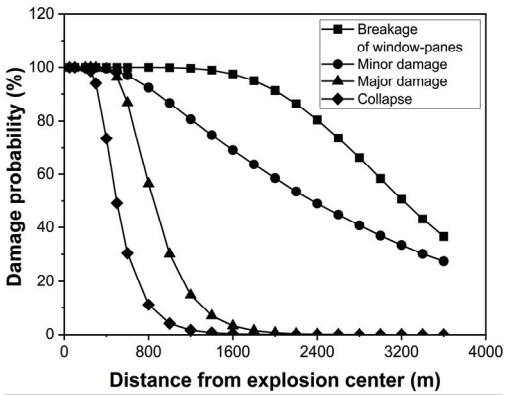


Fig. 4. Variation of damage probability of structures estimated with distance from explosion center.

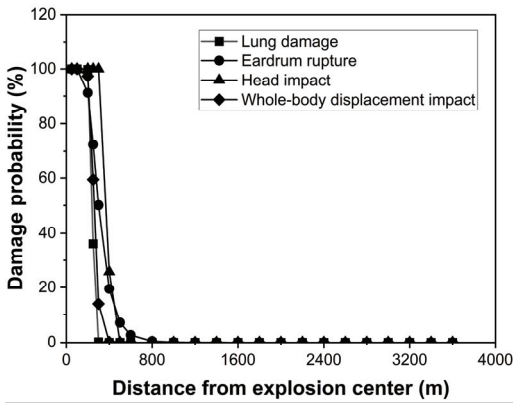


Fig. 5. Variation of damage probability of human body estimated with distance from explosion center.

는 지점은 각기 약 500, 810, 2200, 3200 m가 되는 것으로 나타났다. 폭원으로부터 3062 m 떨어진 Cavalier 호텔 창유리도 파손되었다는 점을 고려하면(Yu et al., 2021). 본 연구에서 얻어진 결과가 실제 현상과 어느 정도는 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

4.3 질산암모늄 폭발이 인체에 미치는 영향

폭발이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해서 폐 손상, 고막 파열 및 전신 이동(Whole-body displacement)에 따른 두개골 파열 및 전신 충격 발생을 확률적으로 계산할 수 있는 프로빗 함수를 적용하였다(윤용균과 주은혜, 2021). 폐 손상 확률을 평가할 때 폭발파의 진행 방향과 주변 구조물의 존재 및 인체의 자세에 따라 손상 확률이 달라진다. 본 연구에서는 인체 주변에 폭발파를 반사할 수 있는 구조물이 있어 반사 과압이 인체에 작용한다고 가정하였다. 또한 반사 과압이 작용하는 사람의 체중을 75 kg으로 가정하였다.

Fig. 5에는 거리에 따른 인체 부위에 따른 손상 확률이 나타나 있는데, 폐, 머리, 전신 손상 확률의 경우 사망 확률을 나타낸다. 폭원으로부터 근접한 지점을

Table 4. Probability of lung damage, eardrum rupture, head impact and whole-body displacement impact with distance from explosion center

Distance (m)	Damage probability (%)			
	Lung damage	Eardrum rupture	Whole-body displacement	
			Head impact	Whole-body impact
50	100	100	100	100
100	100	100	100	100
200	99.8	91.2	100	97.3
250	36.1	72.4	100	59.4
300	0.203	50.1	100	13.9
400	-	19.5	25.8	0.14
500	-	7.1	-	-
600	-	2.7	-	-
800	-	0.49	-	-
1000	-	0.13	-	-

벗어나면 손상 확률이 매우 낮기 때문에 그림을 통해 구별이 어렵다는 점을 고려하여 Table 4에 거리에 따른 인체의 각 부위의 손상 확률을 표시하였다. 표에서는 손상 확률이 0.1% 이상만 표시를 하였다. 그림과 표에서 보듯이 폭원으로부터 200 m 이내 지점에 있는 사람의 경우 폭발파로 인해 심각한 폐 손상을 받을 가능성이 있고, 사망할 확률이 99% 이상인 것으로 나타난다. 고막 파열이 발생할 확률이 50%인 지점은 약 300 m인 것으로 나타났다. 전신 이동에 따라 다른 물체와 부딪쳐 두개골 파열과 전신 충격에 의해 사망할 확률이 100%인 지점은 각기 300, 100 m인 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 2020년 8월 4일에 베이루트항에서 발생한 2750 ton의 질산암모늄 폭발이 구조물과 인체에 미치는 영향을 평가하였다. TNT 등가법을 적용하여 TNT 등가량을 계산하였으며, 이를 이용하여 폭원으로부터 3600 m 까지의 범위에서 과압과 충격량을 산정하였다. 또한 구조물과 인체의 손상 확률을 계산하기 위해서 프로빗 함수를 적용하였다. 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

1) TNT 등가법을 적용하여 2750 ton의 질산암모늄과 등가의 폭발 에너지를 발생하는 TNT 등가량을 구한 결과 856 ton으로 평가되었다.
2) 폭원으로부터 거리에 따른 과압과 충격량을 계산한 결과 폭원으로부터 멀어짐에 따라 과압과 충격량은 지수적으로 감소하지만 과압이 더 크게 감소하여 과압이 충격량보다 거리에 따른 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다.
3) 과압과 충격량이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서 구조물의 손상 기준을 적용한 결과 구조물의 부분적 붕괴, 심각한 손상, 가벼운 손상이 발생하는 임계거리는 폭원으로부터 각기 약 500, 800, 2200 m로 나타났다.
4) 구조물의 손상 확률을 평가한 결과 구조물의 붕괴, 구조물의 심각한 손상, 구조물의 가벼운 손상, 창유리의 파손 가능성이 50% 이상이 되는 지점은 각기 약 500, 810, 2200, 3200 m가 되는 것으로 나타났다.
5) 폭발파가 인체의 각 부위에 유발하는 손상 확률을 계산한 결과 폭원으로부터 200 m 이내 지점에 있는 사람의 경우 폐 손상으로 인해 사망할 확률이 99% 이상인 것으로 나타났다. 또한 고막 파열이 발생할 확률이 50%인 지점은 약 300 m인 것으로 나타났다. 전신 이동에 따른 두개골 파열과 전신 충격에 의해 사망할 확률이 100%인 지점은 각기 300, 100 m인 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 TNT 등가법을 적용하여 폭원으로부터 거리에 따른 과압과 충격량을 평가하고, 이를 이용하여 구조물과 인체 손상 확률을 계산하였으나 실제 폭발 현장에서 나타난 손상 현상들과 비교를 하지 못하였다. 차후의 연구를 통해 폭약이나 증기운이 폭발하는 경우 발생한 구조물의 손상 상태로부터 추정된 과압의 크기를 제시한 자료를 입수하여 TNT 등가법의 결과와 비교함으로써 TNT 등가법의 적용성을 제고할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2023학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비를 지원해준 학교에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 법제처, 2023, 위험물안전관리법 시행령 별표 1.
2. 윤용균, 2018, 폭발성 물질의 폭발에 따른 폭발압력 평가, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 36, No. 4, pp. 26-34.
3. 윤용균, 주은혜, 2021, 증기운 폭발이 인체에 미치는 영향에 대한 확률론적 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 31, No. 1, pp. 52-65.
4. Al-Hajj, S., H.R. Dhaini, S. Mondello, H. Kaafarani, F. Kobeissy, and R.G. DePalma, 2021, Beirut Ammonium Nitrate Blast: Analysis, Review, and Recommendations, Front. Public Health, Vol. 9, pp. 1-11.
5. Babrauskas, V. and D. Leggett, 2020, Thermal decomposition of ammonium nitrate, Fire and Materials, Vol. 44, pp. 250-268.
6. Chaturvedi, S. and P.N. Daave, 2013, Review on

Thermal Decomposition of Ammonium Nitrate, J. of Energetic Materials, Vol. 31, pp. 1-26.
7. da Silva, G., 2020, What is Ammonium Nitrate, the Chemical That Exploded in Beirut?, THE CONVERSATION.
8. El Sayed, M.J., 2022, Beirut Ammonium Nitrate Explosion: A Man-Made Disaster in Times of the COVID-19 Pandemic, Disaster Medicine and Public Heath Preparedness, Vol. 16, pp. 1203-1207.
9. Hassel, J., M. Hagenlocher and J. O'Connor, Technical Report: Beirut Explosion, Interconnected Disaster Risks 2020/2021, United Nations University, 25p.
10. Karlos, V. and G. Solomos, 2013, Calculation of blast loads for application to structural components, EU. pp. 1-23.
11. Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator, UN, https://unsaferguard.org/un-saferguard/kingery-bulmash.
12. Yu, G., Y. Wang, L. Zheng, J. Huang, J. Li, L. Gong, R. Chen, W. Li, J. Huang, and Y-S. Duh, 2021, Comprehensive study on the catastrophic explosion of ammonium nitrate stored in the warehouse of Beirut port, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 152, pp. 201-219.

윤 용 균
세명대학교 소방방재학과 교수

Tel: 043)649-1318
E-mail: yoon63@semyung.ac.kr