

지상연소시험장 방호구조물의 수치해석을 통한 성능평가

김동희^{a,*} · 황경섭^a · 조시현^a

Performance Evaluation Through Numerical Analysis of Ground Firing Test Site Protective Structure

Dong-Hee Kim^{a,*} · Gyeong-seop Hwang^a · Si-Hyeon Cho^a

^aDefense Agency for Technology and Quality, Defense Firing Test Center, Korea

*Corresponding author. E-mail: hee1420@gmail.com

ABSTRACT

In order to build protective facilities and structures in the defense field, a prior review of the impact of explosion pressure on the structure is necessary, and the protection performance for expected explosion conditions must be satisfied. Accordingly, the Ministry of Defense's protection design standards have been established and standards for military facilities have been established, but special facilities such as ground combustion test sites are not presented. Therefore, in this study, the protection performance evaluation process of the ground combustion test site protective structure was established and the protection performance evaluation was performed by performing finite element analysis using LS-DYNA to analyze the interaction of explosion pressure.

초 록

국방 분야 방호시설 및 구조물을 구축하기 위해서는 폭발압력이 구조물에 미치는 영향에 대한 사전 검토가 필요하며, 예상되는 폭발 조건에 대한 방호성능을 만족하여야 한다. 이에 따라 국방부는 방호 설계기준을 정립하여 군사시설물에 대한 표준을 정립하였으나, 지상연소시험장과 같은 특수시설물에 대해서는 제시되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 지상연소시험장 방호구조물의 방호 성능 평가 프로세스를 정립하고 폭발압력의 상호작용 분석을 위해 LS-DYNA를 활용한 유한요소해석을 수행하여 방호성능평가를 수행하였다.

Key Words: Protective Structure(방호구조물), Ground Firing Test(지상연소시험), Solid Rocket Motor(고체 로켓 모터), Protection Performance Evaluation(방호성능평가)

1. 서 론

로 인해 재산 및 인명 피해가 발생할 수 있다. 또한, 고체 추진기관을 취급하는 시험장 특성상 탄약의 비정상 폭발로 인해 안전사고가 발생할 우려가 있다. 군사용 탄약과 같이 폭발물의 실험을 수행하는 연구시설은 적절한 방호구조물을 구축하여 안전사고의 위험성을 감소시킬 필요가 있다. 방호구조물을 구축하기 위해서는 폭발압력, 열 등 유해인자가 구조물에 미치는 영향에 대한 충분한 검토를 수행하여 구조물 설계에 반영하는 절차가 필요하다.

국내 군사시설물은 국방·군사시설 기준에 의해 표준화된 설계도에 의해 구축되고 있다. 강재를 이용한 방호구조물은 DMFC 3-90-60의 설계 기준을 적용하며, 강재의 압축력 및 휨 모멘트를 포함하는 설계 단면력에 대한 검토를 수행한다[1]. 한편, 국방·군사시설 기준에서는 탄약고, 포상, 유개호 등의 군사시설에 대한 방호 및 설계기준을 제시하고 있으나, 폭발물의 시험시설은 설계기준이 제시되고 있지 않다. 따라서 지상연소시험장 방호구조물 구축을 위해서는 보호 대상 및 목적, 지형구조, 시설 배치 등을 고려한 별도의 프로세스를 수립하고, 폭발과 방호구조물의 상호작용을 검토하여 안전성을 검증해야 한다.

기존 연구에서는 고체 추진기관 시험 중 발생하는 압력 및 열 데이터를 확보하여 최대압력(Peak pressure)과 배기 화염 발생에 따른 구조물의 열 영향성을 검토하여 기초 형상 설계를 수행하였다[2]. 후속 연구가 필요한 내용으로 고체 추진기관의 비정상 폭발 또는 외부 포격이 방호구조물에 미치는 영향을 검토하는 것이다. 그러나 폭발 실험은 장소, 비용 및 안전성 등의 이유로 국내에서 수행하기에는 현실적으로 제한된다. 이러한 실제 실험을 유한요소해석으로 대체 할 수 있으며, 유한요소해석을 이용한 기존 연구는 일부 수행되었다.

유한요소해석을 이용한 방호구조물의 성능 검토는 재현실험 또는 이론 수식에 의한 평가 방법보다 효과적인 것으로 알려져 있다[3]. 대표적인 폭발압력 해석 프로그램으로는 LS-DYNA와 AutoDyne 등이 있으며, 콘크리트, 강재와 같은 다양한 재료의 물성 정보를 제공하여 구조물, 콘

크리트 구조 및 각종 부재에 대한 폭발효과와 구조물 응답 특성에 대한 수치해석 등 다양한 연구 분야에 사용되고 있다[4-7].

본 연구에서는 국방·군사시설 설계기준에 제시되지 않은 방호구조물의 성능 평가를 위한 프로세스를 정립하고 고체 추진기관의 비정상 폭발에 의한 구조물 내부 폭발(Case 1)과 포격에 의한 외부 폭발(Case 2) 조건을 설정하였으며, 방호구조물과 폭발압력의 상호작용 분석을 위해 LS-DYNA를 활용한 유한요소해석을 수행하여 방호성능평가를 수행하였다.

2. 지상연소시험장 폭발압력 특성

화약류가 폭발할 경우 매우 높은 온도의 기체 형태로 변환되고 매우 강한 충격파(Shock Wave)가 생성되어 공기 중으로 빠르게 이동한다[3]. 화약류의 폭발압력이 주변 구조물과의 간섭이 없는 비 구속 상태에서는 폭굉(detonation)에 의한 충격파가 초음속으로 주변 대기 중으로 이동하는데, 폭발압력의 시간 이력 곡선은 아래 Fig. 1과 같다.

충격파의 진행 이력은 대기압(P_0)상태에서 최대압력(Peak pressure)으로 빠르게 증가하였다가 음압(Negative pressure)으로 급감하는 형태로 진행하며 말기 단계에서는 서서히 대기압(P_0)으로 복구되는 경향을 보인다. 이때, 양압(Positive pressure) 구간에서의 최대압력과 유효 임펄스(Positive specific impulse)는 구조물과의 직접적인 피해 유발 요소로 작용한다[8]. 따라서 방호

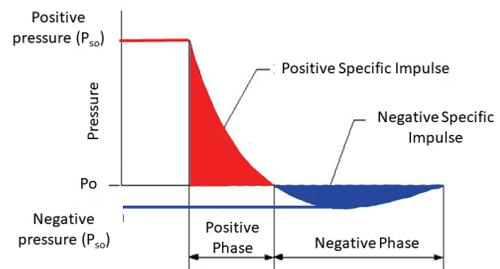


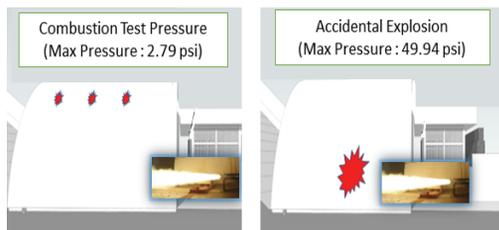
Fig. 1 Pressure-time variation in free-space explosions.

구조물의 성능 평가에 있어 폭발물의 종류 및 폭발압력 특성의 선행연구가 요구된다.

기존 연구를 통해 충격과 및 열 영향의 확인 결과 지상연소시험 진행 시 발생하는 폭발압력은 추진기관 노즐 목에서 2.5 m 떨어진 지점에서 최대압력은 2.79 psi로 나타났으며, 배기 화염의 최대온도는 286.5 °C로 발생하였다[2]. 고체추진기관의 지상연소시험 중 발생하는 압력은 폭연(Deflagration)의 특성으로 폭굉(Detonation) 특성보다 연소시간이 길며 최대압력은 상당 수준 낮게 형성되었다[2].

탄약의 우발적 폭발을 가정하였을 경우 급격한 압력 상승을 동반하는 폭굉의 특성을 보이며 구조물에 더욱 심각한 영향을 주게 된다. 따라서 기존 선행연구를 통해 확인된 고체 추진기관의 지상연소시험과 고체 추진기관의 비정상 폭발 시 발생하는 압력 수치를 비교하여 구조물의 거동 특성을 아래 Fig. 2와 같은 조건에서 확인하였다.

폭굉에 의한 폭발압력은 미 국방부 기준[8]에 따라 추진제 조성 성분과 무게를 일괄적인 TNT 무게로 환산하여 활용하고 있으나, 추진기관에 주로 사용되는 HTPB(Hydroxyl-terminated polybutadiene)는 환산 기준이 제시되고 있지 않다. 따라서 기존 연구 문헌[12] 및 국내 총포화약법[13]에 따라 고체 추진기관의 화약량을 TNT 70 kg로 적용하였고, UFC 3-340-02에서 제시한 환산 거리별 폭발압력 값[3]을 이용하여 최대압력 값을 산출하였다. 아래 Fig. 2 (a)는 선행연구[2]를 통해 실제 측정된 고체 추진기관의 지상연소 시 최대압력이며, Fig. 2 (b)는 추진기관의 비정상 폭발 시에 대한 최대압력 값을 나타내고 있다.



(a) Ground firing test (b) Abnormal explosion

Fig. 2 Explosion pressure comparison.

Table 1. Explosion pressure conversion data.

Category	Ground firing test * Fig. 2(a)	Abnormal explosion * Fig. 2(b)
Max pressure (psi)	2.79	49.94
Arrival time (ms)	40.71	6.41
Positive pressure impulse (ms · psi)	5.83	91.58
Separation distance (m)	2.5	8

Table 1은 추진기관 정상 및 비정상 폭발 시 최대압력, 도달시간, 충격량을 비교한 것으로 추진기관의 비정상 폭발 시 충격량이 상대적으로 매우 큰 것으로 확인된다. 이러한 결과는 고체 추진기관의 연소는 폭연의 특성을 보이는 반면, 비정상 폭발은 폭발속도가 매우 빠른 폭굉의 특성을 가지기 때문에 충격량이 높은 것으로 판단된다.

따라서 폭발압력이 현저히 높은 비정상 폭발에 대한 데이터를 적용하여 방호성능 검토에 활용할 필요가 있다. 또한 방호구조물의 운용성 및 경제성을 고려하여 주요 군사시설 방호기준(DMFC 2-20-20)에서 제시하는 방호등급을 검토하여 지상연소시험장 방호구조물의 합리적인 방호성능평가의 폭발 조건 설정이 필요하다.

3. 방호성능 평가 프로세스

방호구조물은 피해 유발 요인(Donor system)과 방호대상 요소를 보호하는 정도에 따라 구분된다. 피해 유발 요인은 잠재적 위험을 갖는 폭발물의 종류, 무게, 위치 등을 의미하고 압력, 충격, 파편 등이 피해를 유발한다. 방호대상 요소는 인원, 장비 및 폭발물로 구성되며 폭발 사고에 대비하여 안전한 수준으로 보호되어야 한다.

방호구조물은 대표적으로 대피소(Shelter), 방

호벽(Barrier), 차폐 구조물(Containment structure)로 구분할 수 있다. 방호구조물은 기본 설계를 수행하고, 폭발압력의 정량적 데이터 확보를 통해 상세 설계 검토를 수행한다[9]. 폭발 저감 식별 과정에서는 시설물의 중요도를 판단하여, 방호 수준을 조정할 수 있다[10].

고체 추진기관 지상연소시험장의 방호대상 요소는 시험을 수행하는 인원, 고가의 연구 장비 및 근접한 연구 실험실이다. 시설 배치에 있어서 경제성과 방호 효과를 고려해야 하며 아래 사항을 사전 검토하였다.

첫 번째로 폭발 원점에서 안전거리를 확보하는 것이며, 연구 실험실 간의 경계선 설정이나 보호 대상 시설 주변의 구조물 배치, 수목, 지형 지물을 검토하였다. 두 번째로는 방호구조물의 경제적 구축을 위해 기존 시설물에 희생 패널을 설치하여 피해 축소 여부를 검토하였고, 세 번째로는 폭발 특성에 따라 구조물의 형상, 외장 재료를 검토하여 기본 설계를 수행하였다.

지상연소시험장 방호구조물의 성능 평가를 위한 프로세스는 아래 Fig. 3과 같이 구성하였으며, 주요 위험 요소는 시험장 내부에서의 비정상 폭발과 외부 포격 또는 탄약의 사격 시험에 의한 폭발압력이며 방호대상은 연구시설 및 인명,

연구 장비 보호로 선정하였다. 방호등급은 구조물 구축의 경제성을 고려하여 피해가 발생하더라도 유지보수가 가능한 수준으로 설정하였으며, 폭발압력과 구조물 간 상호작용을 유한요소해석을 통한 구조물에 대한 변형, 파단 여부를 확인하고 방호성능이 만족하는지를 평가하도록 구성하였다.

4. 방호구조물 모델링 및 폭발 조건 설정

4.1 유한요소해석 모델

폭발 하중과 구조물에 대한 유한요소해석을 위해서 가장 핵심적으로 검토해야 하는 사항은 폭발 조건 설정과 폭발 하중에 대한 구조물의 응답 산정이다.

구조물의 응답 산정은 강제 해석과 유동장 해석으로 구분될 수 있다. 강제 해석은 구조물을 강체로 가정하고, 폭발에 의한 변형발생 후에도 요소의 형태를 어느 정도 유지한다는 전제로 거동을 산정하는 라그랑지안(Lagrangian solver) 기법을 사용한다. 유동장 해석은 폭발 후 변형이 큰 유체 매질에서 폭발압력에 의해 요소 구성망이 심하게 변형되는 현상(Mesh distortion)이 발생하여 라그랑지안 기법 적용이 불가할 때 오일러 해법(Eulerian solver)을 적용한다[11].

지상연소시험장 방호구조물은 라그랑지안 기법을 활용하는 것이 타당하며 비선형 동적해석을 수행하기 위해 충돌 및 폭발 해석에 일반적으로 사용되는 ANSYS LS-DYNA 17.1 소프트웨어를 활용하여 해석을 진행하였다. 유체(폭압)와 고체(구조물) 사이의 상호작용을 모델링 하기 위해 “Lagrange In Solid” 명령어를 사용하여 콘크리트와 철근의 구속조건을 설정 및 과도한 격자를 줄여 모델링을 수행하였다. 아래 Fig. 4는 구조물의 형상과 재원이며, 폭발 하중과 구조물의 상호작용을 파악하기 위해 폭발 원점을 중심으로 약 15 m 구간까지 지반을 포함하여 아래 Fig. 5와 같이 해석 모델을 구성하였다.

Fig. 5의 방호구조물 모델에서의 재료구성과 물성 정보는 아래 Table 2와 같다. 콘크리트는

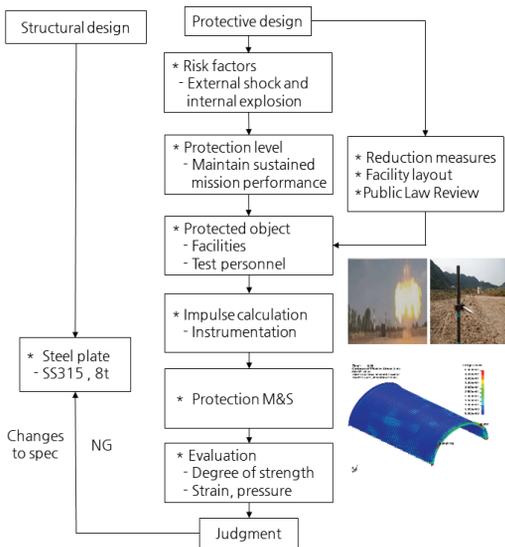


Fig. 3 Protection performance evaluation process.

Protecton structures spec	
length	22.4 m
width	19.9 m
height	9.5 m
Steel plate thickness	8t
material	SS315

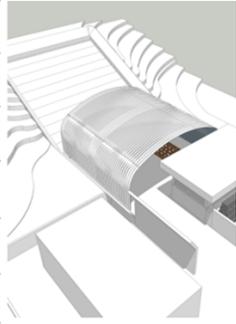
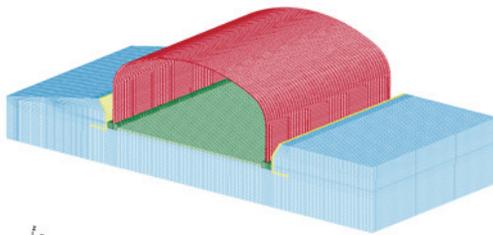
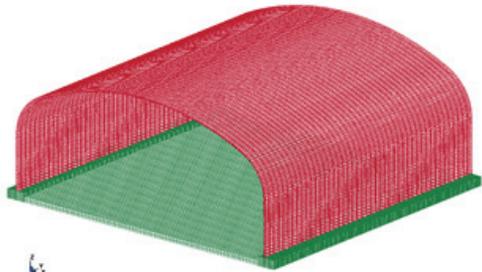


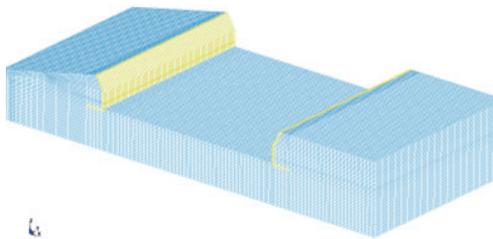
Fig. 4 Protection structure spec.



(a) Full model



(b) Steel plate and foundation



(c) Retaining walls and ground

Fig. 5 Protection structure model.

복잡한 거동과 지반의 비선형 특성을 8절점 Solid 요소를 적용하였으며, 강판은 구조의

Table 2. Material property information.

Category	Material Model	Key Inputs
Concrete	Cscm_concrete	$f_{ck}=24$ MPa
Steel	Plastic_kinematic	$f_y=315$ MPa
Ground	Mohr_coulomb	(Existing ground) $G_{mod}=54.2$ MPa, $\phi=0.485$ rad, $c= 6.52$ kPa
		(Covered soil section) $G_{mod}=32.5$ MPa, $\phi=0.628$ rad, $c= 1.23$ kPa

Banding과 Membrane 거동을 효과적으로 모델링이 가능하여 변형이 큰 경우와 복잡한 하중을 해석하는 데 적합한 4절점 Shell을 적용하였다.

방호구조물의 경계 조건은 실제 변형 및 하중 영향을 모사하도록 지반 하면을 완전히 고정하였고, 지반과 구조물의 수직 절단면은 면의 방향 이동, 회전 변위를 구속하였다. 재료의 연결 구성은 콘크리트 벽체와 지반과의 접촉 조건을 위해 Contact surface to_surface를 적용하였다.

4.2 폭발 조건 설정

폭발 원점의 위치는 폭발물의 양과 더불어 유한요소해석을 진행하는 데 있어 결정적인 변수로 작용하기 때문에 구체적이고 합리적으로 선정해야 한다. 국방부에서 제시하는 방호시물레이션 업무 지침에 따르면, 폭발 위치는 구조물의 전면, 측면 및 후면을 기본으로 한다[9]. 이때 시설물의 형태가 대칭이고 측면 폭발일 경우 한쪽 측면만 분석한다. 따라서 지상연소시험장에서의 폭발 조건은 구조물 내부와 외부를 구분하여 2가지 조건을 설정하였다.

(Case 1) Fig. 6 (a)는 앞서 2항에서 기술한 바와 같이 고체 추진기관 시험 중 비정상 폭발을 가정한 것으로 폭약량 TNT 70kg, 구조물 내부에서 지면 폭발하는 경우를 가정한 것이다.

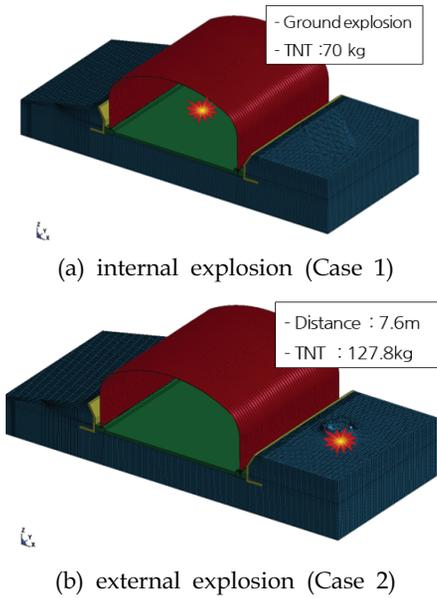


Fig. 6 Explosion conditions assumed.

(Case 2) Fig. 6 (b)는 DMFC 2-20-00 주요 군사시설 방호기준[12]을 준용하여 폭발 조건을 설정하였으며, 시험장과 같은 시설물은 군의 전술적인 측면에서의 중요성은 상대적으로 낮아 최소 요구수준인 방호 3등급을 적용하였다. 방호구조물의 우측면 외부에서의 포격 또는 탄약이 폭발하는 경우를 가정한 것으로 폭약량 TNT 127.8

kg이 방호구조물의 우측 7.6 m 떨어진 지점에서 폭발을 설정하였다.

5. 방호구조물의 유한요소해석 결과

본 연구에서의 유한요소해석 기법은 재료의 변형이나 파손과 같은 급격한 변화를 수반하는 매우 복잡하고 비선형적인 충돌과 폭발 해석에 주로 적용하는 Explicit dynamic analysis 기능을 사용하였고 폭발압력의 하중은 Load blast를 적용하였다. 방호구조물의 내부 폭발(Case 1)과 외부 폭발(Case 2) 시 발생한 폭발 하중에 의한 구조물의 변형 및 파단 여부를 검토하였으며, 응력 데이터는 0.05 ms 단위로 확보하였다.

5.1 내부 폭발에 따른 압력 분포 (Case 1)

방호구조물 내부에서의 비정상 폭발 시 근접 지면 폭발(Surface bursts)에 의한 반구형 형태 압력이 형성되었으며 아래 Fig. 7과 같이 방호구조물에 폭발 하중이 전달되었다. 방호구조물 강판 내부의 지반 기초에서부터 발생한 지면 폭발에 의한 압력은 입사압(Incident Pressure, P_{so})과 반사압(Reflected Pressure, P_r)이 중첩되어 발생함으로써 폭약량에 비해 더욱 큰 폭발에너지가

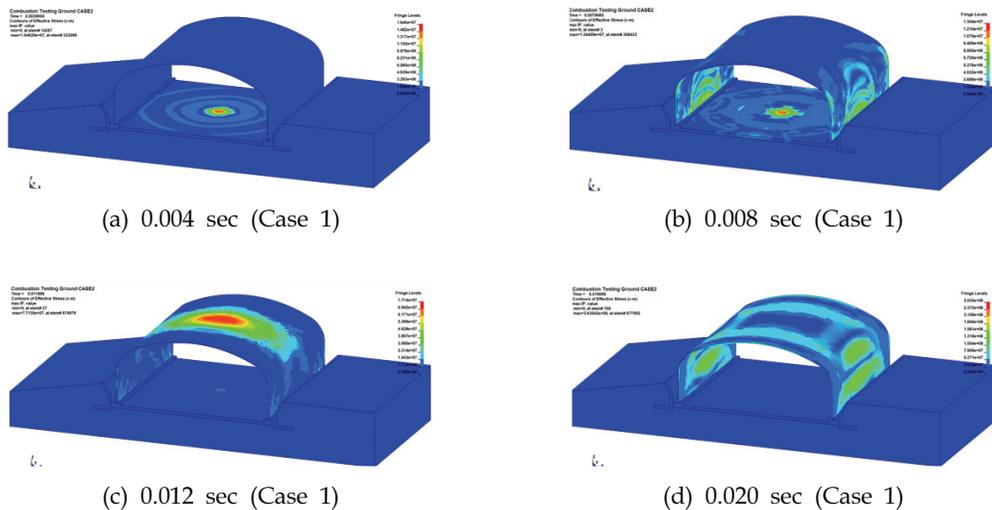


Fig. 7 Pressure propagation by internal (Case 1).

발생 된다[3]. 반구형 형태의 폭발압력은 콘크리트 옹벽과 강관 구조물의 측면에 먼저 도달하였으며, 구조물의 전체적 변형(Stress)을 시작으로 0.012 sec에서 강관 구조물 상부에 도달하였다. 0.02 sec에서는 방호구조물에 전방위적 응력이 반영되었고, 이는 구조물에 응력이 가해진 이후 잔여 응력에 의한 진동 영향이 묘사되었음을 알 수 있다.

5.2 외부 폭발에 따른 압력 분포 (Case 2)

구조물 외부에서의 폭발은 폭발 원점에서부터 구조물 우측면 중앙 부에서 약 7.6 m 떨어진 지반에서 0.003 sec 구간 폭발이 시작되어 콘크리트 옹벽을 지나 0.01 sec 구간에서 구조물에 도

달하였다. 가장 먼저 도달하는 강관 우측 중앙 부에서 폭발압력의 반사파 영향으로 약 0.02 sec 구간 최대 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 폭발 하중이 발생된 방향으로 압력이 전달되었다. Fig. 8은 외부 폭발 후 압력의 전달 경로 및 분포를 나타내었다.

5.3 내부 폭발 유한요소해석 결과 (Case 1)

방호구조물 내부 폭발의 유한요소해석 결과 지면 폭발에 의한 폭발압력은 지반 진동으로 구조물 전체에 초기 응력이 반응하였고, 강재 구조물에 폭발압력이 가장 먼저 도달한 것은 Fig. 9(a)의 Point A 지점(구조물과 콘크리트 옹벽 경계면)이다. 구조물에 반응한 최대 응력은 0.03

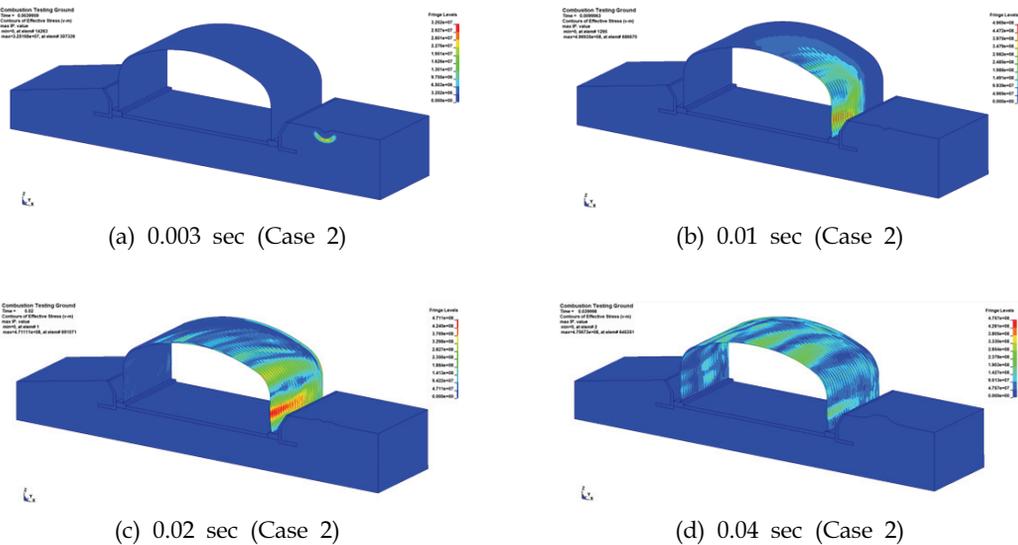


Fig. 8 Pressure propagation by external (Case 1).

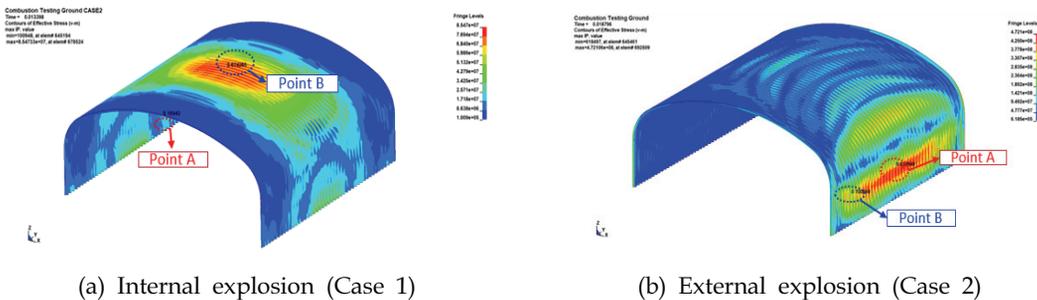
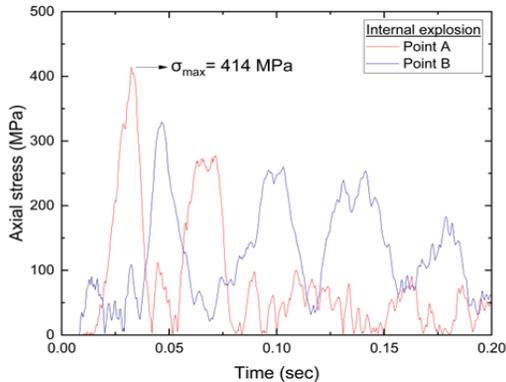
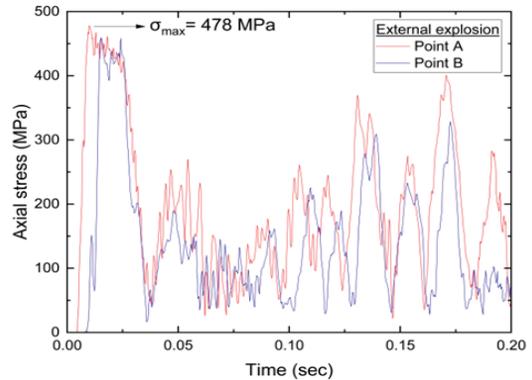


Fig. 9 Steel plate stress distribution.



(a) Internal explosion (Case 1)



(b) External explosion (Case 2)

Fig. 10 Steel sheet stress time history.

sec에서 414 MPa이 발생하였다. 이후 폭발압력은 Fig. 9(a)의 Point B 지점(구조물 중앙 상부)에 도달하였으며 0.04 sec에서 323 MPa의 응력이 발생 되었다.

시간이 지남에 따라 구조물에 반응한 응력은 감소하였으며, 해당 요소의 응력-시간 이력 곡선은 Fig. 10(a)에 나타내었다.

방호구조물의 강제 재료 SS315의 항복응력 490 MPa이며[13] 탄성 한계 범위 내 있는 것을 확인할 수 있다. TNT 70 kg의 내부 지면 폭발의 해석 결과 정적 강도보다 낮은 응답 특성을 나타내고 있으므로, 충분히 안정적인 거동을 보이는 것으로 평가할 수 있다.

5.4 외부 폭발 유한요소해석 결과 (Case 2)

방호구조물의 외부 폭발에 의한 유한 요소 해석 결과 지반 진동에 의한 초기 응력이 반응하기 전 매우 빠른 속도로 강제 구조물에 도달하였다. 최대 응력은 Fig. 9(b)의 Point A 지점(구조물 우측면 중앙)의 0.0098 sec에서 478.1 MPa이 발생하였다. Fig. 9(b)의 Point B 지점은 0.015 sec에서 459 MPa가 발생하였다. 이후 구조물에 반영된 응력은 급속히 감소하였고, 지반 진동에 의한 응력이 전달되는 특성을 보였다. 외부 폭발에 의한 방호구조물의 최대 응력은 강제 재료 SS315의 인장강도 490 MPa 이내의 수준으로 탄성 한계 범위 내 있는 것을 확인하였다.

외부 폭발 조건에서는 최대 폭발압력의 영향이 구조물의 허용응력에 근접하게 도달하였으나, Case 1과 같이 정적 강도보다 낮은 응답 특성을 보이므로 안정적인 거동을 보인다고 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 표준 설계기준이 정립되지 않은 지상연소시험장 방호구조물과 같은 특수구조물을 대상으로 방호성능평가 프로세스를 수립하고, 두 가지 폭발 조건을 가정하여 유한요소해석 수행을 통해 방호성능을 평가하였다. 이에 대한 결론은 아래와 같다.

(1) 방호구조물의 내부 폭발(Case 1) 해석 결과 TNT 70 kg 폭발에 의한 구조물에 발생한 응력은 최대 414 MPa이며, 외부 폭발 결과(Case 2) TNT 127.8 kg, 거리 7.6 m에서 방호구조물에 발생한 응력은 최대 478.1 MPa이 발생하였다.

(2) 강판 재료 SS315의 허용응력은 490 MPa로 두 가지 폭발 조건에 대해 안정적인 거동을 보이는 것을 확인하였으며, 강판 파단이 발생하지 않았다.

(3) 따라서 지상연소시험장 방호구조물을 구축함에 따라 근거리에서 시험시설의 방호능력은 안정적인 수준임을 확인하였다.

본 연구는 기존 수행되었던 방호구조물 적용

분석[2]의 후속 연구로 방호성능 평가를 위한 프로세스 수립, 유한요소해석을 통해 방호구조물의 설계 검토에 활용되었다. 본 연구 결과를 통해 국방 및 민간 분야에서 요구되는 다양한 형태의 방호구조물 구축 시 본 연구 결과가 활용되길 기대한다.

후 기

이 논문은 제1저자의 석사학위 논문의 일부를 수정, 보완 및 발전시켜 작성하였습니다.

References

1. Korea, Ministry of National Defense DMFC 3-90-60 "Steel protective structure design and construction guidelines", 2017.
2. Han, J.D, and Kim, D.H, Kim, S.K "Feasibility Study of a Corrugated Steel Protective Structure for Ammunition Test Facility "KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 42, No. 5: 671-679/ October, 2022.
3. M. H. Noh, S. Y. Lee, "Evaluation of Impact Damage Behavior of a Reinforced Concrete Wall Strengthened with Advanced Composite Materials," The Magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 1, No. 3, pp. 41-48. 2010.
4. E. S. Kim, J. H. Kim, J. H. Shim, J. P. Kim, J. M. Goh, N. K. Park, "A Forensic Engineering Study on Evaluation of Explosive Pressure and Velocity for LNG Explosion Accident using AUTODYN," Journal of the Korean Society of Safety Vol. 40, No. 4, pp. 56-63, 2015.
5. H. S. Ahn, "A Study on Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Building Caused by Blast Load," Graduate School of Konkuk University, 2014.
6. J. Y. Lee, "Evaluation and Improvement of Blast Resistance Performance for the Columns Using Computational Analysis," Graduate School of Konkuk University, 2012.
7. H. S. Choi, "Study of Residual Strength of Reinforced Concrete Columns Under Blast Load," Graduate School of Kyung Hee University, 2014.
8. U.S. Department of Defense. (2008). "Unified Facilities Criteria(UFC) Structures to resist the effects of accidental explosions", UFC 3-340-02
9. Korean Ministry of National Defense, (2015) "Protection Simulation Work Guidelines"
10. Korean National Police Agency, (2023) "Enforcement Decree of the Act on Safety Management of Guns, Swords, Explosives, etc." Article 6 (Conversion Standards for Explosives)
11. Korean Ministry of National Defense, (2018) DMFC 2-20-00 "Protection standards for major military facilities"
12. NASDA, "H-II 3 Ground Safety Plan," Safety 3-6-1(1994).
13. Korea Agency For Technology and Standards, (2023) KSD 3503 "Rolled steel for general structures".