

지하시설 굴착공사에 따른 탄약저장시설 안전성 평가방법 연구

Safety Evaluation Method for Ground Ammunition and Explosive Storage Facilities due to Underground Tunnel Blast

박 상 우¹

김 국 주¹

박 영 준^{2*}

Park, Sangwoo¹

Kim, Kuk-Joo¹

Park, Young-Jun^{2*}

Assistant professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea ¹

Professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea ²

Abstract

Recently, expansion of urban and social infrastructures is planned to go through the transfer of military facilities or crossing the infrastructures via underground tunnels. However, when crossing facilities such as ammunition and explosive storages, a high level of safety assessment is required to prevent an accidental explosion of ground ammunition. In this study, a case study was conducted to evaluate the effect of blasting for the construction of tunnel on the ground ammunition facilities. The design section of Sinansan train operated by the Korea Railroad Authority with agreement of the Ministry of National Defense was selected. For the purpose of this study, the vibration velocity due to explosion was predicted by using GTS-NX, a numerical analysis program. Through literature review, it was confirmed that the vibration velocity of 0.2cm/sec can be a safety evaluation standard. These safety evaluation indicators and procedures used in this study can be utilized as an index of safety evaluation in the planning of social infrastructures that cross the ammunition facilities in the future.

Keywords : ground ammunition and explosion storage facilities, underground facilities, vibration velocity, safety evaluation

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

도심의 과밀화를 해소 및 국토의 균형적인 발전 측면에서 정부의 대규모 택지개발 사업과 교통망의 확장은 국민의 삶의 질을 향상시키고 국가의 기능을 유지하기 위한 핵심적인 사업 중에 하나이다. 이러한 사회간접자본의 확장은 정부의 정책에 맞물려 고도의 정치적 판단이 빈번하게 요구된다. 특히 국가의 안보를 책임지기 위해 건설된 군사시설이 개발계획에 포함될 경우에는 중앙정부의 중재와 부처 간의

유기적인 협조가 필수적이다. 한편, 군사시설 중 탄약고는 탄약의 적재 및 운반을 위해 교통의 중심지에 건설되었으며, 전방부대에 원활한 보급을 위해 경기도 지역에 다수 존재하고 있다. 따라서 탄약 저장시설 중 상당수가 정부의 신도시 계획과 교통망 확충을 위한 공로(철도, 도로 등) 건설지역에 다수 분포하게 되어 관련시설에 대한 민원이 꾸준히 제기되고 있다.

군 역시 지역주민과의 상생과 국가정책의 이행에 기여하고자 많은 노력을 기울이고 있음에도 불구하고 군사전략상 긴요한 시설에 대해서는 이전이 제한됨에 따라 해당시설을 지하화 하는 것에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 특히 탄약시설의 경우 폭발에 따른 많은 위험요소를 내재하고 있어 안전성에 대한 면밀한 검토가 요구된다[1,2].

그러나 현 안전거리에 대한 기준은 지상의 탄약이 우발적으로 폭발하였을 때 인접한 지상구조물에 대한 안전여부

Received : April 26, 2019

Revision received : May 21, 2019

Accepted : July 22, 2019

* Corresponding author : Park, Young-Jun

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

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

를 판단하여 폭발물의 연쇄폭발을 방지하기 위한 폭발, 화염, 파편 및 비산물에 대한 기준만을 제시하고 있을 뿐 지하에서 건설작업 간 진행되는 발파에 따른 지상 탄약저장시설의 안전성을 평가하는 절차 및 기준은 마련되어 있지 않다.

이에 본 연구에서는 지중 구조물의 건설을 위한 발파작업이 지상 탄약시설에 미치는 영향을 분석하기 위해 관련 국내·외 안전기준을 분석하고 판단절차를 제시하고자 사례연구를 실시하였다. 이를 위해 국방부 및 한국철도시설공단 간 협의에 의해 진행되는 신안선 복선 전철 설계구간(시흥시청~광명구간) 중 군사보안 구역(A부대, B부대, C부대)을 통과하여 건설되는 터널구간에 대해 발파 시 지표면에 위치한 부대 탄약고에 미치는 영향을 분석하였으며, 향후 군과 관련된 유사한 사업의 진행 시 안전성 검토에 대한 사례를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

지하터널 발파 시 지반의 진동이 지상의 탄약저장시설의 안전에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 발파로 인한 진동의 영향을 정확하게 예측하기 위해 소규모 시험발파를 통해 지반의 진동 특성을 파악해야 한다. 하지만 민원문제, 화약류 사용의 허가문제, 현장 확보 등 많은 제한사항이 존재하므로, 본 연구에서는 폭발 진동학적 관점에서 수치해석을 실시하였다. 이를 위해 군사보안 구역 근처 지반에 대한 시추조사를 실시하였고, 획득한 지반의 동적 물성치를 토대로 지반 해석용 유한요소해석 프로그램인 GTS-NX MIDAS사)를 이용하여 발파로 인해 탄약고에 발생하는 진동속도를 예측하였다. 예측된 값에 대해서는 구조물의 허용진동속도 규정과 비교하였으며, 이를 통해 지하의 터널

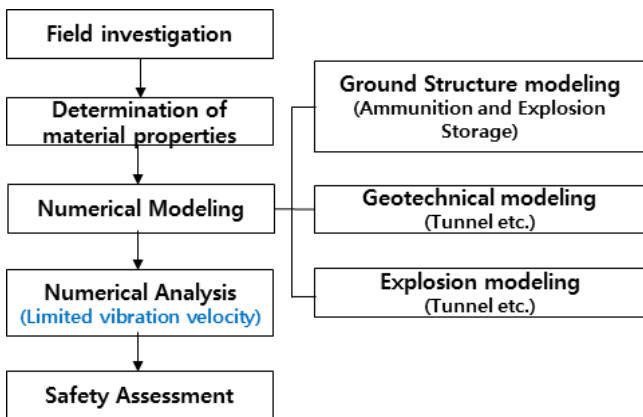


Figure 1. Process of safety assessment

발파가 지상의 탄약시설에 미치는 영향을 분석하였다. 연구의 기본 절차를 Figure 1과 같이 정리하였다.

2. 발파에 따른 탄약저장 시설의 안전성 평가기준

발파에 의해 발생된 에너지는 탄성파의 형태로 진폭을 주기로 갖는 진동으로 나타나는데 이를 진동속도(cm/s)라 한다. 이러한 진동속도는 지반을 통해 전달되는 에너지로 지반의 특성에 따라 감쇠되는 특성이 상이하나 일반적으로 폭발 에너지가 작을수록, 폭발원에서 멀리 이격될수록 작아지는 경향이 있다[3,4]. 발파진동에 대한 구조물의 안정성의 경우 국내·외 모두 이 진동속도를 토대로 허용기준을 마련하고 있다. 국내·외 발파진동 허용기준은 서로 상이하나 일반적으로 콘크리트 구조물의 경우 1~4cm/s의 기준을 적용하고 있다.

Table 1. The tolerance standard of singapore

Utility	Installation	Maximum allowable peak particle velocity (cm/sec)
Gas	All	2.5
	Power stations	1.3
	Sub-stations (major) Sub-stations (minor)	1.3 2.5
Electricity	Underground cable joints	1.3
	Underground cables & pylon foundations	2.5
Water	Non water retaining structures & water mains	2.5
	Water retaining structures	1.3
	Water main tunnel	1.3
Drains & Sewers	All	2.5
Highways	All	2.5
Telecom utilities	All	2.5
Housing estates, Schools	All	2.5
Other structures Buildings Private properties	(Useless specifically stated otherwise)	2.5
Railway structures	All	2.5
Ancient Monuments	All	1.3
Medical Centre, Hospitals	All (Unless agreed otherwise)	0.5
Places of worship	All (Unless agreed otherwise)	0.5
Fresh concrete	Less than 2 days old	0.5
	2 to 8 days old	2.5
	More than 8 days old	2.0
Slopes & retaining walls	All (Unless analyzed)	0.5

Table 2. The tolerance standard of South Korea

Design criteria	Building types	Allowable vibration velocity (cm/sec)
The Ministry of Land, Infrastructure and Transport	Culture heritage area	0.2
	House & APT	0.3-0.5
	Stores	1.0
The department of labor	Reinforced concrete structures & factories	1.0-5.0
	Concrete structures with/without brick walls	1.0 - 4.0
Seoul metro standard of construction	Reinforced concrete structures,	4.0
	Steel frame structure	
Korea land and housing corporation	Reinforced concrete structures	1.0 - 4.0

Table 3. The tolerance standard of Russia

Building types	Allowable vibration velocity (cm/sec)	
	Repeated vibration	One-time vibration
Hospitals	0.8	3
Residential houses	1.5	3
Public facilities	3	3
Business and industrial structures		
Reinforced concrete structures for business and industry transportation tunnels	6	12
Metal and block reinforced concrete structures	12	24
Secondary mine opening (service life up to 3 years)	24	48

진동속도가 5cm/s를 초과하면 구조물에 가벼운 피해가 발생하고, 10cm/s 이상에서는 구조물에 균열이 발생하며, 50cm/s를 넘을 경우 큰 피해가 발생하는 것으로 판단하고 있다. 다음 Table 1~3은 국내·외 발파진동 허용기준을 나타낸 표이다[5-12].

국내·외의 발파진동 허용기준을 정리하면 국외는 0.5~2.5cm/sec, 국내는 0.2~5.0cm/sec의 허용기준을 적용하고 있으며, 과거 냉전시대 지하갱도 구축에 많은 연구를 진행한 舊소련의 경우 1회 진동의 지중 구조물의 경우 12~15cm/sec까지 발파에 따른 진동속도를 허용하고 있다.

탄약저장시설에 대한 안정성을 평가하는 기준이나 절차 등은 마련되어 있지 않으나, 진동속도를 이용한 허용기준을 토대로 안정성을 평가할 수 있을 것이다. 즉, 발파원으로부터 이격거리, 지반의 종류, 발파공법 등에 의해 결정된 진동속도에 대해 탄약저장시설의 형태별(재래식구조 탄약고, 이글루형 탄약고, 지하형 탄약고) 허용 진동속도기준

이 마련되어야 한다. 현재 군내에는 재래식구조 탄약고, 이글루형 탄약고, 지하형 탄약고의 3가지 형태의 탄약저장 시설을 보유하고 있다. 특히 재래식구조 탄약고는 신축 후 60년 이상 경과된 노후시설로 부대별 구조가 상이한 비표준형태인 콘크리트 블록, 목재트러스 및 슬레이트 지붕 형태이다. 육군에서는 비표준 재래식구조 탄약고를 이글루형 탄약고로 대체하고 있으나 아직까지 사업이 완료되지 못한 실정이다. 이에 본 연구에서는 노후화가 심각한 재래식구조 탄약고를 대상으로 국내 최소 허용기준인 0.2cm/sec를 기준으로 탄약고의 안전성을 평가하는 절차를 제시하고자 한다.

3. 유한요소 해석모델

본 연구에서 사용된 수치해석 프로그램인 GTS-NX는 간편한 인터페이스와 정확한 해석 결과, 그리고 국내의 지반 및 시공현장을 고려하여 개발된 점 등으로 인해 광범위하게 사용되고 있는 상용 해석 프로그램이다. 이 프로그램을 이용한 지반의 동해석은 해석 구간의 지반 모델링, 시간 이력 해석에 이용되는 감쇠행렬 결정을 위한 고유치 해석, 시간에 대한 발파 하중 함수를 적용, 진동 영향 분석의 순서로 진행하였다.

3.1 해석구간 지반 모델링

해석 대상의 지반 형상은 보안구역에 포함하여 가로 800m, 세로 800m의 구간으로 모델링하였으며, 설계 선로의 종단면도와 평면도를 토대로 모델링하였다. 터널의 굴착 길이는 군사보안구역의 해석 대상 구조물인 탄약고 바로 아래에 위치한 경우를 기준으로 설정하였으며, 터널 굴착 길이와 탄약고가 모델링 중심 지점에 동시에 위치하도록 하였다. 또한 터널의 위치한 지반 심도는 실시설계 보고서에 따라 A부대에 대해서는 63m, B부대에 대해서는 70m, C부대에 대해서는 108m로 설정하였다.

탄약고의 정확한 크기는 보안상 획득할 수 없어 20m×30m×10m의 직육면체로 가정하였으며, 터널의 크기는 일반적인 지하철 터널을 고려하여 반지름 4.5m의 반원형으로 설정하였다. 장약공의 천공패턴은 심발공에 대한 표준발파패턴을 기준으로 막장면에 1.4m×1.4m의 정사각형 모양으로 가정하였고, 장약량 설치 깊이는 2.1m로 설정하였다. 즉, 발파로 인한 하중은 1.4m×2.1m×1.4m

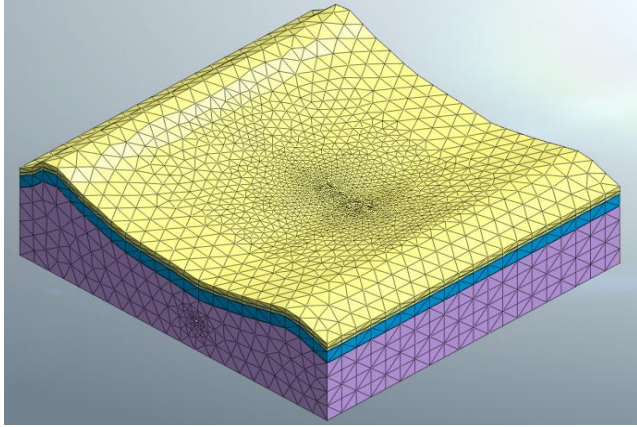


Figure 2. 3-D geometry design

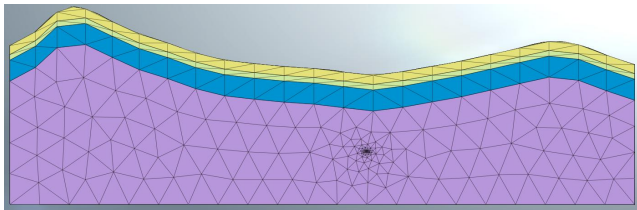


Figure 3. Ground and tunnel mesh design

의 직육면체의 각 면에 등분포로 가해지는 것으로 모델링하였다. 구간의 모델링 결과는 Figure 2, 3과 같다.

각 보안구역별 지층의 구성은 Table 4와 같이 시추조사 결과를 토대로 적용하였다. 시추조사 결과 지층은 크게 토사층(매립층, 붕적층, 퇴적층), 풍화대(풍화토, 풍화암), 기

Table 4. The results of soil investigation

Location	Layers	Depth (m)	Thickness (m)
A & B troops	Weathered soil	0.0~7.0	7.0
	Weathered rock	7.0~11.7	4.7
	Soft rock	11.7~	-
C troop	Weathered soil	0.0~11.2	11.2
	Weathered rock	11.2~18.8	7.6
	Soft rock	18.8~46.5	27.6
	Hard rock	46.5~	-

반암(연암)으로 구성되어 있으며, 토사층의 경우 심도가 깊지 않고 풍화토와 토질이 유사하므로 하나의 층으로 모사하였다. 풍화암과 연암 그리고 경암은 그 지반의 구성이 다르고 동적 물성치도 큰 차이가 있으므로 구분하여 구성하였다. 따라서 보안구역 A부대와 B부대는 풍화토, 풍화암, 연암의 3개의 층으로 구성하였고, 보안구역 C부대는 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 4개의 층으로 구성하였다.

Mesh는 3D tetra 형태로 구성하였으며, 정밀한 해석이

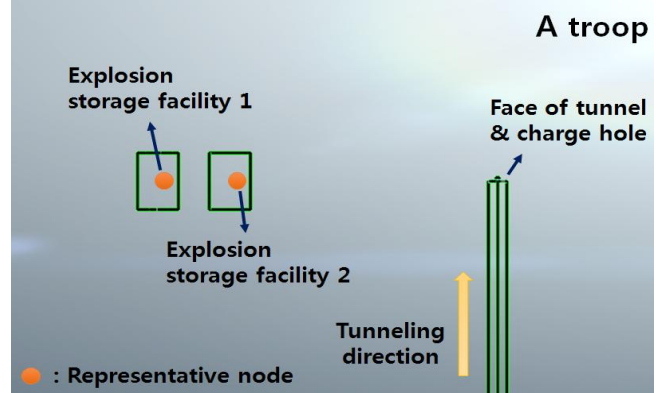


Figure 4. Location of ground ammunition and explosion storage facilities and representative nodes for A troop

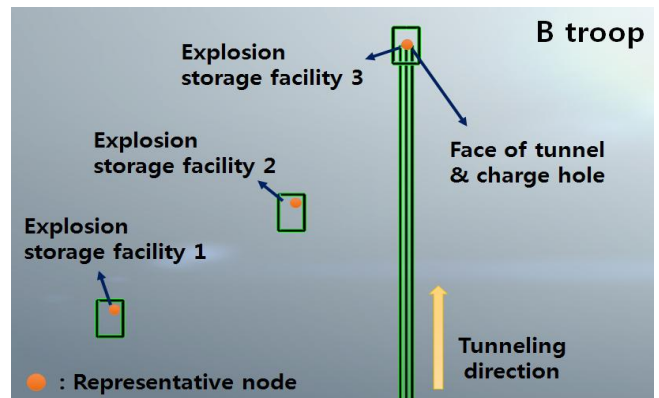


Figure 5. Location of ground ammunition and explosion storage facilities and representative nodes for B troop

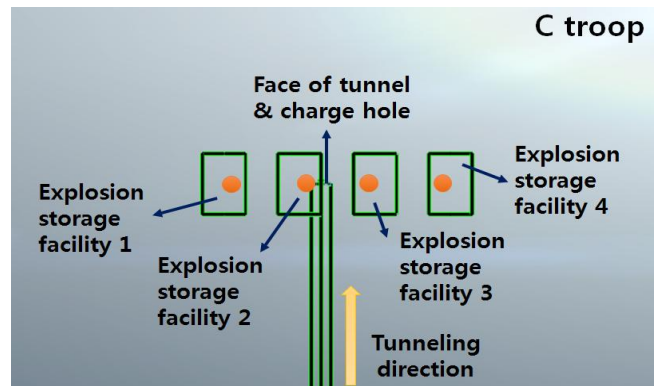


Figure 6. Location of ground ammunition and explosion storage facilities and representative nodes for C troop

요구되는 탄약고 설치 부분과 터널, 그리고 발파하중 작용면은 edge의 크기를 지정하여 조밀한 mesh로 설정하였다. 각 보안구역별 약간의 차이가 있지만 대략 35,000개의 mesh면과 9,000개의 절점을 가지도록 구성하였다. Figure 4~6은 탄약고와 터널의 위치와 해석 후 결과값을

Table 5. Dynamic properties of soil layers

Properties	Common value		C troop		A & B troops
	Weathered soil	Weathered rock	Soft rock	Hard rock	Soft rock
Unit weight (kN/m ³)	19.8	22.8	23.5	24.7	26.86
Cohision (kPa)	20.15	30.1	8,100	13,100	13,100
Angle of friction (°)	29.5	32	45.3	50.8	50.8
Absorption (%)	10%	10%	0.2%	0.5%	0.59%
Dynamic shear modulus (MPa)	715	824	5,190	7,850	34,060
Dynamic elastic modulus (MPa)	831	2,400	9,973	20,900	82,040
Dynamic modulus of volume change (MPa)	5,180	9,140	14,700	20,700	46,248
Poisson ratio	0.463	0.456	0.379	0.332	0.204

획득하기 위한 대표절점의 위치를 대략적으로 표시한 것이다. 단, 보안시설이므로 정확한 위치는 표시하지 않았다.

3.2. 지반 물성치 결정

수치해석에 적용된 지반의 물성값은 기존 시추조사 결과 보고서와 보안지역 A부대 및 B부대 근처에서 추가적으로 실시한 시추조사 결과를 활용하여 결정하였다. 실험값이 있는 경우 실험값을 우선적으로 적용하였으며, 실험값이 없는 경우는 지반의 동해석에서 주로 이용되는 값으로 가정하였다. 매립토와 풍화토, 풍화암층은 하나의 토사층으로 가정하고, 풍화토의 물성값을 전체 토사층의 물성값으로 대표하여 적용하였다. 풍화토 및 풍화암층은 모든 보안구역에 대해 동일하게 적용하였으나, 기반암층은 보안구역별 참고한 자료가 상이하므로 서로 다른 값이 적용되었다. 풍화토의 감쇠비(damping ratio)는 토사층 해석에서 주로 이용되는 값인 10%로 가정하였다. 지층별, 그리고 보안구역별 수치해석 모델에 적용된 물성치는 Table 5에 정리하였다.

3.3. 고유치 해석

고유치 해석은 지반의 고유한 동적 특성을 파악하고, 시간 이력 해석에 적용되는 감쇠행렬을 정의하기 위해 실시하는 해석방법으로 자유진동 해석이라고도 한다. 본 연구에서는 면-스프링(surface spring)으로 탄성계를 구성하고, 이를 지점조건에 정의하여 고유치 해석을 수행하였다. 고유치 해석을 통해 질량 참여율이 높은 주기 모드를 확인하고, 그에 따른 고유주기를 산정하여 발파 동하중의 시간 이력 해석에 적용되는 감쇠행렬을 결정하였다.

스프링 계수값은 철도설계기준의 지반 반력계수에 따라

식 (1)을 통해 산정하였다.

$$k = \frac{1}{30} \alpha E_0 \left(\frac{\sqrt{A}}{30} \right)^{-3/4} \text{ ----- (1)}$$

여기서, k는 연직 또는 수평방향 지반 반력계수 (kg/cm³), α는 추정계수(평상시 1 사용), E₀는 지반의 탄성계수(kg/cm²), A는 지반의 연직 또는 수평방향면의 단면적(cm²)을 나타낸다. 고유치 해석 결과 산정된 각 보안구역내 지반 모델별 고유주기는 Table 6과 같다.

Table 6. Natural period used in models

Location	Natural period in first mode	Natural period in second mode
A troop	0.1580194 sec	0.1424228 sec
B troop	0.1613549 sec	0.138753 sec
C troop	0.3992724 sec	0.3453603 sec

3.4 발파 하중의 산정

본 연구에서는 National Highway Institute에서 제시한 공식을 적용하였으며, 이에 따르면 1 kg 당 발파하중을 식 (2)를 통해 산정할 수 있다[6].

$$P_{det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times S_{ge} \times V_e^2}{1 + 0.8 S_{ge}}, P_B = P_{det} \times \left(\frac{d_c}{d_h} \right)^3 \text{ -- (2)}$$

여기서, P_{det}는 발파압력(kbar), P_B는 공벽면에 가해지는 압력(kbar), V_e는 폭속(ft/sec), d_e는 화약의 직경(mm), d_h는 장약공의 직경(mm), S_{ge}는 비중이다. 단, 식 (2)은 발파 시 발생하는 공기 동압력의 크기를 정의하는

식으로 실제 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 정의된다. 이에 본 연구에서는 Starfield and Pugliese이 제시한 식 (3)을 통해 시간 이력에 따른 1kg의 장약량 당 동압력을 산정하여 적용하였다[13].

$$P_d(t) = 4P_B \left\{ \exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right\} \quad (3)$$

여기서, B는 발파 하중 상수를 의미한다. 본 연구에서는 진동영향에 대한 보수적인 안전성 검토를 위해 건설교통부의 표준발파공법 중 대규모 발파를 기준으로 고성능 Emulsion(ϕ 50mm)에 대한 장약 정보를 입력했으며, 입력 내용은 Table 7과 같다.

Table 7. Parameters used in dynamic load

Parameters	Value
V_e	5,900 m/sec
d_e	50 mm
d_h	76 mm
S_{ge}	1.3 (high explosive emulsion)
B	16,338 (constant)
Charge weights	20.0 kg

3.5 지반 경계조건

지반은 무한한 매질의 형태이지만 동해석에서 일반적인 크기의 경계를 잡을 경우 파의 반사 효과가 발생하기 때문에 큰 오차 및 오류가 발생할 가능성이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 점성경계를 적용하였다[14].

점성 경계는 해당 지반 모델의 경계에서 x, y, z 좌표 방향에 대한 감쇠값을 산정함으로써 정의되며, 본 연구에서는 재료별 흡수율을 기준으로 감쇠율을 적용하였다.

4. 수치해석 결과

해석은 선형 시간 이력 해석으로 설정하고, 전체 해석 시간을 3초, 시간 간격을 0.0005초, 출력 증분 스텝 개수를 10으로 설정하였다. 동적 해석 옵션에서 고유치 해석으로부터 얻은 1, 2차 Mode의 고유주기를 입력하고 재료별 감쇠물성을 적용하였다. 최종적으로 Figure 4~6에 나타난 대표 절점에서 시간 이력 결과 탐색으로 속도를 예측하였다. Figure 7~9은 각 보안구역별 해석결과 즉, 지반 진동속도의 contour 형상을 시간에 따라 정리한 것이다.

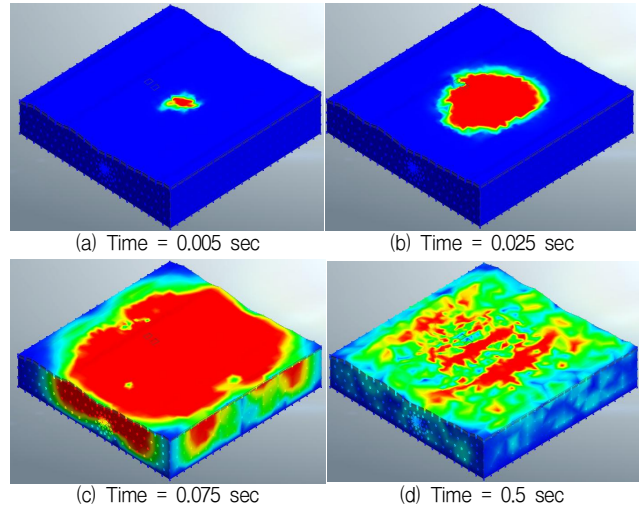


Figure 7. Contour plots for A troop model

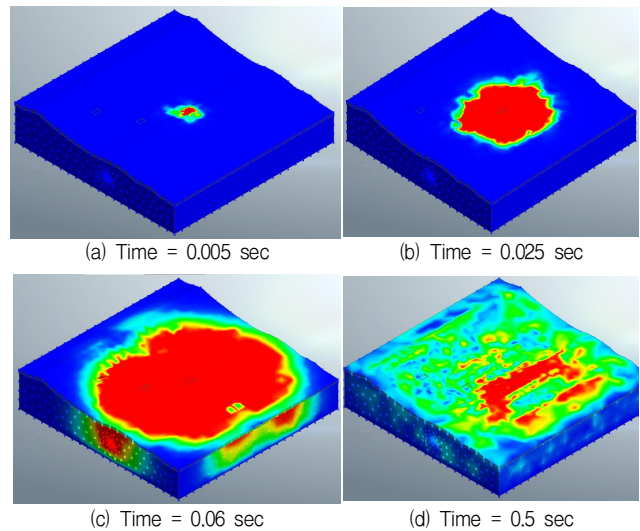


Figure 8. Contour plots for B troop model

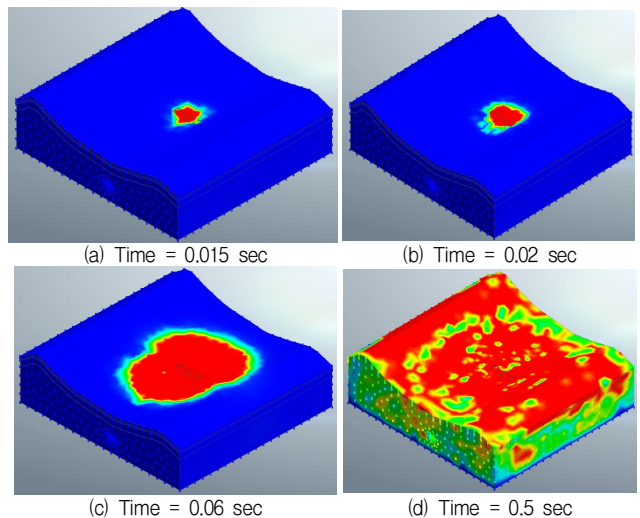


Figure 9. Contour plots for C troop model

4.1 A부대 해석결과

보안구역 A부대에 대한 지반 진동속도 분석결과, 0.00075cm/sec 기준 지반의 진동속도는 터널이 굴착된 지점에서부터 발생하여 약 0.005초 이후 탄약고가 설치된 지반에 영향을 주기 시작하며, 약 0.075초 이후 방사방향 약 400m까지 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이후 지반은 감쇠하며 진동하다가 약 0.5초 이후부터 진동속도가 확연하게 감소하는 경향을 보였다.

각 대표절점에서 최고 진동속도는 탄약고 1과 2에서 각각 0.0129, 0.0173cm/sec 값이 도출되었으며, 최고 진동속도 도달시간은 탄약고 1과 2에서 각각 0.106, 0.0835초로 계산되었다. 따라서 안전성 평가는 터널 굴착 위치와 가장 가까운 탄약고 2에 대한 진동속도를 기준으로 수행하였다.

4.2 B부대 해석결과

보안구역 B부대의 경우에는 탄약고 3의 위치가 터널이 굴착된 심도 바로 위 지표면에 존재하므로 발파 직후 영향을 바로 받는 것을 확인 할 수 있었다. 0.00075cm/sec 기준 지반의 진동속도는 약 0.005초 이후 탄약고 2가 설치된 지반에 영향을 주기 시작하며, 약 0.06초 이후 탄약고 1이 설치된 지반까지 전파되었다. 이후 지반은 감쇠하며 진동하다가 약 0.5초 이후부터 진동속도가 확연하게 감소하였다.

각 대표절점에서 최고 진동속도는 탄약고 1과 2, 그리고 3에서 각각 0.01, 0.0115, 0.04cm/sec 값이 도출되었으며, 최고 진동속도 도달시간은 탄약고 1과 2, 그리고 3에서 각각 0.1305, 0.0755, 0.0555초로 계산되었다. 탄약고 3의 경우 터널 굴착 위치에서 수직방향으로 바로 위쪽에 위치하고 있으므로, 비슷한 지반 물성에도 불구하고 A부대 및 B부대의 다른 탄약고와 비교하여 큰 진동속도와 짧은 최고 진동속도 도달시간이 산정되었다.

4.3 C부대 해석결과

A부대 및 B부대와 비교하여 C부대의 경우 지반의 진동속도가 전파되는 시간이 상대적으로 증가하는 현상을 보였다. 0.00075cm/sec 기준 0.005초만에 지표면까지 진동속도가 전파되는 A부대 및 B부대와는 달리 C부대에서는 0.015초 후에 0.00075cm/sec의 기준 진동속도가 지표면에서 관측되었다. 또한 약 0.06초 이후 방사방향 약 400m까지 진동속도가 영향을 주던 A부대 및 B부대와 달리 C부

대에서는 0.06초 후에도 진동속도는 방사방향 약 180m까지만 전파되었다. 이에 0.5초가 지나도 전체적으로 진동의 영향이 크게 감쇠되지 않고 있는 모습을 보여주었다.

각 대표절점에서 최고 진동속도는 탄약고 1, 2, 3, 그리고 4에서 각각 0.0188, 0.0194, 0.0169, 0.0163cm/sec 값이 도출되었으며, 최고 진동속도 도달시간은 탄약고 1과 2, 그리고 3에서 각각 0.1405, 0.1385, 0.0705, 0.152초로 계산되었다. 따라서 안전성 평가는 터널 굴착 위치와 가장 가까운 탄약고 2에 대한 진동속도를 기준으로 진행하였다.

4.4 탄약저장시설 안전성 평가결과

A부대 및 B부대의 경우에는 단단한 경암층이 지배적으로 존재하여 상당히 큰 동적 물성치가 지반 모델링에 적용되었다. 반면, C부대의 경우에는 시추공의 위치와 상당히 이격된 곳에 위치하고 있으므로 지층의 동적 물성치 적용시 기존 시추조사 자료를 이용하여 시흥시청 ~ 광명구간 지층의 평균적인 동적 물성치 값을 적용하였다. 즉, A부대 및 B부대에 적용된 값보다 상당히 작은 값이 C부대 해석시 적용되었다. 따라서 C부대에 위치한 탄약고에서 측정된 최고 진동속도는 타 부대 결과와 비교하여 큰 차이는 없으나, 최고 진동속도 도달시간은 경암층의 동적 물성치 차이로 인해 상대적으로 늦는 것으로 계산되었다.

각 모델의 대표절점별 지반 발파진동속도는 Table 8에 정리하였으며, 최소 허용기준(0.2cm/sec) 대비 안전성을 평가를 실시하였다.

Table 8. Analyzed maximum vibration velocity

Location	Storage number	Maximum vibration velocity (cm/sec)
A troop	Storage 1	0.0129
	Storage 2	0.0173
	Storage 3	0.04
B troop	Storage 1	0.01
	Storage 2	0.0115
	Storage 3	0.04
C troop	Storage 1	0.0188
	Storage 2	0.0194
	Storage 3	0.0169
	Storage 4	0.0163

안전성 평가결과, B부대 탄약고 3 위치에서 다른 위치에 비해 매우 큰 발파진동 속도가 발생할 것으로 예측되며, 이는 대규모 발파를 고려했을 때 허용진동속도의 40%만큼

의 진동임을 확인하였다. 일반적으로 민감한 사람의 경우 0.02cm/sec의 진동속도가 발생할 경우 진동을 감지할 수 있으며 0.1cm/sec의 진동속도는 대부분의 사람이 지각을 하는 것으로 알려져 있다. 인간이 걸으면서 발생 가능한 진동속도가 0.74cm/sec임을 고려하였을 때 탄약고 내부에서 활동하는 군인에 의해서도 저장탄약고가 안전하므로, 예측된 진동속도인 0.04cm/sec에 의해서도 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지중 구조물의 건설을 위한 발파작업이 지상의 탄약시설에 미치는 영향을 분석하기 위해 관련 국내·외 기준을 분석하고 판단절차를 사례연구를 통해 제시하였다. 이를 위해 보안구역을 관통하는 신안산선의 지반 시추공 정보를 이용하여 해당지역 발파 시 발생하는 진동속도를 수치해석을 통해 예측하고, 보안구역 내 위치한 저장탄약고의 안전성을 검토하였다. 보안구역의 등고선 및 탄약고 위치, 그리고 터널의 굴착 심도 등은 실시설계 안을 토대로 모델링하였으며, 가장 큰 발파하중이 작용되는 대규모 발파(표준발파공법)를 기준으로 지반의 발파진동속도를 도출하였다. 탄약고가 설치된 위치의 지표면에 대표절점을 설정하여 시간에 따른 발파 속도를 분석하였고, 국내·외 기준뿐만 아니라 인간의 활동에 의해 발생할 수 있는 지반 진동속도와 비교하여 저장탄약고의 안전성을 평가하였다.

발파진동속도 산정결과, A 부대와 B 부대, 그리고 C 부대에서 발생한 지반 발파진동속도는 유사하게 산정되었다. 다만, B 부대의 탄약고 3에서 터널의 낮은 굴착심도로 인해 다른 위치에 비해 매우 큰 발파진동 속도가 발생할 것으로 예측되었다. 이 경우에 예측된 진동속도는 0.04cm/sec로 이는 철근콘크리트 구조물인 이글루탄약고의 발파 안전기준 값인 2.5cm/sec의 약 1.6%이며, 건설교통부에서 제시한 서울 지하철 발파진동 허용값에서 문화재 및 정밀 기계 설치 건물에 대한 허용 진동 속도(0.2cm/sec, 최소 허용기준)의 약 20%로 구조물에 문제가 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 또한 군부대에 거주하는 군인들이 활동하는 동안 아무런 문제가 발생하지 않았던 점을 고려하면 터널 시공 중 발생하는 진동속도에 의해 보안구역 내의 탄약고 및 인접시설물에 파손을 유발하지 않을 것으로 판단된다.

다만, 탄약고 폭발 시 문제의 심각성(대량 인명피해, 인접 탄약고의 연쇄폭발 등)을 고려할 때 필수적으로 진동제어 발파를 실시해야 하며, 실시간 계측 및 보안지역 담당자와의 협조를 통해 안전성을 지속적으로 평가할 필요가 있다. 보안지역에서도 발파 전 탄약고의 노후화 및 안전성을 파악하여 보완할 필요가 있으며, 병력의 운용 등에 있어서 공사 진행 간 더욱 주의를 요할 것으로 판단된다. 이번 연구는 폭발현상에 대한 실증시험의 제한으로 유한요소해석을 이용해 안전성 평가를 진행하였다. 비록 탄약저장시설의 안전여부에 대한 충분한 판단근거는 제시하였으나, 보다 정확한 결과를 도출하기 위해선 추가적인 모델의 검증(Validation)이 요구된다. 또한, 현재 군에서 운용하는 재래식구조 탄약고, 이글루형 탄약고, 지하형 탄약고의 형태별 세부적인 발파진동 허용기준에 대한 추가적인 연구와 현대의 첨단기술이 접목된 최신형 탄약의 특징을 반영한 안전성 평가기준의 최신화가 후속연구로 진행되어야 할 것이다.

요 약

도심과 사회기반시설의 확장에 대한 수요로 인해 군사시설의 이전이나 시설의 지하화가 지속적으로 요구되고 있다. 그러나 탄약시설과 같은 시설을 횡단할 때에는 탄약이 우발적으로 폭발하지 않도록 고도의 안전성 평가가 선행되어야 한다. 이에 지중 구조물의 건설을 위한 발파작업이 지상의 탄약시설에 미치는 영향을 분석하기 위해 국방부와 한국철도시설공단간 협의에 의해 진행되는 신안선 복선 전철 설계구간 중 군사 보안구역을 통과하여 건설되는 터널구간에 대해 사례연구를 실시하였다. 폭발현상에 의한 진동의 속도를 수치해석 프로그램인 GTS-NX를 활용하여 예측하였고 문헌조사를 통해 모든 형태의 구조물에 대해서도 안전에 영향을 미치지 않는 0.2cm/sec의 지반진동속도를 안전성 평가기준으로 제시하였다. 본 연구에서 활용된 안전성 평가지표와 절차는 향후 탄약시설을 횡단하는 사회기반시설 계획 시 안전성 평가의 지표로 활용될 수 있을 것이다.

키워드 : 지상탄약저장시설, 지하구조물, 진동속도, 안전성 평가

ORCID

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

Kuk-Joo Kim, <http://orcid/0000-0002-9747-1807>

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

References

1. Kim JO, Cho YJ. A study on the proposals for improvement of the national emergency management system based on past disaster cases. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*. 2010 Sep;11(5):24-33.
<https://doi.org/10.6106/KJCEM.2010.11.5.24>
2. Park YJ, Son KY. The study on the sustainable sharing plans of military installations for a civil military con-existence. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*. 2016 Mar;17(2):110-7.
<https://doi.org/10.6106/KJCEM.2016.17.2.110>
3. Son MR, Jung YK, Yoo JS, Hwang YC, Moon DH. An analysis of explosion vibration standard. *Tunnelling and Underground Space Association*. 2013 Oct;15(5):29-42.
4. Lee JW, Ha IS, Oh BH, Shin DH. The explosion vibration case of real size dam. *Geotechnical Engineering*. 2011 Jul;22(7):8-15.
5. Singapore Power Assets. Material and Workmanship Specification, Design and Construction of East-West Transmission Cable Tunnel Contract EW2. Singapore: Rail and Engineering Groups; 2011. p. 8-15.
6. National Highway Institute. Rock Blasting and Overbreak Control. United States: Federal Highway Administration; 1991. 415 p.
7. Department of Defense, UFC 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. United States: Defense Technical Information Center; 2008. 16 p.
8. Stagg MS, Siskind DE, Stevens MG, Dowding CH. Effects of repeated blasting on a wood-frame house. United States: US Department of the Interior, Bureau of Mines; 1984. 47 p.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Tunnel standard specification. Seoul (Korea): Korean Tunnelling and Underground Space Association; 2015. 126 p.
10. Ministry of Employment and Labor. Explosion work standard manual: Act 26-94. Korea; 2018. 25 p.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Standard for permit of blasting noise and vibration. Seoul (Korea): Office of Audit and Inspection; 2002. 51 p.
12. Korea Land and Housing Corporation. Explosion noise and vibration tolerance standard. Korea; 2007. 64 p.
13. Starfield AM, Pugliese JM. Compressional Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charge: A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1968 Jan;15(1):65-77.
14. Lysmer J, Wess G. Shear waves in plane infinite surface. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*. 1972 Jan; 98(1):85-105.