

# 지상형 탄약고 폭발 시 안전거리 위반율에 따른 위험노출대상의 피해 수준 분석 연구

함태윤\* · 이재준\*\*†

## Expected Damage Analysis of Risk Exposure Object by Violation Rate of Safety Distance in Explosion of Ground Type Magazine

Tae Yuun Ham\* · Jae Joon Lee\*\*†

### †Corresponding Author

Jae Joon Lee

Tel : +82-31-290-7534

E-mail : lunevocal@skku.edu

Received : June 10, 2022

Revised : July 13, 2022

Accepted : August 4, 2022

**Abstract** : Of the Korean military's 3,959 ammunition depots, 1,007 - more than 25% - violate safety requirements for distance and equipment. There is a risk of explosion in old depots that are vulnerable to various interior and exterior accidents. This paper examines 10 scenarios, with varying values for ammunition amount and safety distance. The study calculated the overpressure that can be applied to risk-exposure objects, based on the safety distance; expected damage was predicted using constructed spatial information from 3D explosion simulations. The simulations confirmed that explosion overpressure increased the most when the safety distance violation rate increased from 80% to 90%. It also confirmed that secondary damage such as fire and explosion can cause casualties and property damage when the violation rate is 60% or higher. The results show that building collapse becomes a risk with a violation rate of 70% or higher. We conclude that taking ammunition depot safety distance violation into account when planning military facilities and their land utilization could better protect life and property.

**Key Words** : magazine, ExDAM, explosion, damage by overpressure, safety distance

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

## 1. 서론

도시의 성장과 팽창이 전국적인 군사시설 보호구역 규제 해제와 맞물려 서로 간의 거리가 축소되고 있다. 따라서 잠재적인 위험에 노출되는 대상이 증가하여 탄약저장시설인 탄약고 안전거리 위반에 따른 안전성 문제가 대두되고 있다. 2021년 국방부에서 제출한 탄약고 안전거리 위반사항 관련 자료(조명희 의원실, 2021)에 따르면 우리 군에서 운용 중인 탄약고 3,959동 중 부대 내 안전거리 위반 탄약고는 612동이며, 외부민간 안전거리 위반 탄약고는 395동으로 총 1,007동의 탄약고가 안전거리를 위반하고 있다. 해당 위반 건수는 우리 군이 운용하는 전체 탄약고의 25%를 상회한다. 이

는 탄약고 관련 사고 발생 시 부대 내 인員뿐만 아니라 부대 외부에 거주하는 민간인의 생명과 재산에도 치명적인 피해를 안길 수 있는 위험한 사고가 현재 잠재적으로 존재하고 있음을 뜻한다. 국방력 향상은 군에 적용되는 탄약류의 종류를 다양화시키며, 위력 또한 증가시킨다<sup>1)</sup>. 국방력 향상을 위해 많은 국가 예산을 국방비에 투입하고 있는 현재 탄약고의 안전성을 확보하는 것 또한 중요하다. 그러나 우리 군이 운용하는 탄약고 중 설치 후 60년 이상 경과된 재래식구조 지상형 탄약고의 경우 노후화 시설로 화재설비 및 건축 안전설비가 부족하거나, 적용되어 있지 않아 안전성이 보장된 시설로 판단하기 어렵다<sup>2)</sup>. 이에 대한 대책으로 안전거리를 준수하는 최소한의 노력이 필요하며 최적의 안전

\*성균관대학교 방재안전공학과 석사과정 (Interdisciplinary Program in Crisis Disaster and Risk Management, Sungkyunkwan University)

\*\*성균관대학교 방재안전공학과 박사후연구원 (Interdisciplinary Program in Crisis Disaster and Risk Management, Sungkyunkwan University)

거리를 찾고자 지속적인 연구가 진행되어 왔다. Park<sup>1)</sup>은 이글루형 탄약고 폭발 시 발생하는 폭풍압에 의한 인체 영향을 분석하여 피해를 최소화하기 위해 안전거리 적용에 대해 적합성을 판단하고자 정량적 평가방법을 사용하였으며, Choi<sup>3)</sup>는 폭발로 인해 발생하는 폭풍파에 대해 탄약고 형태에 따른 폭약량과 안전거리를 기준으로 폭풍파를 산정하여 안전성이 우수한 탄약고의 형태에 관한 연구를 진행하였다. Park<sup>4)</sup>의 경우 우발적으로 폭발할 경우 폭풍압, 열, 파편 등으로 주변에 존재하는 시설과 인원에게 잠재적 위험을 야기시키는 탄약고의 안정성을 높이기 위해 탄약고의 효율적인 지하화 방안에 관해 연구를 진행하였다. 앞서 언급한 선행연구의 경우 최근 설치되어 비교적 안전성이 보장된 현대식 탄약고에 대해 형태에 따른 안전성 관련 연구들이 진행됐지만, 노후화로 인해 안전성이 보장되지 않은 재래식구조 지상형 탄약고에 관한 연구와 안전거리 위반에 따른 피해 수준 연구는 부족한 상황이다.

철근콘크리트 재질의 탄약고에 일정량 흙을 덮어 폭발 및 화재에 대한 보호 성능이 뛰어난 이글루형 탄약고와 지하에 탄약고를 설치하여 폭발로 인한 폭풍압과 비산하는 파편 등을 지하에 가두는 특징을 가지는 지하형 탄약고와 같이 폭발피해에 대한 안전성을 가지는 현대식 탄약고와 달리 블록 또는 벽돌을 사용한 외벽과 목재와 슬레이트를 사용한 지붕 형태의 재래식구조

지상형 탄약고는 안전성 측면에서 현대식 탄약고와 명백한 차이를 가진다. 따라서 본 연구는 현대식 탄약고에 비해 노후화가 진행되어 사고에 취약한 재래식구조 지상형 탄약고를 대상으로 지진으로 인한 탄약고 붕괴, 폭염으로 인한 자연발화, 추돌 사고 등 내외부적인 요인에 의해 폭발이 발생한 경우 안전거리 위반율에 따른 부대 외의 피해 수준을 확인하고자 하였다. 탄약고에 저장하고 있는 폭약량과 거리에 따른 위반율을 결정하여 시나리오를 작성한 후 3D 폭발 시뮬레이션을 수행하여 폭발압력을 분석하였다. 이를 통해 안전거리를 위반할 경우 탄약고 주변에 존재하는 위험노출대상에 가해질 수 있는 피해를 사전에 예측하여, 사고에 대비한 대책을 세울 수 있도록 하고자 함에 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구 흐름

본 연구는 Fig. 1(a)와 같은 순서로 진행되며 크게 3D 폭발 시뮬레이션 구동과 압력에 따른 피해 수준 산정 두 단계의 과정을 거친다. 첫 번째 단계인 3D 폭발 시뮬레이션 수행은 재래식구조 지상형 탄약고를 구현하여 폭약량, 안전거리, 안전거리 위반율 등을 변수로 적용한 후 안전거리 위반율을 10%씩 증가시켜 탄약고와 위험노출대상과의 거리를 줄여가며 탄약량 별 안전

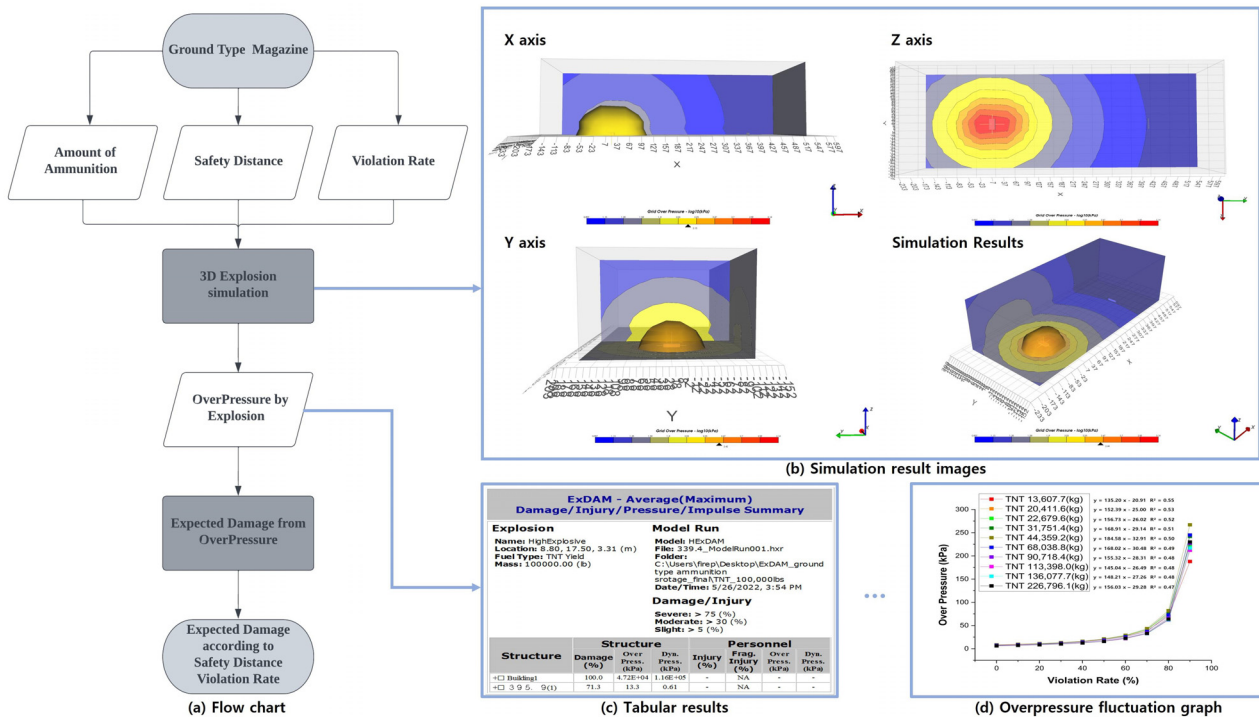


Fig. 1. Research flow chart.

거리 위반율에 따른 폭발압력을 도출한다. 여기서 안전거리 위반율이란 균용총포·화약류 안전관리 가이드북에서 제시한 폭약량에 따른 안전거리를 기준으로 위반한 거리를 백분율로 변환한 값을 말한다<sup>5)</sup>. 시뮬레이션 구동 시 차폐 효과, 건축재료, 폭발물과 위험노출대상의 위치 정보 등이 변수로 적용되어 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c) 같은 결과가 도출된다. Fig. 1(b)를 통해서 폭발에 의한 거리별 영향을 확인할 수 있으며 Fig. 1(c)를 통해서 위험노출대상에게 가해진 최대 압력값을 확인할 수 있다. 도출된 위반율에 따른 압력값을 통해 Fig. 1(d)와 같은 압력상승률 또한 확인할 수 있다. 시뮬레이션 구동을 통해 도출된 압력값을 두 번째 단계인 압력에 따른 예상 피해 수준에 적용하여 안전거리 위반율에 따른 위험노출대상의 피해 수준을 산정하였다.

## 2.2 3D 폭발 시뮬레이션

### 2.2.1 압력 산출 이론

본 연구에서 사용된 3D 폭발 시뮬레이션 BREEZE ExDAM은 폭발로 인한 구조물의 손상 및 폭발에 의한 압력 예측에 주로 사용되며 폭심으로부터의 거리, 차폐 효과, 구조물의 재질 등의 요소가 변수로 적용되어 폭발 영향 노출 대상에게 가해지는 최대 압력 및 손상 정도 측정이 진행된다. 프로그램을 통한 압력산정은 경험식으로 도출된 압력 곡선 그래프 Fig. 2와 같은 방식으로 진행된다.

압력은 지면에서 일정 높이에서의 과압과 동적 압력은 점을 묶은 두 곡선 사이의 붕괴 보간에 의해 결정되며 압력 곡선 그래프 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 압력 곡선  $P_i$ 와  $P_{i+1}$ 은 압력값이 필요한 지점  $P(x)$ 를 연결한다<sup>6)</sup>.

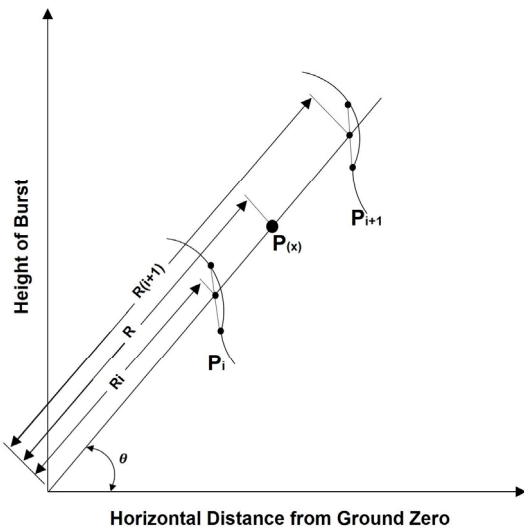


Fig. 2. Overpressure curve.

$R_i$ 와  $R_{(i+1)}$ 은 바닥으로부터 각 압력 곡선 위치까지의 거리를 나타내며 범위  $R$ 은 바닥에서 지점  $P(x)$ 까지의 경사를 나타낸다. 한 지점의 압력은 보간 방정식 식(1)에 의해 주어진다.

$$P = e^{C1} \tag{1}$$

$C1$ 은 식(2)와 식(3)과 같이 적용된다.

$$C1 = \ln(P_i) - C2 \ln(R_i/R) \tag{2}$$

$$C2 = \ln(P_{i+1}/P) / \ln(R_{i+1}/R_i) \tag{3}$$

한 점이 압력 곡선을 벗어나면 프로그램이 마지막 두 압력 곡선 계수  $C1$ 과  $C2$ 를 사용하여 압력이 산정된다<sup>7)</sup>.

### 2.2.2 공간정보 구축

우리 군에서 운용 중인 탄약고의 형태는 재래식구조 지상형 탄약고, 이글루형 탄약고, 지하형 탄약고 등이 있으며, 신축 후 많은 기간이 경과된 재래식구조 지상형 탄약고의 경우 운용하는 부대 특성에 따라 사용하는 건축재료 및 형태가 상이한 비표준 형태의 특성을 가지고 있다<sup>7)</sup>. 3D 폭발 시뮬레이션 대상인 재래식구조 지상형 탄약고에 대한 공간정보를 현실적으로 구축하기 위해 탄약고 안전성에 대한 선행연구에 사용된 탄약고의 형태와 면적<sup>8-10)</sup>과 균용총포·화약류 안전관리 가이드북<sup>5)</sup>을 참고하여 Fig. 3과 같이 실제 적용 가능한 형태로 구현하였다. 구현된 탄약고는 철근콘크리트 재질의 외벽 두께 0.15 m, 폭 15 m, 길이 35 m, 높이 7.5 m의 구조이며 출입문의 경우 가로세로 2.4384 m의 철재 형태이다. 지상형 탄약고와 달리 안전거리 위반율에 따라 위치정보가 달라지는 위험노출대상에 대해

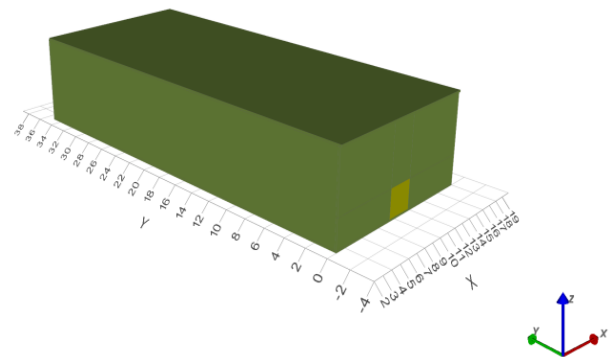


Fig. 3. Ground type magazine.

지는 폭발영향분석(Explosion Impact Analysis)을 위해 가시설 형태의 위험노출대상을 구축하였다. 폭발에 의한 최대 압력은 영향을 받는 대상의 형태와 면적, 재질과는 무관하므로 폭 15 m, 길이 1 m, 높이 7.5 m의 건물 벽 형태의 가시설을 구축하였다. 또한, 안전거리 위반율에 따라 위험노출대상에 가해지는 최대 압력을 측정하기 위해 탄약고와 가시설 사이에는 측정 대상 외 장애물이 없는 것으로 가정하였다.

### 2.3 시나리오 구성

#### 2.3.1 폭약량과 안전거리 기준 선정

우리 군은 운용하는 탄약고에 대한 잠재적인 사고로부터 인명과 재산피해를 감소시키기 위해 미국방부의 DDESB 6055.9STD<sup>11)</sup>를 기준으로 탄약 및 폭발물 안전관리 기준을 제시하고 있으며 탄약고 안전거리를 적용하고 있다. 탄약고 안전거리는 폭약류 운용 및 관리의 적정성을 위해 위험노출대상을 기준으로 산정된다<sup>10)</sup>. 위험노출대상에 따른 안전거리는 폭발물 저장 및 제조 시설과 주거시설 간 확보해야 하는 거리인 주거시설거리(IBC : Inhabited Building Distance), 이동하는 차량 및 공공도로와 폭발물 저장 및 제조시설 간 확보해야 하는 거리인 공로거리(PTRD : Public Traffic Route Distance), 폭발물 저장 및 제조시설과 비 폭발물 관련 시설 간에 필요한 거리인 내부격리거리(ILD : Intraline Distance), 연쇄 폭발을 방지하기 위해 탄약고와 탄약고 사이에 필요한 이격거리인 탄약고간거리(IMD : Inter Magazine Distance) 등 크게 4가지로 분류되며 각각의 안전거리에 관한 특징은 Table 1과 같다<sup>12-14)</sup>.

본 연구는 도시화장에 따른 민간인 거주지역에서 발생 가능한 탄약고의 잠재적 위험 및 피해를 측정하는 것을 연구 목적으로 설정하였으므로, 안전거리 시나리오의 주거시설거리인 IBD를 기준으로 구성하였다. IBD의 경우 다른 안전거리와 비교하였을 때 가장 긴 안전거리를 가지며 지상형탄약고의 경우 전면, 측면, 후면에 적용되는 안전거리가 동일하여 Table 2와 같이 폭약량에 따른 10개의 안전거리 시나리오를 구성하였다. 구성

Table 1. Properties of each type of safety distance

Type	Properties
IBD	Distance maintained between an explosion site and an inhabited building
PTRD	Distance to be maintained an explosion site and public street, road, highway, railroad
ILD	Distance maintained from an explosion site and a non-explosion site
IMD	Distance required between two magazine location

Table 2. Scenarios about amount of ammunition and safety distance

Amount of ammunition		Safety distance	
lbs	kg	ft	m
30,000	13,607.7	1,250	381.0
45,000	20,411.6	1,423	433.7
50,000	22,679.6	1,474	449.2
70,000	31,751.4	1,649	502.6
100,000	44,359.2	1,857	566.0
150,000	68,038.8	2,346	715.0
200,000	90,718.4	2,770	844.2
250,000	113,398.0	3,151	960.4
300,000	136,077.7	3,347	1020.1
500,000	226,796.1	3,969	1209.7

된 시나리오에서의 폭약량은 13,607.7 kg~226,796.1 kg이며 안전거리는 381.0 m~1,209.7 m이다.

시나리오에 적용될 폭발물은 일반적으로 탄약류의 위력을 나타낼 때 사용되는 1.1급 위험급수의 고폭화약(High Explosives)인 TNT로 선정함으로써 TNT 환산을 통해 탄약고에 보관 중인 다른 폭발물과의 위력 비교에 쉽게 적용할 수 있도록 하였다<sup>15)</sup>.

### 2.4 폭발압력에 의한 피해 수준 분석

폭발은 발생 시 에너지를 방출하며 폭풍파, 비산물, 복사열, 소음을 수반하며<sup>16)</sup>, 폭심으로부터의 거리가 가까울수록 위험노출대상에 가해지는 압력이 증가한다. 압력이 증가함에 따라 피해 수준도 증가한다. 동일 대상에 대해 임의의 압력이 가해질 시 이에 따른 피해 기준을 도출하기 위해 압력에 따른 피해 수준을 측정한 논문 및 선행연구를 통해 Table 3~13과 같이 분석하였다<sup>6,17-27)</sup>.

적용대상의 종류는 크게 건물, 구조물, 차량 3가지이며, 세부적인 요인으로 건축재료, 외벽, 구조, 용도, 재질 등을 적용하여 총 11가지 대상으로 분류하였다. 분류된 대상은 창문, 오일탱크, 목조 구조물, 금속 판넬, 차량, 가정집, 건물의 구조, 다중이용시설로 사용되는 빌딩, 벽, 철근 구조물, 철근콘크리트 건물이다.

Table 3~13에 적용된 선행연구는 다양한 압력과 피해 수준을 제시하고 있다. 따라서, Table 14 압력에 따른 피해 기준을 마련하기 위해 각 선행연구의 압력과 기대되는 피해의 정의를 분석하였다. 분석 절차는 다음과 같은 순서로 진행되었다.

1) 11개의 대상에 대하여 압력에 의한 피해를 조사하였다.

2) 각 대상에 대하여 피해 수준에 따른 압력값을 비교하였다.

3) 압력에 따른 피해 수준의 정의를 분석하여 파괴, 폭발, 붕괴와 같은 피해를 줄 수 있는 압력을 결정하였다.

압력에 따른 피해 기준 도출 과정을 통해 Table 14와 같이 9가지 대상에 대하여 압력에 따른 피해 기준을 매트릭스 형태로 도출할 수 있었다. Table 14 피해 기준은 Table 16 위반율에 따른 피해 수준 결과 도출에 활용되었다. 더불어 본 목차의 선행연구 결과는 위험 노출대상의 형태, 유형에 따른 안전거리를 제시하는데 좋은 근거가 될 것이다.

**Table 3.** The effect of overpressure on window

Window		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
0.21	0.03	Occasional breaking and partial damage of window made of glass [6][17][18][19]
0.28	0.04	Glass breakage and failure [6][17][20]
0.69	0.10	Breakage of small window under strain [6][17][18]
1.03	0.15	Typical pressure for glass breakage [6][17][18][19][20][21][22][23][25]
2.07	0.30	10% of glass window is broken [6][17][18][19]
3.47	0.50	Large and small windows usually shatter (occasional damage to window frames) [6][17][18][20][25]
7.00	1.02	Window glass shatters [26][27]

**Table 4.** The effect of overpressure on structural

Structural		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
2.76	0.40	Limited minor structural damage [17][18][20] Small damage limitation of building [5][19]
14.50	2.10	Displacement of cylindrical storage tank, failure of pipes [20]
15.80	2.30	Lower limit of serious structural damage [6][17][19]
35.00	5.07	Displacement of pipe bridge, breakage of piping [21]

**Table 5.** The effect of overpressure on wall

Wall		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
12.41	1.79	Failure of concrete block walls [22][23]
13.79	2.00	Weak concrete wall fracture [19] Non-reinforced concrete or cinder block walls shattered [17][20][22][25]
15.00	2.17	Collapse of unreinforced concrete or cinder block walls [21]

**Table 6.** The effect of overpressure on oil tank

Oil tank		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
13.80	2.00	Rupture of oil storage tanks [18]
20.70	3.00	Rupture of oil storage tanks [17]
27.58	4.00	Oil storage tank explosion [6][19]

**Table 7.** The effect of overpressure on building

Building		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
3.45	0.50	Minor damage to some buildings [22][23][24]
17.20	2.49	Cladding of light industrial buildings ruptures [18]
27.60	4.00	Cladding of light industrial buildings ruptures [17]
34.50	5.00	Most buildings collapse [26][27]
70.00	10.15	Total destruction of buildings [6][19][20][21][22][23][24]

**Table 8.** The effect of overpressure on house

House		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
4.83	0.70	Minor damage to house structures [6][17][18][19][20]
6.90	1.00	Partial demolition of houses [6][17][18][20][25]
13.80	2.00	Partial collapse of walls and roofs of houses [17][20][25] 50% destruction of brickwork of houses [18] Moderate damage to houses occurs [26]
14.00	2.03	Moderate damage to houses [27]
17.24	2.50	50% destruction of brickwork of houses [17][20]
21.00	3.05	Residential structures collapse [26][27]
34.47	5.00	Nearly complete destruction of houses [17][18][20][25]
41.37	6.00	House whole breakage [6][19]

**Table 9.** The effect of overpressure on metal panel

Metal panel		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
6.89	1.00	Corrugated metal panels fail and buckle [20]
7.58	1.10	Panels of Sheet metal buckled [22][23][24]

**Table 10.** The effect of overpressure on vehicle

Vehicle		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
48.26	7.00	Loaded train cars overturned [6][17][20]
62.06	9.00	Loaded train box cars demolished [17][20] Whole destruction of freight car [6]

**Table 11.** The effect of overpressure on wood structure

Wood structure		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
20.70	3.00	Wooden utility poles snap [18]
34.47	5.00	Collapse of wood framed buildings [6][20][22][23][24]
34.50	5.00	Wooden utility poles snap [17]

**Table 12.** The effect of overpressure on steel frame building

Steel frame building		
Overpressure		Expected damage
kPa	psig	
8.96	1.30	Building steel frame flexure [6][19]
9.00	1.30	Steel frame of clad building slightly distorted [17]
20.00	2.90	Collapse of industrial steel frame structure [21]
20.68	3.00	Steel frame buildings distorted and pulled away from foundation [6][19][20]
27.58	4.00	Serious Damage to Steel Framed Buildings [22][23][24]

**Table 13.** The Effect of Overpressure on Reinforced Concrete Structures

Reinforced Concrete Structures		
Overpressure		Expected Damage
kPa	psig	
41.37	6.00	Severe damage to reinforced concrete structures [23][24]
69.00	10.10	Reinforced concrete buildings are severely damaged or demolished [26][27]

**Table 15.** Overpressure by safety distance violation rate

Amount of ammunition		Safety distance violation rate									
lbs	kg	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
30,000	13,607.7	8.04	9.29	10.70	12.50	15.40	20.00	27.00	38.60	69.80	188.00
45,000	20,411.6	8.38	9.44	10.90	12.70	15.70	20.60	27.80	40.60	74.60	215.00
50,000	22,679.6	8.39	9.74	10.90	12.70	15.80	20.70	28.00	41.10	75.70	222.00
70,000	31,751.4	8.33	9.67	11.20	12.70	15.80	20.80	28.30	41.70	78.20	242.00
100,000	44,359.2	8.41	9.77	11.30	13.30	16.10	21.20	29.00	43.40	82.00	267.00
150,000	68,038.8	7.31	8.49	10.00	11.80	14.30	18.50	25.80	37.20	72.90	245.00
200,000	90,718.4	6.63	7.69	9.09	10.90	13.10	17.10	23.40	34.50	66.40	227.00
250,000	113,398.0	6.14	7.13	8.42	10.20	12.30	15.70	21.70	32.40	61.80	212.00
300,000	136,077.7	6.14	7.13	8.43	10.20	12.30	15.70	22.40	32.60	62.40	217.00
500,000	226,796.1	6.15	7.14	8.44	10.20	12.30	15.80	22.50	33.00	63.80	230.00

(Unit: kPa)

**Table 14.** Expected damage by overpressure

Overpressure		Expected damage	Color for damage grade
kPa	psig		
3.45	0.50	Window fracture	
7.58	1.10	Metal panel fracture	
15.00	2.17	Collapse of unreinforced concrete or cinder block walls	
20.68	3.00	Steel frame building flexure	
27.58	4.00	Oil storage tank explosion	
34.47	5.00	Collapse of wood framed buildings	
41.37	6.00	Collapse of house	
62.06	9.00	Destruction for freight car	
69.00	10.01	Collapse of reinforced concrete building	

### 3. 연구 결과

#### 3.1 안전거리 위반율에 따른 압력 분석

재래식구조 지상형 탄약고에 저장된 폭약량에 따라 구성된 10가지 시나리오 Table 2를 바탕으로 안전거리 위반율을 10%씩 증가시켜 폭발로 인한 구간별 최대 압력을 Table 15과 같이 산출하였다. 위반율이 높아짐에 따라 탄약고와 위험노출대상과의 거리는 감소하므로 가해지는 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 폭약량에 따른 안전거리의 증가 비율이 일정하지 않으므로 위험노출대상에 가해지는 최대압력은 폭약량에 따라 절대적으로 증가하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 많은 폭약량을 보관하고 있지 않더라도 큰 피해를 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 탄약고 안전거리를 위반하지 않았을 경우를 가정한 위반율

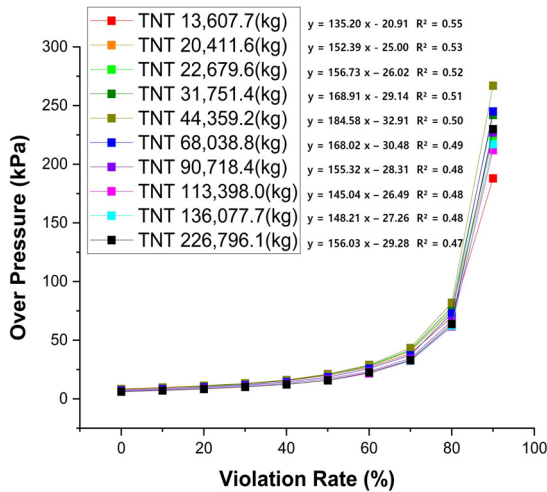


Fig. 4. Overpressure increase graph according to safety distance violation rate by scenario.

0% 구간에서는 탄약과 폭발로 최소 6.14 kPa, 최대 8.39 kPa의 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었으며 구성된 시나리오상 가장 안전거리를 지키지 않았을 경우인 위반율 90% 구간의 경우 최소 188 kPa, 최대 267 kPa의 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 도출된 위반율 별 압력값을 통해 압력증가 그래프를 Fig. 4와 같이 도출할 수 있었으며 이를 통해 시나리오별 압력 영향을 비교 분석하였다.

Fig. 4를 통해 위반율 0%에서 70% 구간의 경우 압력 증가량은 일정한 수준으로 기울기에 큰 변화가 없었지만, 위반율이 80%에서 90%로 증가하는 구간에서 급격히 기울기가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 90% 구간에서 발생된 압력은 80% 구간과 비교하면 평균 3.22배 증가한 압력을 받는 것으로 확인할 수 있었다. 다음

으로 기울기가 가파른 구간은 위반율이 70%에서 80%로 증가하는 구간이며 이는 평균 1.89배 증가한 압력을 받는 것으로 확인되었다. 또한, 동일 위반율에서의 폭발압력을 분석한 결과 가장 큰 폭발압력을 발생시킨 시나리오는 폭약 44,359.2 kg을 저장하였을 경우를 가정한 시나리오인 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 안전거리 위반율에 따른 피해 수준

3D 폭발 시뮬레이션 구동을 통해 Table 3과 같이 도출된 안전거리 위반율에 따른 압력을 선행연구 조사를 통해 도출된 기준인 Table 14 압력에 따른 예상 피해에 적용하여 Table 16과 같이 나타낼 수 있었으며 분석 결과 안전거리 위반율 30% 이하의 경우 13.30kPa 이하의 압력이 발생하며 창문파손, 금속 판넬의 휨, 부러짐과 같은 피해를 예측할 수 있었으며 건물에 직접적인 영향은 주지 않는 것으로 볼 수 있지만, 위반율 40% 이상의 구간에서의 압력은 콘크리트 또는 벽돌로 구성된 건물의 벽체에 휨이나 파손으로 인한 균열을 만들어 직접적인 영향을 주며 위반율이 50% 이상으로 증가하면 철재 프레임으로 구성된 건물에도 영향을 주는 것으로 확인되었다. 오일탱크의 폭발을 발생시켜 화재, 붕괴 등과 같은 2차 피해를 발생시킬 수 있는 27.58 kPa 이상의 압력은 위반율 60% 이상 구간에서 발생한다. 위반율 70%~80% 이상 구간의 경우 직접적인 건물의 붕괴를 발생시키는 34.47 kPa 이상의 압력을 받는다. 목조로 건축된 구조물과 가정집 용도로 사용되는 건물의 붕괴를 발생시킬 수 있으며 이는 민간인의 생명과 재산에 막대한 영향을 초래한다. 위반율 80% 이상의 경우 차량 파손과 현재 건축물에 가장 많이 적용되고 있는 철근콘크리트 건물의 붕괴를 발생시킬 수

Table 16. Expected damage by safety distance violation rate(Refer from table. 14)

(Unit: kPa)

Amount of ammunition		Safety distance violation rate									
lbs	kg	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
30,000	13,607.7	8.04	9.29	10.70	12.50	15.40	20.00	27.00	38.60	69.80	188.00
45,000	20,411.6	8.38	9.44	10.90	12.70	15.70	20.60	27.80	40.60	74.60	215.00
50,000	22,679.6	8.39	9.74	10.90	12.70	15.80	20.70	28.00	41.10	75.70	222.00
70,000	31,751.4	8.33	9.67	11.20	12.70	15.80	20.80	28.30	41.70	78.20	242.00
100,000	44,359.2	8.41	9.77	11.30	13.30	16.10	21.20	29.00	43.40	82.00	267.00
150,000	68,038.8	7.31	8.49	10.00	11.80	14.30	18.50	25.80	37.20	72.90	245.00
200,000	90,718.4	6.63	7.69	9.09	10.90	13.10	17.10	23.40	34.50	66.40	227.00
250,000	113,398.0	6.14	7.13	8.42	10.20	12.30	15.70	21.70	32.40	61.80	212.00
300,000	136,077.7	6.14	7.13	8.43	10.20	12.30	15.70	22.40	32.60	62.40	217.00
500,000	226,796.1	6.15	7.14	8.44	10.20	12.30	15.80	22.50	33.00	63.80	230.00

있다. 해당 구간 내에 다수의 차량이 주차되는 주차장이나 사람이 상주하는 건물이 존재한다면 탄약고 폭발 시 사람의 생명과 재산에 치명적인 피해를 남길 수 있는 위험이 존재한다는 것을 뜻한다.

#### 4. 결론

본 연구는 3D 폭발 시뮬레이션을 통해 재래식구조 지상형 탄약고 폭발 시 위험노출대상에게 발생 가능한 피해 수준을 예측하였다. 위반율이 높아 탄약고와의 거리가 가까워짐에 따라 큰 피해가 발생하여 인명피해와 재산피해를 초래한다는 것을 확인할 수 있었으며 안전거리 위반율 60% 이상인 구간부터 붕괴, 폭발, 화재 등 2차 피해를 발생시킬 수 있는 고위험의 피해가 발생한다는 결과를 도출할 수 있었다.

우선으로 안전거리가 지켜지고 있지 않은 장소가 빠른 시일 내에 개선되었으면 하며 안전거리가 지켜지고 있지 않은 장소의 경우 위반구간 내에 위험노출대상이 존재한다면 본 연구 결과를 통해 고위험 대상을 선정하여 개선에 대한 우선순위에 반영한다면 탄약고 인접 지역의 인명과 재산을 안전하게 지킬 수 있는 군사시설 토지계획 및 공간활용에 반영할 수 있다고 사료된다.

향후 현재 우리 군에서 운용 중인 이글루형 탄약고, 지하형 탄약고에 본 연구에 적용된 위험노출대상의 피해 수준 산정 방법이 적용되어 탄약고의 형태별로 세부적인 안전거리가 도출되어 효율적으로 탄약고가 운용되었으면 한다.

**Acknowledgement:** This work was supported by the National Research Foundation, Korea (NRF) under Grant [2021R1C1C2010999].

This research was supported by a grant (2019-MOIS33-005) of Lower-level and Core Disaster-Safety Technology Development Program funded by the Ministry of Interior and Safety (MOIS, Korea).

#### References

- 1) J. Park, S. Cho, H. Park and D. Lim, "A Study on Prediction of Environment Damage Area by Explosion Accident in Ammunition Storage," J. Korean Soc. Disaster Secur., pp. 260-266, 2016.
- 2) B.-H. Son, K.-H. Kang, J.-R. Ryu and S.-J. Roh, "Analysis of Spatial Characteristics of Old Building Districts to

- Evaluate Fire Risk Factors," J. Korea Inst. Build. Constr., Vol. 22, No. 1, pp. 69-80, 2022.
- 3) J. G. Choi, I. J. Hwang, J. Kim and J. J. Lee, "A Study on the Efficient Reduction Way of Ammunition Storage Facilities Safety Distance," KOREAN Soc. STEEL Constr., 2020.
- 4) S. Park, J. Jun, H. Choi and Y.-J. Park, "Study for Reducing Safety Distance by Installing Ammunition Storage Facility in Underground," J. Korea Inst. Build. Constr, Vol. 20, No. 3, pp. 253-260, 2020.
- 5) Defense Acquisition Program Administration, "Military Guns · Explosives Safety Management Guidebook," 2017.
- 6) J. Lee, "A Study on the Impact Assessment of Explosion Damage due to Leakage of LPG in Trench Construction Site," 2019.
- 7) J. J. Lee, H. S. Yun, Y. J. Cho and J. H. Park, "Empirical Analysis of a Steam Explosion in a Slag Yard based on a Field Investigation and 3D Explosion Damage Simulation," Process Saf. Environ. Prot., Vol. 136, pp. 126-135, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2019.12.032.
- 8) S. Park, K.-J. Kim and Y.-J. Park, "Safety Evaluation Method for Ground Ammunition and Explosive Storage Facilities due to Underground Tunnel Blast," J. Korea Inst. Build. Constr, Vol. 19, No. 4, pp. 331-339, 2019.
- 9) Y. J. Park, J. Baek and K. Son, "A Study on the Calculation of the Design Loads for Blast Doors of Underground Ammunition Facilities Using M&S," J. Korea Inst. Mil. Sci. Technol., Vol. 19, No. 3, pp. 302-310, 2016, doi: 10.9766/kimst.2016.19.3.302.
- 10) S. Park, J. Baek and Y.-J. Park, "Study on Design Method of Tunnel-type Ammunition Storage Chamber," J. Korea Inst. Build. Constr., Vol. 20, No. 3, pp. 279-287, 2020.
- 11) Department Of Defense, "DoD 6055. STD," pp. 1-245, 1999.
- 12) M. Kim and M. Kim, "Design Consideration and Explosion Safety of Underground Ammunition Storage Facilities," Tunn. Technol., Vol. 5, No. 1, pp. 55-70, 2003.
- 13) J.-W. Beak, S. Park and Y. J. Park, "Safety Distance of Underground-type Ammunition Storage Facility," pp. 1-2, 2020.
- 14) A. T. Shin, B. M. Park and H. S. Byun, "A Study on the Calculation of Minimum Safety Distance during Storage and Combustion Test of Solid Propellants for Launch Vehicles," Korean Chem. Eng. Res., Vol. 59, No. 2, pp. 180-185, 2021, doi: 10.9713/kcer.2021.59.2.180.



- 15) S. Leem, J. Lee and Y. Huh, "A Study on Estimation of Structure Damage caused by VCE," J. Korean Soc. Saf., Vol. 22, No. 5, pp. 57-65, 2007.
- 16) B. Park, Y. Kim and I. Hwang, "An Experimental Study on the Explosion Hazards in the Fuel Cell Room of Residential House," J. Korean Soc. Saf., Vol. 36, No. 4, pp. 71-79, 2021.
- 17) International Association of Oil and Gas Producers (OGP), "RADD: Vulnerability of plant/structure (No.434-15)," No. 434, pp. 1-26, 2010.
- 18) A. B. Alias, K. Halim, K. Hamid, M. Bani, U. Kristen and D. Wacana, "Analysis the Effect of Explosion Efficiency in the TNT Equivalent Blast Explosion Model," Icgsc 2014, No. January, 2015, doi: 10.1007/978-981-287-505-1.
- 19) S. H. Leem and Y. J. Huh, "A Study on the Quantitative Analysis for Explosion of LPG Storage Tank," J. Korean Inst. Gas, Vol. 17, No. 3, pp. 1-7, 2013, doi: 10.7842/kigas.2013.17.3.1.
- 20) NOAA, "Overpressure Levels of Concern | response.restoration.noaa.gov," Office of Response and Restoration. 2019, [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/overpressure-levels-concern.html>.
- 21) J. W. (Kingston U. D. Baraldi (JRC), E. Papanikolaou (JRC), M. Heitsch (JRC), P. Moretto (JRC), R.S. Cant (Cambridge University), D. Roekaerts (Delft University), S. Dorofeev (FM Global), A. Kotchourko (Karlsruhe Institute of Technology), P. Middha (Gexcon), A.V. Tchouvelev and V. V. M. (University O. U. A. Venetsanos (National Center Scientific Research Demokritos), Prioritisation of Research and Development for modelling the safe production , storage , delivery and use of hydrogen. 2011.
- 22) P. Terrorist and A. Against, "FEMA 428 ch4 Explosive blast," Buildings, pp. 1-14, 1995.
- 23) G. McKenzie, B. Samali, C. Zhang and E. Ancich, "Blast Resistant Design Parameters against an Uncontrolled Demolition (implosion) in Australia," Int. J. GEOMATE, Vol. 15, No. 52, pp. 168-176, 2018, doi: 10.21660/2018.52.99144.
- 24) B. Samali, G. McKenzie, C. Zhang and E. Ancich, "Review of the Basics of State of the Art of Blast Loading," Asian J. Civ. Eng., Vol. 19, No. 7, pp. 775-791, 2018, doi: 10.1007/s42107-018-0063-y.
- 25) Y.-H. Lee, "Analysis of the Impact of Fire and Explosion Accidents due to LNG Leaks in the LNG Re-gasification Process," J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., Vol. 24, No. 6, pp. 825-833, 2018, doi: 10.7837/kosomes.2018.24.6.825.
- 26) D. S. Yantek, J. P. Homer and C. C. Jobes, "Considerations for Blast Survivability of Built-in-place Refuge Alternative Doors," 2019 SME Annu. Conf. Expo C. 121st Natl. West. Min. Conf., No. August, 2019.
- 27) Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD), Explosive weapon Effects Overview, 2017.