

탄약저장시설 지하화에 따른 안전거리 축소방안 연구

Study for Reducing Safety Distance by Installing Ammunition Storage Facility in Underground

박 상 우¹

전 종 훈²

최 항 석³

박 영 준^{4*}

Park, Sangwoo¹

Jun, Jonghoon²

Choi, Hangseok³

Park, Young-Jun^{4*}

Assistant professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea¹

Graduate student, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 02841, Korea²

Professor, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 02841, Korea³

Professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea⁴

Abstract

With increasing interest in an underground-type ammunition storage facility, several design results have been provided recently. However, since not only experts in the tunnel but also military persons in charge of ammunition have not fully understood the safety distance standard, reliable design results are not being produced. In this study, the effective design method of an underground-type ammunition storage facility was provided by analyzing the current safety distance standard. First, the critical safety distances that dominate the size of construction site for underground-type ammunition storage facilities were evaluated, which are the layout of chambers and the configuration of the entrances. Then, the decreasing effect of inter-chamber distance was studied according to the rock type and the storage density of ammunition. In addition, the method of designing tunnels with parallel lines and two-floors was considered for arranging more chambers while complying with the safety distance standards. In particular, numerical simulations were carried out to determine the satisfaction of the safety distance standards when an underground-type ammunition storage facility is composed of two-floor and the decreasing effect of inter-chamber distance according to the inner explosive pressure reduction. Finally, the method to adjust the size of entrances and the path of pressure were studied for decreasing the safety distance at the entrance.

Keywords : underground-type ammunition storage facility, design method of ammunition storage facility, safety control standard of ammunition and explosion, safety distance

1. 서 론

탄약부대는 탄약고를 관리하는 역할을 수행하며, 내부에
는 탄약고뿐만 아니라 정비소, 차량기지, 병영시설 등 다양

한 시설을 포함하고 있다. 이 때, 탄약고가 우발적으로 폭발
하게 되면 폭풍압, 파편 및 부스러기, 열 등의 효과가 발생
하고, 결국 주변 시설들에게 피해를 주게 된다. 이를 방지하
기 위해 탄약 및 폭발물 안전관리기준 지시에서는 탄약고와
주변 시설들 사이에 최소한의 거리를 이격하도록 하였으며,
이를 안전거리라고 일컫는다[1]. 안전거리는 저장되는 탄약
의 종류와 중량 즉, 순폭약량에 따라 결정된다. 문제는 일반
적인 탄약고의 안전거리는 상당히 길어서 탄약부대 내 시설
이외에도 부대 밖의 민간시설에도 영향을 준다는 것이다.
따라서 탄약부대는 주변 민간시설에 대해서도 안전거리 기

Received : February 26, 2020

Revision received : April 27, 2020

Accepted : May 9, 2020

* Corresponding author : Park, Young-Jun

[Tel: 82-2-2197-2955, E-mail: yjpark@kma.ac.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All
rights reserved.

준을 만족하도록 넓은 부대경계를 확보해야 되고, 새로운 민간시설이 설치되고자 할 때에도 이를 규제해야 한다. 이에 주변 지역을 개발하고자 하는 민간단체나 인근 주민들에 의해 민원이 많이 발생하고 있는 실정이다. 게다가 최근 국방개혁 2.0 정책 등 국방환경 변화로 인해 관리 및 경계병력이 지속적으로 감소되고 있는 시점에서 방대한 면적의 부대를 관리해야 할 인원이 감소되는 것도 탄약부대에겐 큰 부담으로 다가오고 있다.

그러나 안전거리 기준은 함부로 축소시킬 수 없다. 안전거리 기준은 시설에 아무런 피해를 주지 않을 만큼의 거리가 아니라 구조물에 심각한 손상을 주지 않을 정도로 정의되기 때문이다. 즉, 안전거리만큼 떨어져 있어도 시설은 피해를 받게 되고, 심각한 피해는 받지 않을 수 있으나 어느 정도의 인명피해도 발생할 수 있다는 것이다. 이에 최근에는 지하형 탄약고에 대한 관심이 급격하게 증가하고 있다. 지하형 탄약고는 탄약고의 폭발에 의해 발생하는 효과들을 암반 내부에 가둘 수 있다는 장점이 있다. 따라서 폭발압이나 파편에 의한 안전거리가 상당부분 축소될 수 있다. 다만, 지하형 탄약고에 대해서는 지반 충격에 의한 안전거리를 추가로 고려해주어야 하나, 같은 중량이 저장된 지상형 탄약고의 폭발압 및 파편에 대한 안전거리와 비교하여 매우 짧게 산정된다. 추가적으로 지하형 탄약고를 설치하게 되면 설비와 경계지역이 통합되어 관리될 수 있기 때문에 감소되는 관리 인원으로도 충분히 부대를 운용할 수 있게 된다.

이러한 근거들로 최근 기부 대 양여 사업 방식으로 지하형 탄약고를 시공하는 사례가 보고되고 있다. 기부 대 양여 사업이란, 기존 방대한 부지를 차지하는 탄약부대의 탄약들을 지하형 탄약고에 저장시켜 감소된 안전거리만큼 부대를 축소시키고, 확보된 부지를 도로망 및 산업지구 설치 등 지역발전을 위해 활용하는 방식이다. 민간단체 또는 정부는 교통의 요충지에 위치하는 탄약부대의 일부분을 양여 받아 지역발전을 도모할 수 있으며, 탄약부대는 양여한 부지의 가치만큼 새로운 시설을 기부 받아 지하형 탄약고를 운용할 수 있다. 문제는 현재 지하형 탄약고 안전거리 기준에 대한 연구가 부족하여 탄약관련 군 실무자들도 관련 내용을 완벽하게 숙지하지 못하기 때문에, 안전거리 기준이나 탄약 저장에 대한 기준들을 모두 준수한 신뢰성 있는 설계 결과가 도출되고 있지 않다는 점이다. 정확한 설계결과가 도출되지 않으면 군 입장에서는 안전기준을 위배하거나 비효율적인 시설을 기부 받게

될 것이며, 기부하는 입장에서도 충분한 가치의 시설을 기부하지 못해 양여 받는 부지의 가치나 면적이 상당히 감소될 수 있다.

이에 본 연구에서는 안전거리 기준을 설계결과에 정확하고 효율적으로 반영할 수 있도록 연구를 수행하였다. 먼저 지하형 탄약고에 대한 안전거리 기준들을 분석하고, 설계에 쉽게 반영될 수 있도록 고려사항들을 정리하였다. 또한 안전거리 기준에 위배되지 않고 부지를 효율적으로 활용할 수 있는 방안을 연구하여 지하형 탄약고의 설계 형태들을 제시하였다.

2. 지하형 탄약고 안전거리 분석

2.1 탄약고 안전거리 기준 개요

안전거리 기준은 앞서 언급한 바와 같이 탄약 및 폭발물의 잠재적 사고로 인한 인명과 재산 피해를 최소화하도록 탄약고에 저장되는 탄약 및 폭발물을 제한하거나 탄약고와 시설 사이의 이격거리를 결정하기 위해 만들어졌다. 우리나라는 미국 DDESB 6055.9-STD를 근간으로 탄약 및 폭발물 안전관리기준을 작성하여 준수하도록 하였으며, 안전거리 기준식을 정립하기 위해 국방과학연구소를 중심 미 국방부와 협력하여 다양한 폭발 시험 및 해석을 수행하였다. 국외에서도 자국의 특성을 고려하여 각각의 안전거리 기준을 적용하고 있으며, 대표적으로 NATO 회원국의 AASTP와 UN의 IATG(International Ammunition Technical Guideline) 등이 있다(2,3).

보통 탄약고가 폭발하게 되면 폭발압, 1, 2차 파편, 열, 화학작용제 등의 위험요소가 발생하며, 이 중 폭발압과 파편이 안전거리를 지배하는 주요한 위험이다. 한편, 보호해야 할 대상 즉, 위험노출대상에 따라 안전거리는 총 4가지로 구분될 수 있다. 인명피해가 심각하게 발생할 수 있는 주거시설에 대해서는 주거시설거리(IBC: Inhabited Building Distance), 인근 도로나 운행 차량 등에 대해서는 공로 거리(PTRD: Public Traffic Route Distance), 탄약관리 작업을 위한 부대 내 시설물들에 대해서는 내부격리 거리(ILD: Intraline Distance), 마지막으로 인접 탄약고 폭발 확산 방지를 위한 탄약고 간 거리(IMD: Inter magazine Distance)를 정의하여 규정하고 있다. 보호해야 할 대상에 따라 허용되는 피해 정도가 다르므로, 안전거리 기준식이 모두 다르다(Figure 1).

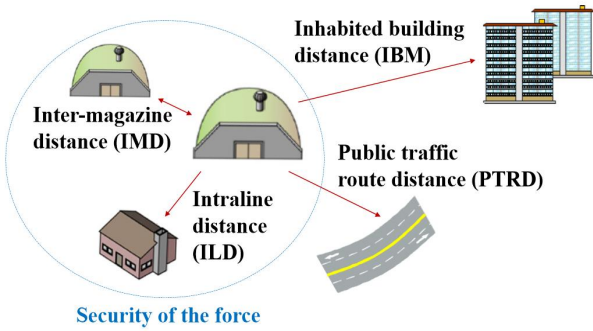


Figure 1. Safety distance standard according to facilities

즉, 탄약고에 대한 안전거리는 위험노출 대상에 따라 파편, 폭발압 등 위험요소별 안전거리를 모두 산정해야 한다. 반면, 지하형 탄약고는 안전거리를 지배하는 폭발압과 파편을 암반에 가둘 수 있기 때문에 폭발압과 파편에 의한 안전거리를 상당부분 감소시킬 수 있다. 다만, 지반충격 효과가 추가로 발생할 수 있으므로 이에 대한 안전거리를 추가로 고려해주어야 하지만, 일반적으로 지상형 탄약고에 대한 폭발압 및 파편에 의한 안전거리 보다는 훨씬 작게 산정된다.

2.2 지하형 탄약고 안전거리 기준 분석결과

지상형 탄약고에서는 탄약고 간 거리(IMD)를 규정하여 격실이 폭발되었을 때 인접 격실의 연쇄 폭발을 방지한다면, 지하형 탄약고에서는 격실 간 최소거리(ICD: Inter-chamber Distance)를 규정하여 연쇄폭발을 방지한다. 지하형 탄약고에서 연쇄폭발이 발생할 수 있는 경우는 다음 3가지이다.

- 1) 폭발에 의한 충격으로 인접격실의 암반조각이 파쇄되어 탄약을 손상시키는 경우
- 2) 암반의 균열을 통해 폭발압이 전파 되는 경우
- 3) 차량통로(터널)를 통해 폭발압 및 파편이 전파 되는 경우

여기서 배면파쇄에 대한 피해를 방지하게 되면 암반의 균열을 통해 폭발압이 전파되지 않으므로, 배면파쇄를 방지하기 위한 안전거리가 가장 지배적이다. 터널을 통해 전파되는 폭발압과 파편은 방폭문을 설치함으로써 방지할 수 있다. 배면파쇄를 방지하기 위한 격실 간 최소거리는 Table 1에 나타났다.

격실 간 최소거리는 격실에 저장된 탄약의 밀도와 암반의 종류에 따라 달라진다. 탄약의 저장밀도가 클수록 전색효과로 인해 격실의 벽면에 가해지는 압력이 커지며, 암반이 강

할수록 지반충격이 더 잘 전파되어 탄약 저장밀도가 48.06kg/m^3 초과될 경우 약한 암반보다 강한 암반에서 오히려 배면파쇄 발생 위험이 커져 격실 간 최소거리가 길어진다. 이 때, 암반의 종류를 강한 암반, 보통 암반, 약한 암반 등 일반화된 용어로 표현한 것은 현 안전거리 규정에 암반 종류에 대한 구체적인 정의가 부재하기 때문이며, 향후 지반 물성치에 따라 기준식을 세분화하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

지반충격에 의한 안전거리는 지반충격으로부터 위험노출 대상을 보호하기 위한 이격거리로서, 지상형 탄약고와 마찬가지로 보호해야 할 대상(즉, 시설)에 따라 안전거리 기준식이 모두 다르다. Table 2에 지반충격에 대한 주거시설거리 기준식을 정리하였다.

Table 1. Standard for inter-chamber distance (ICD)

ICD (m)	Storage density of chamber (w)	Type of rock
$0.991 W^{1/3}$	$w \leq 48.06 \text{ kg/m}^3$	Normal/Strong rock
$1.982 W^{1/3}$	$w > 48.06 \text{ kg/m}^3$	
$1.387 W^{1/3}$	-	Weak rock

* W = Total net explosives weight in chamber (kg)

Table 2. Inhabited building distance (IBD) by ground shock

IBD (m)	Storage density of chamber (w)	Type of rock
$2.3 W^{1/3}$	$w \leq 48.06 \text{ kg/m}^3$	Normal/Strong rock
$5.414 f_0 W^{4/9}$	$w > 48.06 \text{ kg/m}^3$	
$4.808 f_0 W^{4/9}$	-	Weak rock
$0.91 f_0 W^{4/9}$	-	Soil

* $f_0 = 0.116w^{0.3}$

공로 거리는 주거시설거리의 60%를 적용하며, 내부 격리거리와 탄약고 간 거리는 적용하지 않는다. 지반충격에 의한 안전거리는 배면파쇄 방지를 위한 격실 간 최소거리와는 달리 암반 강도가 강할수록 이격거리가 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 지반충격에 의해 구조물의 손상정도는 지반의 진동속도를 기준으로 파악하며, 현재 터널 시공 시 발파에 의한 안전성 검토 기준도 대부분 지반 진동속도를 기준으로 규정되어 있다[4]. 즉, 암반의 강도가 강할수록 진동이 잘 전파되기 때문에 안전거리는 더 멀어지는 것이다.

폭발압과 파편에 의한 안전거리는 앞서 언급한 바와 같이

암반에 의해 가워지므로 따로 고려하지 않아도 된다. 다만, 격실을 상부의 지반 두께가 충분하지 않다면 폭풍압과 파편이 지반을 파괴시켜 외부로 방출될 우려가 있으므로, 격실 상부 지반의 임계두께에 대한 기준($=0.991W^{1/3}$)을 만족하지 않는다면 지상형 탄약고의 기준을 따라야 한다. 또한 격실 상부 임계두께를 만족하더라도 폭풍압과 파편이 차량통로(터널)로 전파되어 출입구로 방출될 수 있다. 따라서 출입구에서 발생할 수 있는 파편 및 폭풍압에 대한 안전거리도 고려되어야 한다. 먼저 파편에 의한 주거시설거리는 출입구로부터 개구부 중심축 좌우 10° 범위에 1800ft(549m)로 규정하고 있다. 공로시설거리는 주거시설의 거리와 60%, 내부격리거리와 지상탄약고와의 거리는 주거시설거리와 동일하게 규정하고 있다. 폭풍압에 의한 안전거리는 다음 식을 이용한다.

$$R = 45.5D[(77.86 W / V_E)^{0.5} / (0.145 P_{so})]^{1/1.4} \quad \text{-- (1)}$$

여기서, D는 개구부 유압직경(m), V_E 는 폭풍파가 지나간 부피(m^3), P_{so} 는 거리 R(m)에서의 압력(kPa)이며, 위험 노출대상에 따라 Table 3과 같이 허용압력을 사용하여 달리 계산한다. 지하형 탄약고에 대한 안전거리 기준을 Figure 2와 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Safety distance standard for underground-type ammunition storage facility

Effect	IBD	PTRD	ILD	IMD	ICD
Spall	* Critical thickness at upper ground of chamber - Satisfaction: × - UnSatisfaction: ○				○
Ground shock (damage prevention)	○ (severe damage)		×	×	×
Fragment	549 m (10°)	60% of IBD for whole effect	549 m (10°)		×
Blast wave (allowable pressure)	○ (6.2-8.3 kPa)		○ (24.1-82.7 kPa)	○ (55.2-186.2 kPa)	×

* IBD: Inhabited Building Distance * PTRD: Public Traffic Route Distance
* ILD: Intraline Distance
* ICD: Inter-chamber Distance * IMD: Inter magazine Distance

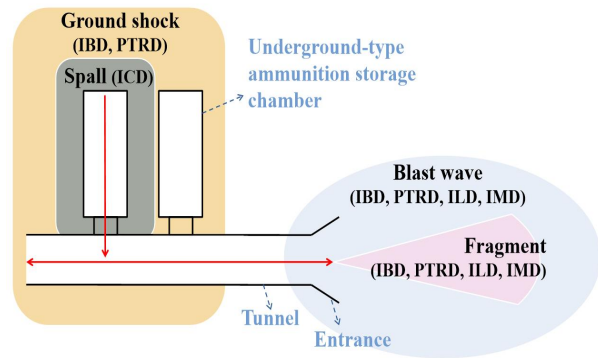


Figure 2. Schematic of safety distance standard for underground-type ammunition storage facility

3. 지하형 탄약고 설계 방법 연구

지하형 탄약고를 설계할 때에는 이제까지 분석한 안전거리 기준을 모두 준수해야하기 때문에 부지를 비효율적으로 사용할 수밖에 없다. 이를 해결하기 위해서는 안전거리를 감소시킬 수 있는 방안을 고려하여 설계 시 적용해야 한다. 예를 들어 내부 폭발의 압력을 감소시키기 위해 방풍용 고강도 콘크리트를 사용하거나 폭압저감 패널을 벽면에 설치함으로써 격실 간 최소거리나 지반충격에 의한 안전거리를 감소시킬 수 있다. 또한 터널에 수직구를 시공하거나 폭풍압을 저감시킬 수 있는 부수 통로들을 설치한다면 폭풍압에 의한 출입구에서의 안전거리를 획기적으로 축소시킬 수 있을 것이다. 그러나 안전거리 기준은 시설 및 인명의 안전과 직접적으로 관련 있기 때문에 기준을 완화시키기 위해서는 수많은 연구 데이터나 실증시험 데이터가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 현행 안전거리 기준만을 고려하여 지하형 탄약고를 시공하기 위한 부지를 좀 더 효율적으로 활용할 수 있는 설계 방안을 제시하고, 실제 설계 시 적절하게 활용할 수 있도록 하였다.

3.1 지하형 탄약고 격실배치 방법

지하형 탄약고의 격실을 배치할 때 격실 간 최소거리와 지반충격에 대한 주거시설 및 공로거리로 인하여 충분한 수의 격실을 배치하지 못하거나, 요구되는 격실을 모두 시공하기 위해서 광범위한 부지가 필요하게 되기도 한다. 이에 지하형 탄약고의 격실 간 최소거리와 지반충격에 대한 안전거리를 모두 준수하면서 최대한 많은 격실을 설치할 수 있는 방법에 대해 연구하였다.

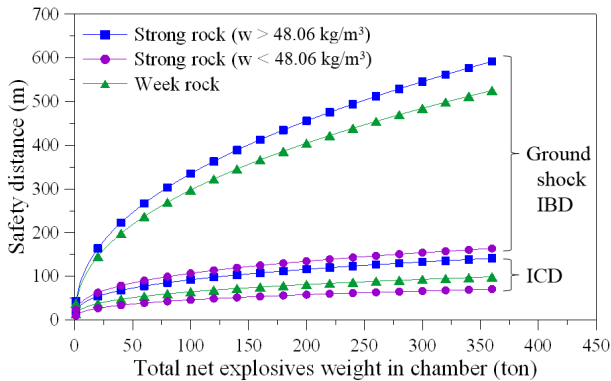


Figure 3. Safety distance for ground shock and Inter-chamber distance according to net explosives weight in chamber

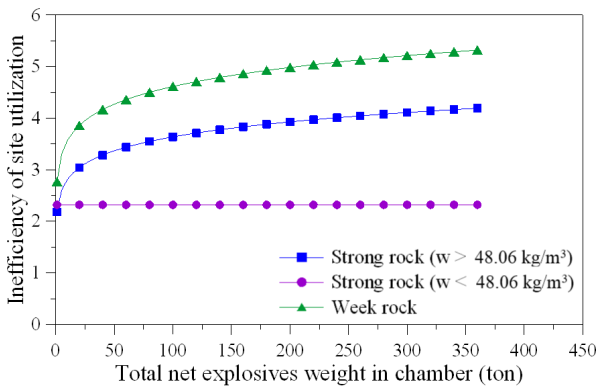


Figure 4. Site utilization efficiency regarding on rock type

먼저 저장되는 탄약의 순 폭약량에 따른 격실 간 최소거리와 지반충격에 대한 주거시설거리의 변화를 Figure 3에 나타냈다. 분석결과, 지반충격은 강한 암반에서 더 잘 전파되므로 저장밀도가 48.06kg/m^3 초과일 경우 격실 간 최소거리와 지반충격에 대한 주거시설거리는 강한 암반에서 더 길게 산정되는 것을 알 수 있다. 다만, 저장밀도가 48.06kg/m^3 이하일 경우 약한 암반보다 강한 암반에서 오히려 지반충격에 의한 피해가 저하되고, 특히 지반충격에 대한 주거시설거리가 상당히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이에 암반의 종류와 탄약의 저장밀도에 따른 부지 활용의 효율성을 Figure 4에 나타냈다. Figure 4의 y축은 지반충격에 대한 주거시설거리 대비 격실 간 최소거리로서 격실 배치를 위한 부지를 얼마나 효율적으로 활용할 수 있는지에 대한 지표를 나타낸다. 분석결과 약한 암반일 경우 가장 비효율적인 부지활용이 예측되며, 강한 암반에서 저장밀도를 48.06kg/m^3 이하로 유지하는 방법이 가장 효율적인 부지활용 방법이 될 것으로 분석되었다.

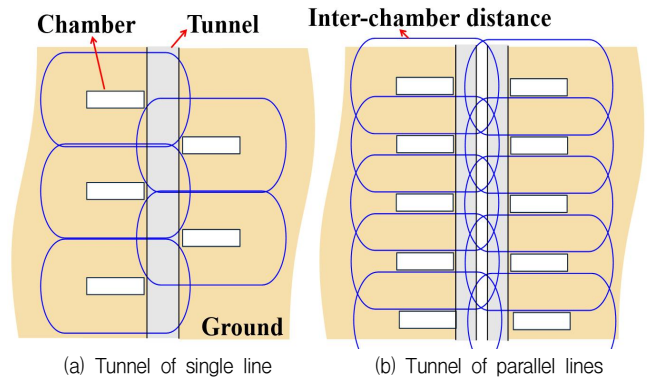


Figure 5. Chamber arrangement according to tunnel type

두 번째로 동일 부지 내에서 안전거리 기준을 준수하면서 최대한의 격실을 설치할 수 있는 방안을 연구하였다. 먼저 격실 간 최소거리로 인해 가장 많은 공간이 소모되는 경우는 터널 맞은편에 격실을 설치할 경우이다. 터널의 폭은 부지 환경(암반 종류, 부지 면적 등)과 시공 환경(시공비, 시공 장비의 진입여부 등), 그리고 전시에 동시 차량 수용대수에 의거한 적재 및 회차 공간 등을 고려하여 결정해야 한다. 이때, 터널이 광폭으로 시공된다 하더라도 안정성 측면에서 격실 간 최소거리 이상으로 폭이 설정될 수 없다. 즉, Figure 5 (a)처럼 마주보는 위치의 격실을 설치할 경우 유휴공간이 많이 발생하게 된다. 따라서 공간을 효율적으로 활용할 수 있는 방법으로 Figure 5 (b)와 같이 병렬로 터널을 구성하는 방법이 있다. 병렬로 터널이 구성될 경우 가로 방향으로 거리가 확보될 수 있어 병선터널 사이의 간격에 따라서 직접 마주보고도 설치될 수 있다. 병선터널 사이의 간격은 시공성과 안전성, 그리고 파편함정 등 방호 구조를 설치하기 위한 공간 등을 고려해 터널 직경의 1.5배(1.5D) 이상은 유지해야 한다. 다만, 이 경우에 터널의 형태가 복잡해지고 마주보는 터널끼리의 접근성이 저하되는 등 작전적 측면에서 문제가 발생할 수 있으나, 병선터널 사이에 교차로를 설치하는 등의 방법으로 해결할 수 있다. 또한 시공비가 상당히 증가할 수도 있으나, 동일 수의 격실을 설치하기 위한 부지 활용 측면에서 경제적으로 유리한 설계방법이 될 수 있다.

세 번째로 격실을 2단으로 배치하는 방안에 대해 검토하였다. 격실을 2단으로 배치한다는 것은 Figure 6과 같이 터널을 2개의 층으로 구분하여 각 층에 격실을 배치하는 것을 의미한다. 이 때, 탄약 및 폭발물 안전관리기준에 의거하여 지하형 탄약고 격실 상부에는 다른 탄약고 격실이 배치되지 않도록 해야 한다.

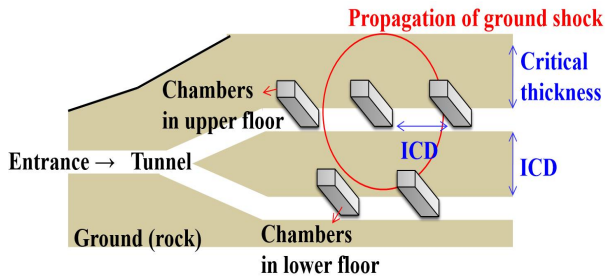


Figure 6. Schematic of chamber arrangement with two floors

현행 탄약 및 폭발물 안전관리기준에서는 격실 간격을 두 개의 인접한 격실 간 가장 짧은 거리 즉, 가장 짧은 임반두께로 정의하고 있다. 따라서 2개의 터널 층이 격실 간 최소 거리 만큼 이격되어 있다면, 격실 간 최소거리를 준수하면서 시공이 가능하다. 또한 격실 간 최소거리 기준은 “특별한 보호 구조물이 사용되지 않고 떨어져 나오는 즉, 배면파쇄에 의해 발생하는 암석조각에 의해 탄약이 손상되는 것을 방지하기 위해 요구되는 최소 격실 간격”으로, 격실 상부 임계두께 기준은 “격실 천정의 천연 암벽면부터 지표면까지의 최소거리로서 저장격실 내부 폭발에 의해 격실 상부의 지표면이 파괴되지 않도록 유지되어야 하는 두께”로 정의하고 있다. 즉, 격실 간 최소거리 기준과 격실 상부 임계두께 기준에서 정의하는 방지해야 할 최소 피해 상태가 벽면 또는 지표면의 파쇄로 동일하다. 이 때, 두 기준은 동일한 기준식 ($=0.991W^{1/3}$)을 사용하고 있다. 이는 격실이 폭발했을 때 지반 파쇄를 발생시키는 지반충격 전파 정도가 사망으로 동일하다는 것을 의미한다. 따라서 2단으로 격실을 배치할 경우에도 방향에 관계없이 두 격실 사이의 최소간격을 기준에 맞게 이격시킨다면 안전거리 기준에 위배되지 않는다.

이를 좀 더 자세히 분석하기 위해 격실의 벽면에 임의의 폭발압력을 가해주고 사망으로 전파되는 지반 진동속도를 수치해석을 통해 도출해보았다. 수치해석은 지반 해석용 유한요소해석 프로그램인 GTS-NX (MIDAS 社)를 이용하였다. 지반의 동해석을 모사하기 위해 해석 구간의 지반 모델링, 시간이력 해석에 이용되는 감쇠행렬 결정을 위한 고유치 해석, 시간에 대한 발파 하중 함수 적용, 진동 영향 분석의 순서로 시뮬레이션을 진행하였다. 탄약고의 모양은 원형으로 가정하였으며, 벽면에 임의의 폭발압력이 동일하게 등분포로 가해지도록 하였다. 지반은 경암의 일반적인 물성치를 적용했다. 또한 경계에서의 반사 효과를 방지하기 위해 점성 경계를 이용하였다[5].

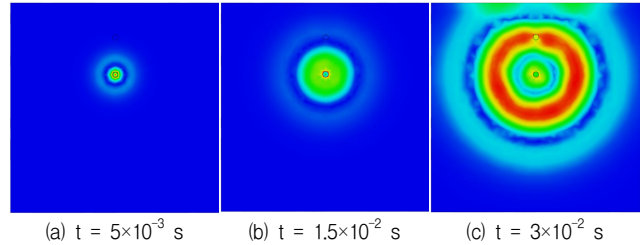


Figure 7. Contour plots for inner-explosion at chamber

Table 4. Velocity of ground at point 60 m away from chamber

Location	Upward	Downward	Leftward	Rightward
Velocity of ground	6.92 cm/s	7.11 cm/s	7.12 cm/s	7.10 cm/s

지반충격의 전파 양상을 Figure 7에 지반 진동속도를 기준으로 나타냈다. 해석 결과, 지반 진동속도 즉, 지반충격은 격실의 모양에 따라 원형으로 퍼져나갔다. 이를 수치적으로 확인하기 위해 격실 상, 하, 좌, 우로 60m 이격된 지점에서 지반속도를 Table 4에 정리하였다.

Figure 7에서 확인한 바와 같이 동일한 이격거리에서 지반 진동속도가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 격실 간 최소거리와 지반충격에 의한 주거시설거리는 지하형 탄약고가 2단으로 구성이 되어도 현행 안전거리 기준을 준수하며 시공될 수 있다. 추가적으로 격실 내부에 폭발을 저감시키는 기술을 적용할 경우 얼마큼 안전거리를 축소시킬 수 있는지에 대해 수치해석 결과를 분석함으로써 판단하였다. Table 5는 격실에서부터 60m, 70m, 80m 아래 지점에서 산정한 지반 진동속도를 정리한 것이다.

Table 5. Velocity of ground according to measuring point

Measuring point	Velocity of ground	Explosive pressure reduction ratio	Ground shock reduction ratio
60 m in downward	7.11 cm/s	100.0%	100.0%
70 m in downward	4.78 cm/s	87.5%	75.6%
80 m in downward	3.37 cm/s	75.0%	47.4%

일반적으로 폭발에 의해 발생하는 압력은 순 폭발량의 3의 제곱근에 비례한다. 이 때, 격실 간 최소거리와 지반충격에 대한 주거시설거리(저장밀도가 48.06kg/m^3 이하일 경우) 역시 순 폭발량의 3의 제곱근에 비례하기 때문에 격실에서부터의 이격거리는 폭발압을 대표하는 값으로 볼 수 있다. 또한 격실에서부터 60m, 70m, 80m 아래 지점에서 산정한 지반 진동속도는 지반충격의 양을 대표하는 값이다. 즉, 격

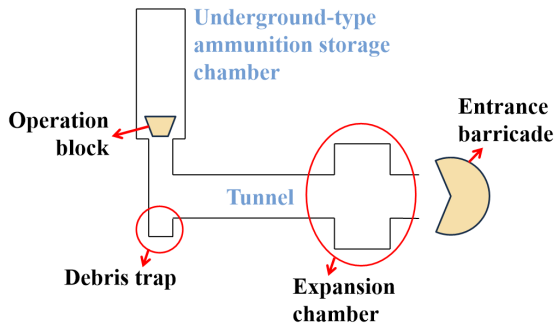


Figure 8. Schematic of protective structures in underground-type ammunition storage facility

실에서부터의 이격거리 비율과 지반 진동속도의 비율을 비교하면, 격실 내부의 폭발 저감 정도에 따라 지반충격이 얼마큼 감소하는지 파악할 수 있다. Table 5에 정리한 바와 같이, 폭발이 87.5%, 75% 감소함에 따라 지반충격은 70.6%, 47.4% 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 격실 내부에 폭발을 저감시키는 기술을 적용하는 것은 안전거리를 획기적으로 축소시킬 수 있는 가장 효율적인 설계방법이다.

3.2 지하형 탄약고 출입구 시공방법

지하형 탄약고 설계 시 안전거리를 지배하는 즉, 가장 긴 안전거리가 산정되는 효과는 출입구에서 발생하는 파편과 폭발압에 의한 거리이다. 이 때, 출입구에서 발생하는 파편 효과는 출구방벽과 함께 파편을 줄이기 위한 시설 1개를 병행하여 사용함으로써 고려하지 않아도 될 정도로 위험을 줄일 수 있다. 즉, 출구방벽에 더하여 적어도 하나의 방호 시설을 설치하면 파편에 의한 안전거리는 0이 된다. 여기서 특별한 장치는 파편함정, 병목장치, 고압 폐쇄장치 등을 의미한다(Figure 8).

파편함정은 격실 맞은편에 설치되어 격실의 임의 폭발 시 파편을 가두어 2차 파편 효과를 줄이는 역할을 한다. 팽창격실도 파편에 대해 동일한 효과를 보이며, 추가적으로 폭발압도 감소시켜주는 역할을 한다. 고압 폐쇄장치는 평시에는 통로로 이용되다가 격실 폭발과 동시에 입구를 막아주는 장치이나, 시설이 부피를 많이 차지하여 탄약 수불 능력 등을 저하시킬 수 있다. 마지막으로 출구방벽은 출구에 설치되어 폭발압과 파편을 막아주는 역할을 한다.

이러한 방호 시설을 이용하여 출입구에서의 파편 안전거리를 0으로 만들어 주었다면, 가장 중요한 안전거리는 바로 출입구에서의 폭발압에 의한 안전거리가 된다. 출입구에서

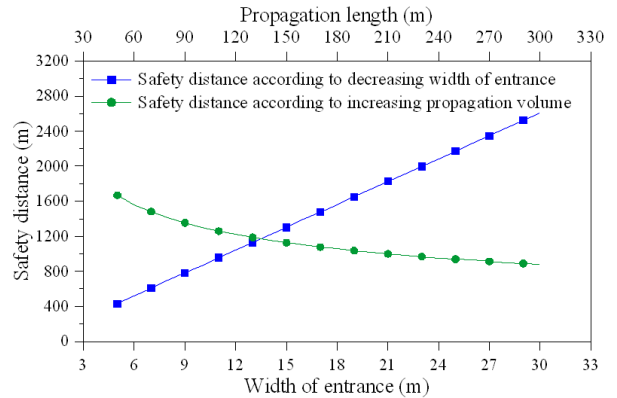


Figure 9. Effect of decrease in safety distance at entrance

의 폭발압 안전거리를 최대로 감소시켜 줄 수 있는 방법은 바로 출구방벽을 설치하는 것이다. 이 경우 안전거리는 1/2로 줄어들 수 있다. 다만, 타원형으로 구성되던 안전거리 범위가 최대 안전거리의 절반을 반지름으로 하는 원형으로 변한다는 특징을 가진다. 이 이외에도 팽창격실, 고압폐쇄장치 등으로 출입구에서의 폭발압에 의한 효과를 저감시킬 수 있으나, 파편에 비해 저감효과는 크지 않다. 따라서 본 연구에서는 출입구의 단면을 줄이고, 폭발압의 이동경로 부피를 증가시키는 방법을 연구하였다. 출입구의 단면을 줄임으로써 병목현상으로 인해 출입구에서 방출되는 폭발압을 감소시킬 수 있고, 동일한 부지 내에 다수의 출입구 설치가 가능해져 작전적 측면에서 유리한 시공이 가능해진다. 즉, 하나의 출입구가 붕괴되었을 경우를 대비한 예비통로의 확보가 가능해진다. 또한 터널사이의 교차로를 다수 설치한다면 팽창격실의 역할을 하게 되어 폭발압의 이동경로를 증가시키고, 결국 폭발압에 의한 안전거리도 감소시킬 수 있다. Figure 9는 출입구의 단면을 감소시키는 방법과 폭발압의 이동경로를 증가시키는 방법 중 더 효율적인 방법에 대해 분석한 결과이다. 시공 가능여부를 판단하여 출입구의 단면은 1차선에서 6차선 즉, 5~30m까지 변화시켰으며, 이동경로는 50~300m까지 변화시켰다. 그 결과, 출입구의 단면을 감소시킬 경우 안전거리 감소 정도가 상대적으로 컸으며, 따라서 안전거리 감소와 작전적 측면을 고려할 때, 출입구의 단면을 감소시키는 방안이 가장 효율적이라는 결론이다.

4. 결 론

본 연구에서는 현행 안전거리 기준을 준수하면서 지하형

탄약고를 효율적으로 설계할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 먼저 지하형 탄약고에 대한 안전거리 기준을 분석하여 격실 배치와 출입구 설계 시 안전거리에 의해 부지가 비효율적으로 활용될 수 있다는 점을 파악하였다. 이를 해결하기 위해 격실 배치 시 임반의 종류와 저장밀도에 따른 안전거리의 변화를 분석하였고, 강한 임반에 저장밀도 48.06kg/m^3 이하로 시공할 경우 가장 효율적인 시공이 이루어진다는 결론을 도출하였다. 또한 터널을 병선으로 시공하거나 2단으로 시공함으로써 안전거리 기준을 준수하면서 더 많은 양의 격실을 배치할 수 있다는 것을 증명하였다. 특히, 2단으로 구성할 경우의 안전거리 기준 만족여부를 파악하기 위해 수치해석을 수행하였고, 폭압 저감정도에 따라 안전거리 감소 효율에 대해서도 분석하였다. 마지막으로 출입구 설계 시 출입구의 크기와 이동경로를 조정하는 방법으로 안전거리를 축소시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

이와 같이 본 논문에서는 안전거리를 준수하며 지하형 탄약고의 시공 부지를 더욱 효율적으로 사용할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 연구 결과를 통해 안전거리 기준을 완화할 수 있는 설계기술이 존재한다는 인식이 전파되어 지하형 탄약고에 대한 시장 및 연구가 더욱 활발해지고, 현행 안전거리 기준도 좀 더 세부적이고 구체적으로 개선될 수 있는 계기가 되길 기대한다.

요 약

지하형 탄약고에 대한 관심이 증가하면서, 관련된 설계 결과가 다수 도출되고 있다. 그러나 터널 민간 전문가들뿐만 아니라 탄약관련 군 실무자들도 안전거리 기준을 완벽하게 숙지하지 못하여 안전거리 기준을 모두 준수한 신뢰성 있는 설계 결과는 도출되고 있지 않고 있는 실정이다. 또한 안전거리를 과하게 적용하여 부지를 비효율적으로 활용하거나 시공불가판정을 받는 사례도 보고되고 있다. 본 연구에서는 지하형 탄약고에 대한 안전거리 기준을 정리하고 이를 준수하면서 효율적으로 설계할 수 있는 방안에 대해 연구하였다. 또한 여러 방법 중 안전거리를 획기적으로 저감시킬 수 있는 방법을 도출하여 향후 지하형 탄약고 설계 및 시공 시에 적용할 수 있도록 데이터를 마련하였다.

키워드 : 지하형 탄약고, 탄약고 설계방법, 탄약 및 폭발물 안전 관리기준, 안전거리

Funding

This work was supported by Hwarang-dae Research Institute of Korea Military Academy.

ORCID

Sangwoo Park, <http://orcid/0000-0003-2381-3146>

Jonghoon Jun, <http://orcid/0000-0003-4674-3873>

Hangseok Choi, <http://orcid/0000-0002-2040-8850>

Young Jun Park, <http://orcid/0000-0003-4006-8192>

References

1. Ministry of National Defense. Instruction of safety control standard for ammunition and explosion. Korea, Seoul: Ministry of National Defense; 2019. 483 p.
2. Department Of Defense. Manual of DOD ammunition and explosives safety standards. USA, VA.: Department of Defense Explosive Safety Board; 2017. 63 p.
3. AASTP NATO. Manual of NATO safety principles for the storage of military ammunition and explosives. Ammunition Safety Group, NATO. 2010. 588 p.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Tunnel standard specification. Korea, Seoul: Korean Tunnelling and Underground Space Association; 2015. 126 p.
5. Lysmer J, Wass G. Shear waves in plane infinite surface. Journal of the Engineering Mechanics Division. 1972;98(1):351-8.