

탄약시험장의 강재 방호구조물 적용성 분석 연구

한재덕* · 김동희** · 김성곤***

Han, Jae Duk*, Kim, Donghee**, Kim, Sungkon***

Feasibility Study of a Corrugated Steel Protective Structure for Ammunition Test Facility

ABSTRACT

Harmful factors such as shock waves and fragments are generated at domestic ammunition testing sites and military shell shooting training sites due to frequent shooting and explosion tests. As a result, complaints from local residents are rapidly increasing, and there is a high risk of damage to facilities and human life. The recently constructed ammunition test site built a test facility for firing artillery and rocket propulsion in a narrow area with a radius of 300 m due to site restrictions, but damage to the facility is accumulating because there is no adequate protective structure. Therefore, in this study, quantitative data on harmful factors such as noise, vibration, shock wave, and thermal effect generated between artillery firing and rocket propulsion tests were measured, and explosion pressure characteristics were analyzed to design a protective structure, and use Autodyn to protect performance. to perform verification.

Key words : Protective structure, Shock wave, Ammunition test site, Military facility

초 록

국내 탄약 시험장과 군의 포탄 사격 훈련장은 잦은 사격과 폭발 실험으로 인해 충격파와 파편 등의 유해인자가 발생한다. 이에 따라 지역 주민의 민원이 급증하고 있으며 근접한 시설물과 인명피해의 위험이 크다. 최근 건설된 탄약 시험장은 부지확보 제한에 따라 반경 300 m 이내의 좁은 지역에서 화포 사격 및 로켓 추진기관 연소시험 시설을 구축하였으나 적절한 방호구조물이 없어 시설물 피해가 누적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 화포 사격 및 로켓추진기관 실험 간 발생하는 소음, 진동, 충격파, 열 효과 등 유해인자에 대한 정량적 데이터를 측정하고 폭발 압력 특성을 분석하여 탄약 시험장의 강재 방호구조물 적용 연구를 수행하였다.

검색어 : 방호구조물, 충격파, 탄약 시험장, 군 시설

1. 서론

국방 연구 분야는 폭발물의 취급이 필연적으로 요구되어 위험성을 상시 내재하고 있으며 탄약 제조, 사격 실험에 의한 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 따라서 폭발에 의한 사고는 인명피해의 위험성이 매우 높으며 이를 저감 하기 위한 연구가 필요하다. Table 1은 실험 중 탄약 폭발에 의한 인명사고 사례이다.

* 정회원 · 서울과학기술대학교 국방방호공학과 박사과정 (Seoul National University of Science and Technology · jaeduk@seoultech.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 국방기술품질원, 서울과학기술대학교 국방방호공학과 석사과정

(Corresponding Author · Seoul National University of Science and Technology · hee1420@seoultech.ac.kr)

*** 종신회원 · 서울과학기술대학교 국방방호공학과 교수, 공학박사 (Seoul National University of Science and Technology · skkim@seoultech.ac.kr)

Received November 24, 2021/ revised March 11, 2022/ accepted June 8, 2022

Table 1. Cases of Casualties Caused by Ammunition Explosions

Division	Case	Note
development test	K-9 howitzer shooting system development test	'97 year
Ammunition Stockpile Reliability Program		Explosions during a guided missile test
development test	155 mm fuse development test	'09 year
acceptance test	K-9 howitzer barrel test	'15 year
development test	Explosions during a propellant fuel test	'19 year
Produce	Solid Propulsion Engine Filling Manufacturing	'19 year

최근 건설된 탄약 시험장은 부지확보 제한으로 강원도 전방에 있는 군 훈련장을 인수하여 건설되었으나, 반경 300 m 이내 공간에서 155 mm 화포 시험, 로켓 추진기관의 지상연소시험, 방탄시험 등 다양한 종류의 탄약 성능시험을 하고 있다. 이에 따라 시험 중 폭발사고로 인한 위험성이 국내 탄약 시험장 중 가장 높으며 이에 대한 대비책 마련이 요구되는 실정이다.

폭발 하중의 이론적 산출 방법은 압력, 화학적 조성, 임펄스, 폭발에너지에 의한 산정 등 다양한 연구 문헌들이 존재하지만, 최대압력과 임펄스 등 주요 인자들의 변동성이 크다. 폭발 하중은 Zehrt and Lahoud(1994)의 비교 자료에 따르면 폭발 실험 데이터와 TNT 등가 환산치의 오차는 20~30 % 발생되며, 최대 50 %까지 관측된 사례를 보인다. 따라서 폭발 압력의 이론적 산출 방법은 신뢰성에 매우 취약하다.

Luccioni et al.(2004)은 실제 테러 공격을 받은 건물의 피해 형상을 바탕으로 Autodyn을 활용하여 건물이 붕괴하는 과정을 재현하였고 구조물의 수치해석 시 TNT 폭약을 기폭 하여 데이터를 확보하여 폭발 하중 매개변수를 적용하였다. 국내 선행연구 사례로써 Kim(2002)은 TNT, C4 등의 폭약을 기폭 하여 강재 재료의 방호성능 검증 연구를 진행하였고 탄약고, 지주포 포상 등 군 시설물 설계에 적용하였다. 한편, 선행된 연구는 적 공격에 의한 단발적인 피해 요소를 고려하였으나, 탄약 시험장은 실험 종류에 따라 폭발 하중 지속시간(Explosion load duration)이 상이하어, 고려해야 할 변수가 다르다. 특히 로켓 추진기관의 연소시험의 경우는 3sec~13sec 지속시간을 가지고 폭발 압력이 형성됨으로써, 장기 폭발 하중의 특성으로 볼 수 있다(Denny and Clubley, 2019). 탄약 시험 간 발생하는 충격파(Shock wave)는 탄약 종류별 방향성과 압력의 크기, 소음 수준 등 다양한 물리적 거동 형태를 가지고 있어, 정확한 분석 및 대응책 마련을 위해서는 실증 실험을 동반한 분석이 요구된다. 따라서 탄약 시험장에서 발생하는 피해효과를 분석하기 위해 물리량 계측, 수치해석을 통한 방호성능과 경제성을 고려한 방호구조물의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 안전거리 확보가 미흡하여 인명사고 위험성이 높은 탄약 시험장을 대상으로 화포 사격 시험, 로켓 추진기관 지상연

소시험 시 발생하는 충격파(shock wave) 특성 분석과 충격파, 폭발 열, 소음, 진동 수준에 대한 실험 계측을 통해 피해효과를 예측하고 이에 대비하기 위한 방호구조물 적용성 연구를 연구하였다.

2. 폭발 하중 특성

2.1 폭발효과 및 하중 분류

충격파는 폭발원점 위치에 따라 구조물에 작용하는 폭발파의 특성이 달라진다. 폭발에 의해 방출되는 에너지는 매우 높은 온도의 가스로 변환되어 압력 선단이 강한 충격파로 주변 대기 중으로 전파된다. 비 구속 상태에서의 폭굉(Detonation)에 의한 충격파가 초음속으로 주변 대기 중으로 이동하는데, 미 국방성의 통합시설 기준 UFC (Unified Facilities Criteria)에서 제시하는 폭발 압력에 대한 시간 이력 곡선은 아래 Fig. 1과 같다.

폭발파의 도달 전 압력은 대기압(P_0)상태에서 최대입사압력(P_s , peak overpressure)으로 빠르게 증가하며, 음압(negative pressure)으로 감소하였다가 대기압(P_0)으로 복구되는 경향을 보인다. 폭연(deflagration)의 경우, 압력은 시간에 따라 서서히 증가하여 최대값은 폭굉(detonation)에 의한 압력보다 상당히 낮게 나타난다. 이때 발생하는 최대입사압력, 임펄스 그리고 작용 시간(T, duration of positive pressure)은 방호구조물 설계에 유효하게 적용되는 인자이다.

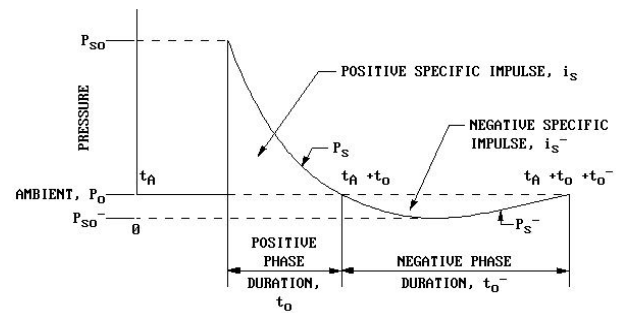


Fig. 1. Pressure-Time Variation in Free Space Explosion (UFC 3-340-02)

Table 2. Explosive Load Classification

Explosive load classification			
explosive restraint	classification	pressure load	protective structure
unconstrained explosion	1. Atmospheric Explosion	a. non-reflection	shelter
	2. Air Explosion	b. reflect	
	3. Ground Explosion	b. reflect	
restraint explosion	4. Complete exhaust explosion	c. internal shock d. leak	bulkhead
	5. Partial Confinement Explosion	c. internal shock e. internal gas d. leak	shielding structure shelter.
	6. Fully Confinement Explosion	c. internal shock e. internal gas	Fully shielded structure

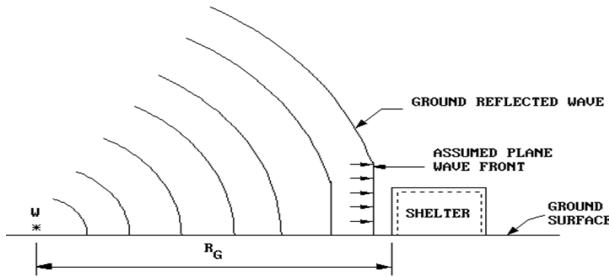


Fig. 2. Ground Explosion (UFC3-340-02)

폭발 하중은 Table 2와 같이 폭발물의 구속 여부에 따라 구속폭발 (confined explosion)과 비 구속 폭발(unconfined explosion)로 구분할 수 있으며, 구조물의 형태, 폭발 거리 등에 의해 세부적으로 나눌 수 있다.

탄약 시험장에서는 지면과 약 1 m 높이 사격 마운트에 탄약을 장전 또는 거치하여 사격함으로써, 지표면과 근접하여 폭발 하중을 형성한다. 따라서 Fig. 2와 같이 지면 폭발로 구분할 수 있으며, 사격 후 발생하는 충격파는 초기 위치에서부터 입사파와 반사파가 중첩되어 형성된다. 이러한 지면 폭발의 특성은 공중폭발보다 더 큰 폭발 하중이 전달된다.

3. 탄약 시험장 폭발 하중 특성의 실험적 분석

3.1 연구 대상 시설

탄약 시험장은 아래 Fig. 3과 같이 배치되어 있으며 2014년도에 완공되었다. 화포 시험 진지에서는 곡사포와 전차 탄약의 사격 시험을 진행하는데 250 m 떨어진 거리에 있는 종말탄도실 내부로 발사하여 성능평가를 수행하고 있다. 방탄 시험장은 콘크리트 건물의 실내시험장으로써 화포 시험 진지에서 약 50 m 떨어진 거리에 있으며 지상연소시험장은 약 80 m에 떨어져 있다. 이처럼 155 mm 곡사포 탄약이 비행하는 사선에 각종 시험 시설물이 노출되어 위험성이 매우 높다.

3.2 화포 사격 시 충격파 특성 분석

화포 시험 간 발생하는 폭발 압력의 형성 과정은 3단계 구성되며, 첫째로는 공기 분출로 발생하는 충격파(shock wave)가 형성되며, 둘째로는 포탄 이탈로 발생하는 탄자 파열파(Projectile burst shock wave), 셋째로는 포탄 이탈 후 추진 가스의 분출로 인해 발생 되는 폭풍파(Propellant shock wave)이다. 충격파 경계를 둘러싸고 원형으로 형성되는 것이 가스 기동이며 내부에는 배럴 충격파(Barrel shock)와 마하 효과(Mach effect)가 존재한다(Lee and Hong, 2016). 다음 Fig. 4와 같이 화포 사격 시 발생하는 충격파를 도식화하였다.

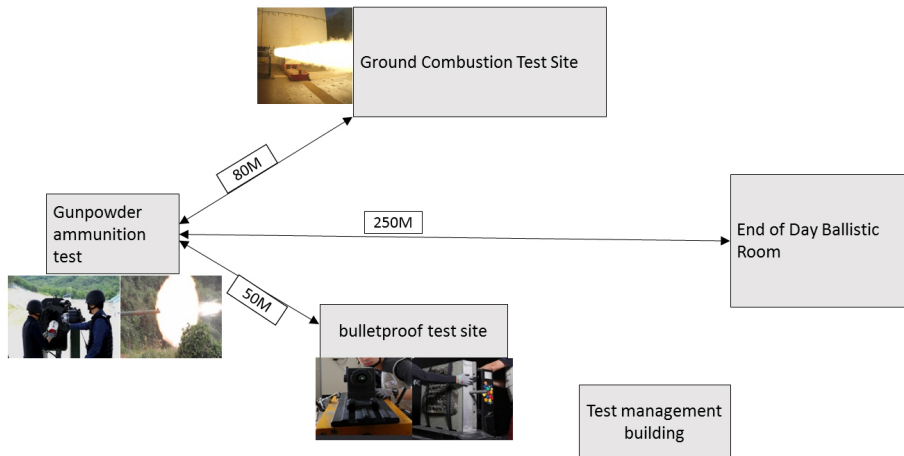


Fig. 3. Ammunition Test Site Facility Location

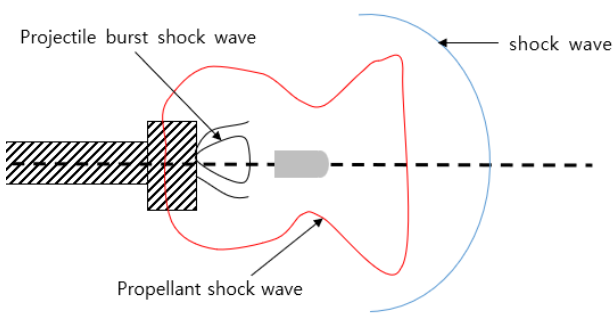


Fig. 4. Cannon Fire Shockwave Characteristics

3.2.1 화포 사격 시 소음측정 실험

화포 사격 시 소음 수준을 확인하기 위해 아래 Fig. 5와 같이 실험을 설계하였으며 측정 결과는 Table 3과 같다. 실험에 사용된 화기는 155 mm 곡사포이며 탄약은 M119 계열 추진장약을 사용하였다.

소음 데이터의 분포를 보면 약 160 db 이상의 수치가 계속되었으며, 시험진지 후방(N-2)의 경우 175.8 db의 가장 큰 수치를 보였다. 일반적으로 충격파에 의한 소음은 포구 측방에서의 소음의 크기가

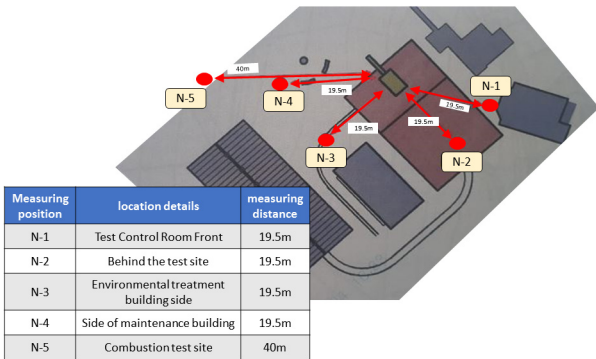


Fig. 5. Noise Measurement Location

Table 3. Noise Measurement Result

Measuring position	Measurement result		Distance conversion (building location)		
	distance (m)	Peak (db)	distance	distance attenuation (db)	Peak (db)
N-1	19.5	169.0	19.5 m	0	169.0
N-2	19.5	175.8	-	-	-
N-3	19.5	171.2	12.8 m	+3.7	174.9
N-4	19.5	170.5	26.6 m	-2.7	167.8
N-5 (G.T)	40.0	163.5	100 m	-8	155.5

* Attenuating the distance of the point sound source: $db = SPL(\text{measurement}) - 20 \log [\text{Separation distance}/\text{Measurement distance}]$

높으나, 시험진지 상부 구조물(덮개)에 의해 충격 소음이 반사되어 오히려 후방 지역의 소음이 높게 측정된 것으로 사료 된다. 연소시험장 입구까지는 163.5 db의 크기를 보였으며, 연소시험장에서의 소음은 약 155.5 db의 수치를 가진다. 소음·진동관리법의 소음 규제 기준에서 제시하는 공사장 발파작업 최대치는 80 db이며, 이보다 2배 이상의 소음이 발생하고 있다.

3.2.2 화포 사격 시 진동 측정 실험

화포 진지와 근접한 건축물의 진동 측정을 위해 아래 Fig. 6과 같은 위치에 진동 센서를 설치하였으며, 측정 결과는 Table 4와 같다. 측정 데이터 분포를 살펴보면, 진지 후방에 있는 시험통제실 1층과 환경처리동 벽면이 진동 기준(국도공사 전문시방서 3.3 발파 계획) 대비 초과하는 것을 알 수 있다. 특히 환경처리동(V-3)의 경우 포구와 가장 근접하여 있어 기준 수치에 2배에 달하는 측정 결과가 확인되었다. 이에 따라 진동 저감을 위한 방호구조물 적용이 요구된다.

3.3 추진기관 연소시험 충격파 특성 분석

추진기관의 충격파는 점화 직후 추진제의 고온 연소생성물이 노즐을 통해 공기 중으로 팽창, 방출되면서 발생한다. 연소시험 시 발생하는 배기 화염(Exhaust plume)은 다양한 위험 요소를 가지고 있는데 연소 초기에는 충격파와 점화기에 의한 파편이 형성되며 연소 중에는 적외선, 가시광선 등의 복사기파를 방출하고,

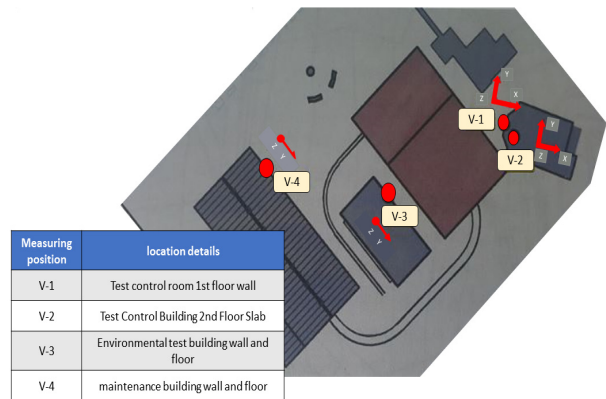


Fig. 6. Vibration Measurement Position

Table 4. Vibration Measurement Result

Measuring position	vibration speed (cm/s)			vibration standard	against the standard
	X	Y	Z		
V-1	0.45	4.61	1.04	1.0 ~ 4.0 (cm/s)	Excess
V-2	0.53	0.88	0.95		satisfied
V-3	-	9.11	0.97		Excess
V-4	-	2.65	0.31		satisfied

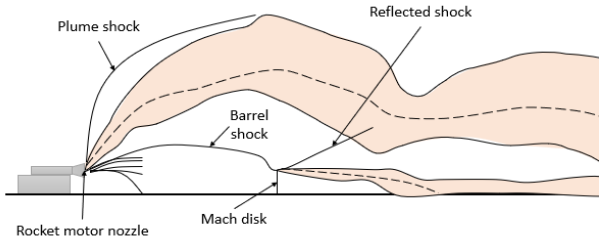


Fig. 7. Exhaust Flame Structure (Davenas (ed), Solid Roker Pergamon Press)

유독성 연소가스를 생성한다. 배기 화염의 형태는 대기 온도, 습도, 구조물 위치 등 주변 환경에 따라 특성이 현저히 달라지며, 매우 복잡한 형태의 충격파가 발생한다. 또한 지반과 구조물 충격에 의한 반사압의 형태로 압력의 세기가 증폭된다.

추진기관 노즐과 가까운 배기 화염 구간은 비점성 특성을 가지며, 배기 화염 코어를 중심으로 둘러싼 충격파가 발생 된다. 이후 화염 후면에서는 이음속 유동으로 바뀌고 마하 디스크 밖에서는 초음속 유동이 지속되며 충격파는 지면과 충격 되며, 마하 효과(Mach Stem Effect)가 연소 중 지속 발생 된다. 추진기관의 배기 화염 중심온도는 1,200 °C ~ 2,800 °C 정도의 특성(Dash, 1993)을 가지며 방호구조물 배치 전 폭발열에 의한 구조 영향성 검토가 요구된다. Fig. 7은 추진기관의 초기 배기 화염의 단면 구조를 나타내었다.

3.3.1 추진기관 연소시험 충격파 계측실험

로켓 추진기관 지상연소시험에서 발생하는 충격파를 계측하기 위해 아래 Fig. 8과 같이 실험을 설계하였다. 추진기관의 노즐 끝단 약 8 m 지점에 폭발압력 센서를 사용하고, 열 영상 카메라 (thermal imaging camera) 촬영을 통해 배기 화염의 거동과 온도분포를 확인하였다. Data 취득을 위해 200~500kHz의 높은 샘플링 속도로 신호들을 수집할 수 있는 Dewetron사의 계측시스템을

Table 5. Shock Wave Measurement Result

division	Measurement point (P1)	Measurement point (P2)
Maximum overpressure (psi)	2.79	2.11
Maximum overpressure arrival time (ms)	40.71	45.756
Positive pressure impulse (ms psi)	5.83	6.10
distance (m)	2.5	4.7

통해 데이터를 확보하였으며 영상 계측 장비는 초당 5,000 frame 촬영이 가능한 초고속 카메라를 설치하였다.

순간적인 충격파가 발생하는 화포 사격 실험과 다르게 지상연소 시험의 폭발압력과 배기 화염이 지속해서 발생함에 따라 주변 대기 온도가 급격하게 상승하였다. 이에 따라 배기 화염 후방에 설치된 센서 케이블이 손상되어 측정에 실패하였으며 배기 화염 열과 노출이 적은 충격파 발생 초기 지점에 센서를 설치하였다. 실험 결과 Table 5와 같이 최대압력은 폭발원점과 근접한 P1 지점에서 최대압력 2.79 (psi)가 측정되었다.

3.3.2 배기 화염 온도 분포 측정

연소시험동 전방부 폭발열 분포를 계측 함으로써 구조물의 형상 설계를 검토할 수 있다. 따라서 연소시험동 건물 주변으로 확산하는 화염의 온도를 측정하였다. FLIR사의 A615 열 화상 카메라를 활용하여 배기 화염의 폭발열을 계측하였으며, 측정 가능한 온도 범위는 -20 ~ +150 °C, +100 ~ +650 °C, +300 ~ +2,000 °C이며 정확도는 ±2 °C이다.

배기 화염의 열 영상 계측은 Fig. 9와 같이 Protective roof 구간의 열 분포를 계측하였으며 배기 화염의 확산 후 Protector cage 후방 구간에서 250 ~ 300 °C의 열 분포가 형성되었다.

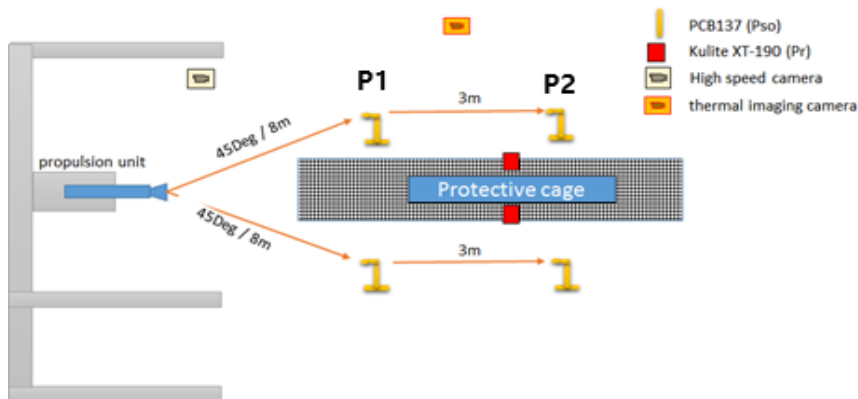


Fig. 8. Shock Wave Measurement Location

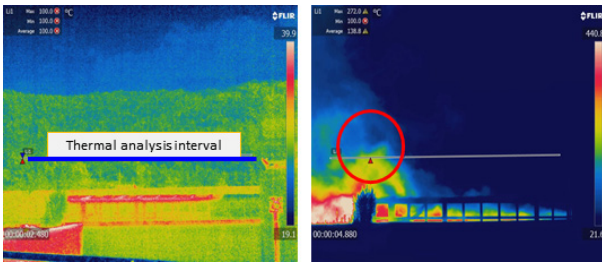


Fig. 9. Exhaust Flame Thermal Imaging

4. 탄약 시험장 방호구조물 적용 분석

4.1 화포 시험장 방호구조물 적용 방안

화포 사격 진지와 시설물 사이의 안전거리를 만족할 수 없는 경우, 이에 대한 조치방안으로 방호벽을 고려할 수 있을 것이다. 기획 단계에서 이를 고려하지 않고 방호구조물을 적용하면 비경제적인 결과가 도출될 수 있다. 아래 Fig. 10은 15 m 높이 건물에 대해 방호벽을 5 m 높이로 적용하거나, 지형 단차를 3 m 두는 경우 비교 검토 결과이다. TNT 100 kg, 거리 15 m에서 폭발할 때의 방호벽 유무의 결과를 비교하면 폭압 수준은 약 5배, 최대

임펄스는 대략 2배까지의 차이를 보인다. 따라서 방호구조물의 배치와 형태를 고려하여 방호능력의 향상과 경제적인 설계가 필요하다.

따라서 화포 시험진지 주변은 방호벽을 적용하여 폭발 압력을 줄이는 것이 가장 효과적이며 아래 Fig. 11과 같이 개념도를 제시하였다. 방호벽의 외부 재료는 강성이 우수한 초대골형 파형강판을 적용하여 파편 물질에 대한 회생 패널의 기능이 가능하다.

지반충격에 의한 진동 영향은 3.2.2항의 화포 사격 시 진동 측정실험에서 살펴본 바와 같이 주변 시설에 막대한 피해를 준다. 화포 사격 시 발생하는 진동 저감 검토를 위해 Table 6과 같이 흡음재료 특성을 비교·분석하였다. 금속형 발포 알루미늄은 콘크리트, 세라믹 등 타 재료보다 흡음성, 내화성, 안정성이 우수하며 가장 경제적인 대안이다. 따라서 진동 영향을 감소 하는 방안으로써 방호벽 중간 채움은 발포 알루미늄을 적용하였다.

4.2 지상연소시험장 방호구조물 적용 방안

지상연소시험장의 방호구조물 적용에 있어 검토가 필요한 주된 요소는 폭발 압력과 배기 화염에 의한 열 효과이다. Fig. 12와 같이 탄약 시험장 방호 시설 적용을 위한 시공법 검토 시 공사 기간 단축, 경제성, 유지보수 등 가장 효율적인 공법은 파형강판을

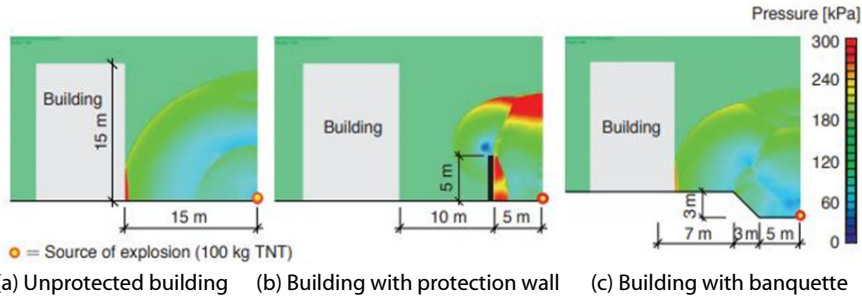


Fig. 10. Numerical Analysis of Firewall Application (Gebbeken, 2010)

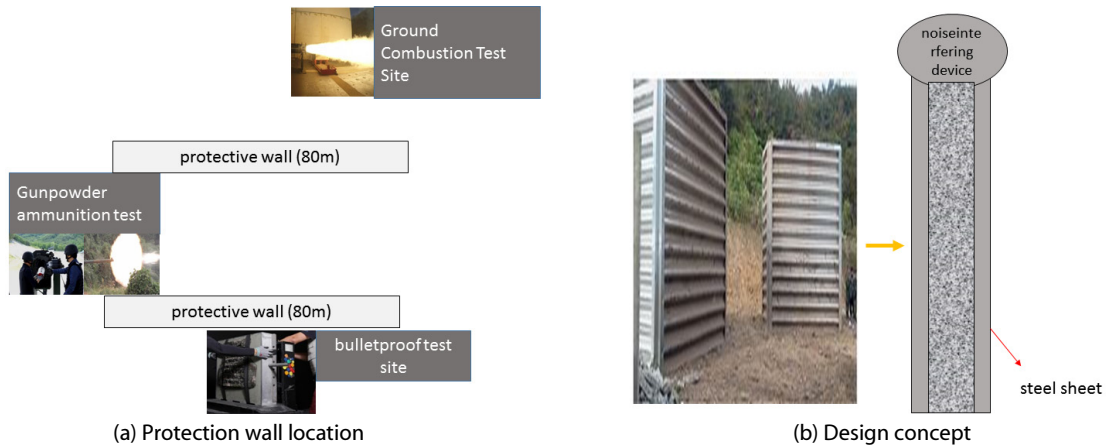


Fig. 11. Protection Wall Location, Design Concept

Table 6. Comparison of Sound Absorbing Material Properties

division		metallic		polymer type		concrete	ceramic
material		foamed Al	powder	PE	PU	con+sand	ceramic
function	sound absorption	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	thickness	9 t	1.6 t	50 t	50 t	100 t	50 t
	fire resistance	780 °C	700 °C	poor	poor	Good	very good
	durability	good	good	average	average	Good	Good
	stability	good	good	average	average	Good	Good
	recycle	good	good	average	impossible	possible	impossible
	moisture resistance	None	None	Influenced	Influenced	None	None
	selection	○	○	-	-	-	-

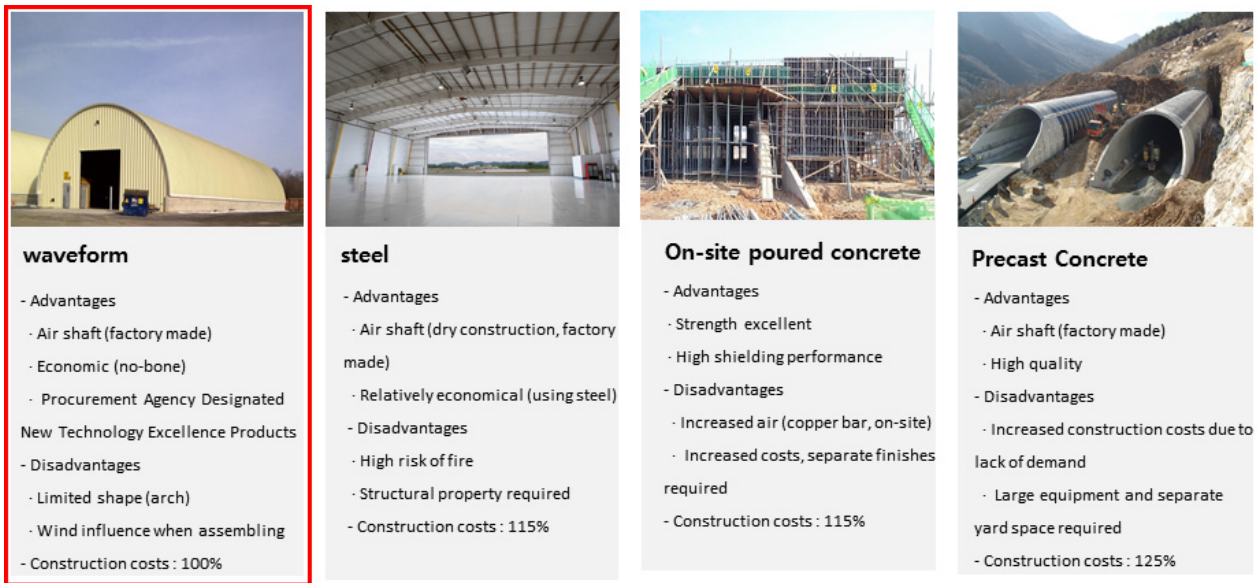


Fig. 12. Comparative Analysis of Construction Methods

활용한 시설 구축으로 판단하였다. 따라서 연소시험동 내부에서 발생하는 유해인자로부터 대비하기 위한 구조물은 파형강관 방호 터널이 가장 효과적인 방안으로 판단된다.

방호 터널은 배기 화염 발생 시 고온의 열에 노출되며 이에 따라 방호 터널 높이를 9.5 m를 확보할 수 있도록 상세 설계가 요구되며 이를 방지 하기 위한 플레임 체크 SS-130 내화 도장을 적용한다. 파형강관은 용융아연도금 처리를 통해 강관 구조물 내구성 향상에 가장 효율적인 방안이다. 용융 아연도금은 희생적 방식 특성을 갖는 아연이 철과 합금층을 이루어 견고히 부착되며 치밀한 보호 피막을 형성한다. Table 7은 일반도장과 용융아연도금을 비교 분석한 것으로 일반도장에 비해 내구성과 경제성이 우수함을 알 수 있다.

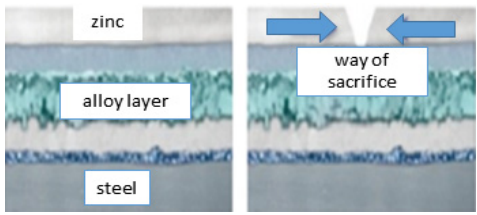
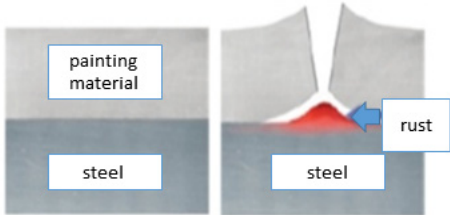
연소 시험동의 방폭 터널형 방호구조물 구축을 통해 산불, 시설, 인명피해에 대한 방호가 요구되며 Fig. 13은 방호 터널의 개념도이다.

5. 결론 및 분석

탄약 시험장에서 발생하는 폭발 하중, 소음, 진동 등 유해인자에 대한 물리량 계측을 수행하여 정량적 데이터 획득하여 구조물에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 토대로 경제성과 효율성을 고려한 방호구조물 적용 방안연구를 수행하였으며, 본 연구를 통해 얻은 분석 내용은 아래와 같다.

첫째, 화포 시험 진지에서의 발생하는 유해인자의 소음은 약 160 db 이상의 수치를 보였으며 이는 청각, 폐 손상 등 인명피해 발생 위험도가 높다. 진동 측정 결과 포구에서 19.5 m 떨어져 있는 시설물이 허용 진동 기준 범위를 초과하여 안정성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 이를 대비하기 위한 방호벽 적용 시 폭발 저감의 효과성을 검토하였고 충격 흡수 재료를 비교 분석하여 효율적으로 폭발을 저감 할 수 있는 방호벽 구조물의 개념 안을

Table 7. Comparison of Hot Dip Galvanizing and General Coating

Division	Hot dip galvanizing	General painting
Construction method	· Drying after immersion in the plating furnace	· Direct spraying on the surface
Drawing		
Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> · Sacrificial corrosion suppression · Excellent adhesion effect · good quality 	<ul style="list-style-type: none"> · Regular maintenance required · Weak adhesion
Economics	<ul style="list-style-type: none"> · Reduction of labor cost · good durability 	<ul style="list-style-type: none"> · Repainting required
Useful life	<ul style="list-style-type: none"> · Based on zinc adhesion amount of 900g/m² - Coastal area: 65 years - Suburban area: 120 years - Urban area: 50 years 	<ul style="list-style-type: none"> · Confirmation through facility inspection

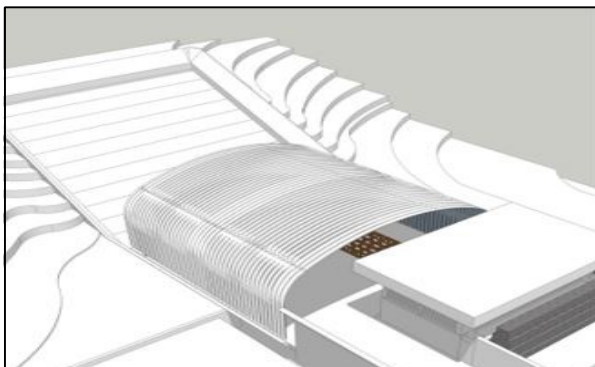


Fig. 13. Ground Test Site Protective Structure Concept

제시 하였다.

둘째, 지상연소시험장에서 발생하는 충격파(Shock wave)는 추진기관 노즐 폭에서 2.5 m 떨어진 지점에서 2.79 Psi의 입사압이 계측되었으며 미 국방성 자료(DoD Explosives Safety Board Technical Papers) 따르면 콘크리트 건물 노출 시 균열을 발생시키는 수준임을 확인하였다. 폭발열 계측 결과, 배기 화염확산 후 약 9 m 높이에서 250 ~ 300 ℃의 열 분포가 형성되었다. 방호구조물 구축을 위한 시공법 검토 결과, 파형강판 재료의 방호터널형 구조물의 형상을 제시하였고 용융이연도금과 내화 도장을 통해 유해인자에 대한 방호성능을 만족할 것으로 판단된다.

폭발 현상에 대한 실험은 위험성 평가, 탄약확보, 안전 통제, 시험설계 등 절차가 매우 까다로우며 ms 단위의 매우 짧은 시간에 데이터를 측정하고, 시료는 소멸하는 원샷 디바이스(one-shot

device) 1회성 실험으로써 충분한 데이터의 확보는 제한적이었다. 그러나 실험 결과를 토대로 유해인자에 대한 위험 수준을 확인할 수 있었으며 방호구조물 적용성 분석이 가능하였다. 후속 연구에서는 탄약 종류별 데이터를 추가 확보하고 파편에 의한 방호성능 확인을 위해 강판 재료의 방탄 시험을 진행할 예정이다. 본 연구에서 수행한 물리량 계측 실험 데이터와 방호구조물 적용성 분석을 토대로 향후 구조물의 수치해석, 상세 설계, 시공을 위한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 19SCIP-B146646-02)의 지원의 일환으로 수행되었습니다.

본 논문은 2021 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Dash, S. M. (1993). *Rocket motor plume flow field phenomenology and simulation*, In AGARD, Rocket Motor Plume Technology 30 p (SEE N94-15217 03-20), Science Applications International Corp., Fort Washington, PA.
- Denny, J. W. and Clubley, S. K. (2019). “Long-duration blast loading & response of steel column sections at different angles of incidence.” *Engineering Structures*, Vol. 178, pp. 331-342.

- Gebbeken, N. (2010). "Explosion protection-architectural design, urban planning and landscape planning" *International Journal of Protective Structures*, Vol. 1, No. 1.
- Kim, U. Y. (2002). *A study on the application of steel materials for military facilities*, Ministry of National Defense (in Korean).
- Lee, H. S. and Hong, J. H. (2016). "On the installation of shielding materials to reduce canvas noise." *An Experimental Study on Korean Journal of Military Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 453 (in Korean).
- Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D. and Danesiad, R. F. (2004). "Analysis of building collapse under blast loads." *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 1, pp. 63-71.
- Zehrt, W. and Lahoud, P. (1994). *Acceptable reinforcing steel splices for blast resistant concrete structures designed in accordance with TM 5-1300, "Structures to resist the effects of accidental explosions"*, U.S. Army Corps of Engineers, Huntsville Division, USA.