

철근콘크리트조 박스형 포상의 방호성능 평가

백종혁¹⁾ · 김석봉¹⁾ · 손기영²⁾ · 박영준^{*,1)}

¹⁾ 육군사관학교 건설환경학과

²⁾ 울산대학교 건축학부

The Study on Assessment of Protective Capacity of the Reinforced Concrete Box-type Artillery Positions

Jonghyuk Baek¹⁾ · Suk Bong Kim¹⁾ · Kiyoung Son²⁾ · Young Jun Park^{*,1)}

¹⁾ Department of Civil & Environmental Engineering, Korea Military Academy, Korea

²⁾ School of Architecture, University of Ulsan, Korea

(Received 13 December 2013 / Revised 24 February 2014 / Accepted 29 March 2014)

ABSTRACT

Although self-propelled artilleries are mobile equipment, they need their own covered-positions for survival against preemptive strikes. The most important military requirement is enough protective capacity against blast pressure caused by explosion. This paper aims to assess the protective capacity of the newly-placed concrete box-type artillery positions using accurate structural geometric models as well as soil-structure interaction analysis. The commercial program is used to model the structural geometry of the positions. In order to describe the correct wave propagation in the backfill along with soil-structure interaction, used parameters in shock equation of state are selected based on the related studies as well as theories and then their final results are verified with the ones calculated with empirical equations in the US Unified Facility Criteria. In sum, it could be concluded that the protective capacity of the newly-built positions satisfies the protective structural requirement.

Key Words : Artillery Position(포상), Protective Structure(방호 구조물), Protection Requirement(방호도), Ground Shock (지반 충격), Hydrocode(유체동역학 코드)

1. 서론

1.1 연구 배경

자주포는 기동장비라는 운용특성에 따라 전력화 초기에는 방호시설에 대한 요구가 없었다. 하지만, 유사시 적의 선제타격 대상으로 생존성 확보의 필요성이 제기되면서 방호시설로서의 포상 구축이 요구되었다. 이러한 포상의 필요성에 관한 주장은 최근 발발한 연평도 포격사건을 통해 군내에서 더욱 확고해졌다¹⁾.

* Corresponding author, E-mail: yjpark@kma.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

포상의 주요 구축재료는 파형강판과 철근콘크리트이다. 파형강판 구조체는 우수한 시공성 및 가격 경쟁력에도 불구하고, 시공결함 및 유지보수 소요 과다로 인해 전력화에 관한 부정적 시각이 많다^[2]. 또한 파형강판 구조체는 뒷채움흙에 의한 압축링 효과로부터 구조체의 안정을 유지하는 바, 유사시 뒷채움흙이 피탄되면 압축링 효과를 기대할 수 없게되어 구조체 전반에 대한 구조적 안정성이 위협을 받는다^[3]. 이러한 이유로 최근에는 고품질(고강도, 고성능) 콘크리트의 개발과 철근콘크리트 구조체 자체의 신뢰성 높은 강성 등의 장점이 상대적으로 부각되면서 철근콘크리트 조 포상의 필요성이 재조명되고 있다. 이에 군사요구도에 따라 ○○ 지역 포상은 현지의 작전개념, 방호수준, 유지보수 소요 판단에 따라 철근콘크리트조로 건설되고 있다^[2].

방호시설 설계에 있어서 절대적 요구사항 가운데 하나가 폭발하중을 견딜 수 있는 구조체의 신뢰성 있는 방호력이다. 폭발하중을 받는 구조체에 대한 가장 확실한 방호력 검증 방법은 실증실험이다. 하지만, 신뢰성 있는 실험결과와 확보를 위한 충분한 횟수의 실증실험은 시간적, 공간적, 경제적 제약으로 인하여 현실적으로 제한된다. 이에 대한 대안으로 다양한 방호력 평가 방법이 제안되어 있으며, 대표적인 방법 가운데 하나가 미군의 통합시설기준(UFC : Unified Facilities Criteria) 3-340-01과 3-340-02에 제시되어 활용되고 있다. 이 기준은 무기체계 효과에 관한 각종 실험 및 전투 결과를 수집·계산하고, 이를 통해 얻어진 경험식을 토대로 구조체 각 부재의 피해를 정량적으로 계산한다. UFC 3-340-02는 공기를 통해 전파되는 압력 계산법을 제시하고 있으며, UFC 3-340-01의 전신인 TM 5-855-1을 참고한 방호구조물 설계기준(국방부, 1998)에서는 매질이 지반일 경우에 대한 압력 전파 모델을 제시한다^[4,10]. 이 방법은 폭발효과 계산 측면에서 각 매질에 따른 신뢰도 높은 자유장 압력(free field pressure)과 반사 압력(reflected pressure)을 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 압력전파 경로 상에서 매질이 바뀌거나 구조체의 형상이 복잡할 경우 적용하기 어려운 단점이 있다. 또한 구조부재의 거동해석 측면에서는 계산된 폭발하중을 받는 단일 구조부재에 대한 최대 처짐을 계산할 수 있는 장점이 있는 반면에 압력 전달 매질과 복잡한 구조물의 상호작용을 고려할 수 없고 전체 구조체의 거동 혹은 손상에 대한 시각적 판단이 불가능하다.

이에 최근에는 폭발양상 및 구조거동에 대한 수치해석과 시각적 확인이 가능한 M&S(Modeling and Simulation)가 방호성능 평가에 활용되면서 기존의 UFC 기준에 의한 단점을 보완하고 있다. 이러한 수치해석은 복잡한 형상을 지닌 구조체와 매질의 상호작용을 고려할 수 있고 구조체의 거동과 손상을 시각적으로 판단할 수 있다는 장점을 가진다. 반면, 난해한 공학적 해석과 다양한 수치적 모델 및 매개변수의 선정으로 인한 결과의 오차수반을 고려해야 하는 단점이 있다. 이러한 계산상의 오차를 줄이기 위하여 선정된 수치 모델을 적용하여 수행한 예비해석 결과와 UFC를 통한 계산결과와의 비교·분석을 통한 확인 및 보정이 필요하다.

1.2 연구 목적

이 연구에서의 방호력 평가대상 구조체인 ○○ 자주포 포상은 날개벽 및 돌출된 탄약 저장실, 구조체 상부의 복토 사면 등으로 인하여 구조체의 형상이 단순하지 않아 구조체가 받는 폭발하중의 예측이 쉽지 않다. 뿐만 아니라, 정확한 해석을 위하여 구조체와 복토지반의 상호작용을 고려하여 구조체의 거동을 판단하여야 한다. 이에 이 연구에서는 철근콘크리트조 ○○ 자주포 포상에 대하여 폭발에 따른 구조체의 거동 및 손상을 수치해석을 통해 관찰하고, 이를 미 UFC 및 한국군 국방·군사시설 설계기준(DMFC : Defense Military Facility Criteria)에서 제시된 기준에 적용하여 방호력을 판단하는 절차를 제시한다. 또한 제시된 절차에 의한 ○○ 지역 작전시설의 방호력을 평가한다.

2. 방호성능 평가 절차

본 연구에서는 폭발하중의 전달 매질인 대기 또는 지반과 하중의 수용체인 구조체의 상호작용을 고려한 동적해석을 수행한다. 이를 위해 유체 부분의 해석에는 Euler Solver를, 고체 부분의 해석에는 Lagrange Solver를 적용하여, 각 부분을 결합한다. 결합 해석은 고체와 유체간의 상호작용을 고려하지 않는 비결합 해석과 비교하여 해석시간에 있어 불리하지만 보다 정확한 구조물의 응답을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서는 외연 시간 적분법(explicit time integration)에 기반한 유체동역학 코드(hydrocode)인 Ansys사의 Autodyn 프로그램을 사용하였다.

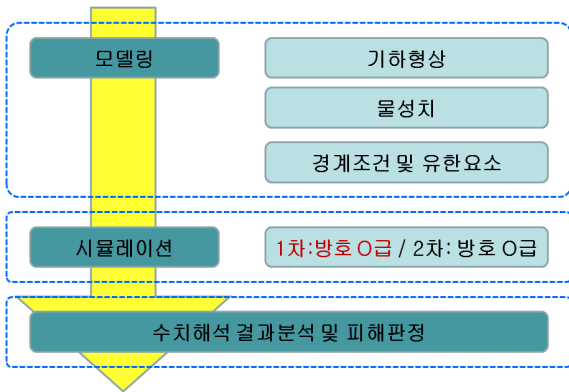


Fig. 1. Protection level judgement procedure

Fig. 1은 이 연구에 적용된 방호성능 평가 절차를 나타내고 있다. 먼저 해석 대상인 포상의 기하형상을 모델링한다. 이 때, 도면상의 치수 및 형상을 콘크리트, 철근 및 뒷채움 흙에 대한 3D 모델링에 정확히 반영한다. 구조체의 전체적인 거동을 확인하기 위하여 구조물 전 부위를 모델링하며, 이를 위하여 본 연구에서는 Ansys사의 SpaceClaim 프로그램을 활용하였다^[11]. 기하형상 모델링 후, 재료 모델과 물성치를 반영한다. 이 때, 지반의 물성치는 응력전달 양상을 고려하여 선정한다. 이후, 대기, 지반 및 각 구조부위에 대한 유한요소 처리를 수행한다. 이 때, 철근과 콘크리트의 일체 거동을 위하여 철근 요소의 각 절점 및 콘크리트 요소의 각 절점 중 서로 결합될 절점은 동일 좌표 상에 위치하도록 처리한다. 또한 인접 지반이 구조물과 함께 거동하여 구조물의 고유진동주기를 증대시키는 현상을 반영하기 위하여 지반 및 콘크리트 각 요소에 대한 절점 공유 필요시 동일 좌표 상에 위치하도록 처리한다^[4].

모델링이 완료되면 방호등급별 폭발조건에 따라 시뮬레이션을 수행하고, UFC 3-340-02와 DMFC 5-60-30에 제시된 방호성능 요구조건을 준용하여 구조물의 방호력을 평가한다. 군사보안상 방호등급별 폭발조건에 대한 제시는 생략한다. Table 1은 UFC에 제시된 지점회전각에 따른 피해 양상을 보이고 있다. 스폐링(Spalling)은 콘크리트의 인장파괴로 인해 벽면의 연직 방향으로 파편이 튀어나오는 현상을 의미하고, 이 때 파편의 크기는 스캐빙(Scabbing)에 의한 파편보다 상대적으로 작다. 스캐빙은 인장축 콘크리트의 완전탈락을 의미한다. 지점회전각이 2° 미만인 경우, 저압영역(환산거리 0.4 m/kg³ 이상)에서는 미세한 균열만이 발

Table 1. Protection level in UFC 3-340-02

구 분	피해 양상	지점회전각
1급	없음(저압) 또는 스폐링(고압)	0~2°
2급	파쇄(Crushing)	2~6°
3급	스캐빙(Scabbing)	6~12°

Table 2. Protection level in DMFC 5-60-30

구 분	피해 양상	지점회전각
1급	미세균열 발생	0~2°
2급	균열 또는 파쇄발생	2~5°
3급	철근으로부터 콘크리트 분리	5~12°

Table 3. Explosion condition

구분	폭발조건 1	폭발조건 2
작약량	○○○	
이격거리	○○	○

생하고, 고압영역에서는 스폐링이 발생한다. 지점회전각이 6° 이상인 경우, 인장축 콘크리트가 완전히 탈락되어 심각한 배면파쇄가 발생된다^[4]. Table 2는 DMFC 5-60-30에 제시된 방호요구조건을 보이고 있다. 콘크리트의 완전탈락이 시작되는 시점이 지점회전각이 5°로 제시되어 있는 점을 제외하면 구조체의 피해 양상에 대한 전반적인 기준은 UFC와 동일하다^[5]. 본 연구에서는 구조물의 방호성능 판정기준으로 DMFC의 기준을 적용한다.

3. 예제 구조물의 모델링

이 연구에서는 방호 ○급 시설인 ○○지역 유개화 포상에 대한 방호성능을 평가하였다. 방호등급 별 폭발조건은 Table 3과 같다.

콘크리트는 국방·군사시설 표준 설계기준강도인 21 MPa을 적용하였고, 콘크리트 고압영역에서의 동적 거동의 사실적 모사를 위해 P-alpha 상태방정식과 Riedel-Hiermaier-Thoma(RHT) 콘크리트 강도모델을 적용하였다^[6]. 지반의 경우, Autodyn 프로그램 내의 Shock 상

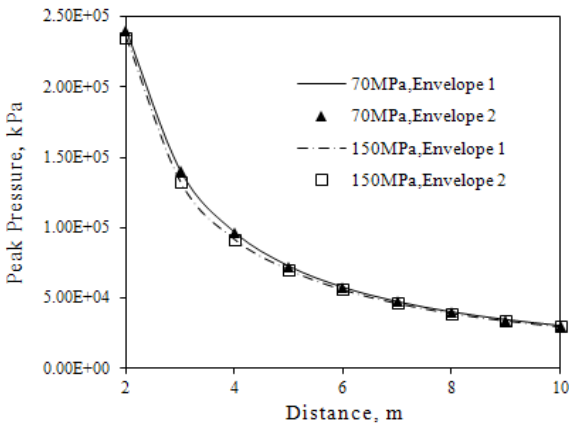


Fig. 2. Influence of soil properties on peak free-field pressure

태방정식 및 Drucker-Prager 강도모형을 적용하였다. Drucker-Prager 강도모형은 일반적으로 지반에 적용되는 파괴기준인 모어-쿨롱의 파괴기준(Mohr-Coulomb's failure criterion)을 탄소성 모델로 표현한 것으로 점착력과 압축력에 따른 전단강도의 변화를 반영한다^[7].

D. Ambrosini는 Drucker-Prager 모델의 전단탄성계수와 파괴포락선(failure envelope)의 물성치가 폭발구 체적에 큰 영향을 미치지 않음을 밝혔고^[8], 본 연구에서는 더 나아가 파괴포락선의 각 물성치가 압력전파에 미치는 영향이 미비함을 예비해석을 통해 확인하였다. 예비해석에서는 Table 4에 제시된 두 종류의 파괴포락선에 70 MPa과 150 MPa의 전단탄성계수를 적용한 총 네 가지의 지반 매질에 대하여 TNT 120 kg의 폭발로 인한 충격파의 자유장 압력을 이격거리 2~10 m 구간에 대하여 1 m 간격으로 측정하였다. Fig. 2는 물성치의 변화에 따른 자유장 압력의 전파 양상을 보이고 있으며, 물성치의 변화가 압력전파에 미치는 영향이 작음을 확인할 수 있었고, 이 결과를 바탕으로 Table 5와 같이 강도모델의 물성치를 선정하였다. Fig. 2의 범례의 70 Mpa과 150 Mpa는 전단탄성계수를 의미한다. Envelope 1과 Envelope 2는 Table 4에 제시된 파괴포락선의 종류를 의미한다.

Table 6은 Shock 상태방정식에 적용되는 물성치를 나타내고 있다. 이 값은 B. Luccioni의 물성치를 수정한 것으로, 폭발원점과의 이격거리가 2~10 m인 구간에서의 거리에 따른 최대 자유장 압력 곡선이 UFC 상의 경험식의 결과와 유사하도록 예비해석을 통하여 선정하였다^[9,10]. 이격거리 2~10 m는 대부분의 방호등

Table 4. Soil properties for Fig. 3 (unit : kPa)

Envelope 1			
Pressure 1	0	Yield Stress 1	6.2×10^3
Pressure 2	1.1×10^4	Yield Stress 2	6.2×10^3
Pressure 3	1.0×10^8	Yield Stress 3	6.2×10^3
Envelope 2			
Pressure 1	-1.1×10^3	Yield Stress 1	0
Pressure 2	1.1×10^4	Yield Stress 2	6.2×10^3
Pressure 3	1.0×10^8	Yield Stress 3	6.2×10^3

Table 5. Soil properties (Drucker-Parger Piecewise Model) (unit : kPa)

Shear Modulus		7.0×104	
Pressure 1	-1.1×10^3	Yield Stress 1	0
Pressure 2	1.1×10^4	Yield Stress 2	6.2×10^3
Pressure 3	1.0×10^8	Yield Stress 3	6.2×10^3

Table 6. Soil properties(Shock EOS)

Reference Density		1.92 g/cm ³	
Gruneisen Gamma		0.11	
c_0	450 m/s	S	1.5

급 상의 폭발조건 하에서 복토 지반을 따라 구조체에 전달되는 압력전파의 범위를 고려하여 설정하였다. 추가적으로, 비가 올 경우 포화된 지반은 건조할 때보다 훨씬 큰 충격전파속도를 가지므로, 이 연구에서는 충격전파속도의 증가를 고려한 보수적인 연구결과를 위하여 'very dense and dry sand'에 1200 m/s의 충격전파속도를 적용한 경험식의 결과를 예비해석의 결과와 비교하였다^[9]. Fig. 3은 예비해석 결과로, 거리에 따른 최대 자유장 압력 곡선을 나타낸다. B. Luccioni의 물성치와 본 연구를 위해 수정된 물성치를 Shock 상태방정식에 적용한 결과가 각각 굵은 실선과 가는 실선으로 표시되어 있으며, 경험식에 의한 결과는 점선으로 표시되어 있다. B. Luccioni의 물성치는 압력전파양상이 아닌 폭발구의 체적에 초점을 맞추어 선정되었기 때문에 경험식에 의한 결과와 큰 차이가 나는 것으로 분석된다.

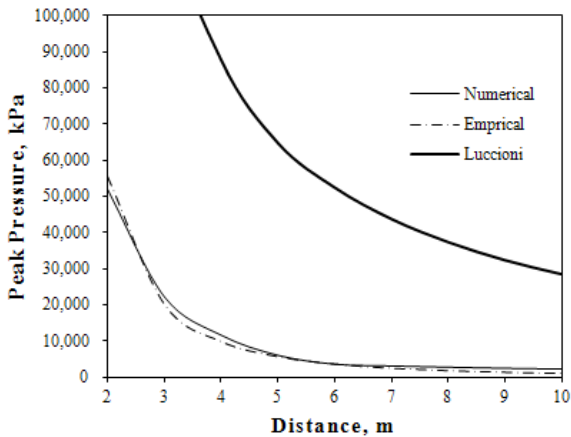


Fig. 3. Variation of peak free-field pressure with distance

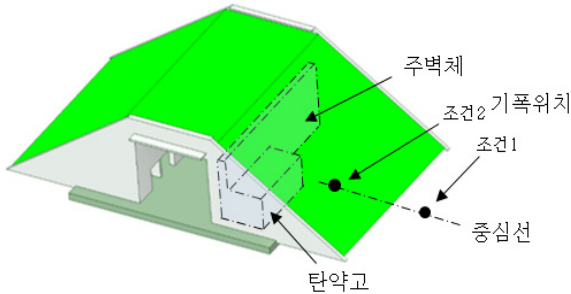


Fig. 4. Modeled artillery position using SPACECLAIM

Fig. 4는 SpaceClaim 프로그램을 통해 모델링된 포상을 나타내고 있다. 포상의 형태와 철근 배근은 상세 설계도에 따라 모델링되었다. 대기의 경계조건은 영역의 경계에서 압력파가 반사되지 않도록 Flow-out 조건을 적용하였다. 구조물 바닥판의 경계조건은 고정단으로 적용하였다. 철근과 벽체 및 슬래브는 절점의 결합을 위해 대상 절점이 같은 좌표를 가지도록 유한요소 작업을 수행하였다.

4. 방호성능 해석결과

Fig. 5는 폭발조건 1에 대한 구조체의 거동을 보이고 있으며, Fig. 4의 구조체에서 복토지반을 제외하고 주벽체와 탄약고를 정면에서 바라본 그림이다. 그림에서 탄성범위내의 요소는 백색, 소성범위내의 요소는 회색으로 표시되어 있다. 벽체와 지붕슬래브 연결부

근처에서 약간의 소성변형이 발생하였고, 탄약고 벽체 요소는 전 영역이 탄성 상태에 있는 것으로 나타난다. 이는 폭발원점이 뒷채움흙 밖에 있어 뒷채움흙의 사면을 따라 폭발압력이 비산하여 구조체 저부에는 압력전달이 거의 이루어지지 않았음을 의미한다.

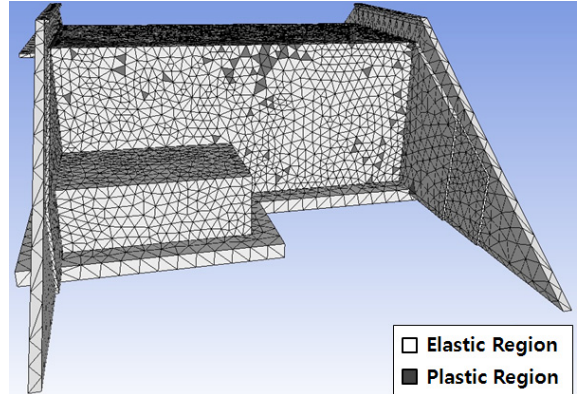


Fig. 5. State of structure(condition 1)

Fig. 6은 폭발조건 2에 대한 구조체의 거동을 보이고 있다. 이에 따르면 주벽체 및 탄약고 벽체 및 슬래브 전반에 걸쳐 소성변형이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 폭발원점이 뒷채움흙의 내부에 있어 전색 효과로 인해 폭발압력이 큰 손실없이 구조체에 전달되었기 때문이다. Fig. 7은 주벽체와 탄약고 벽체의 철근망과 철근망 내부 콘크리트의 변형 후 모습을 보이고 있다. 대다수의 콘크리트 요소가 소성상태에 이르렀고, 주벽체와 탄약고 벽체 모두에 대변형이 발생하였다.

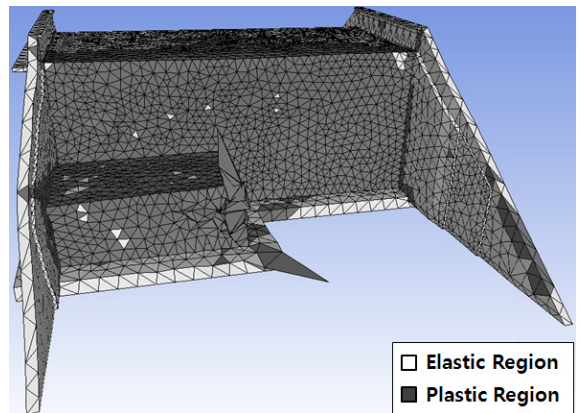


Fig. 6. State of structure(condition 2)

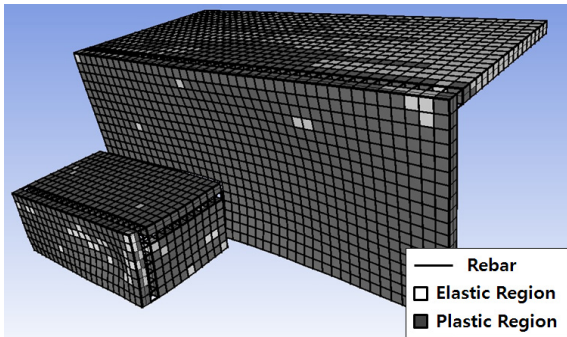


Fig. 7. Deformation of reinforced steel and concrete elements(condition 2)

Table 7. Maximum rotational angle

폭발조건	최대 지점회전각	판정
조건 1	0.382°	충족
조건 2	19.290°	미충족

Table 7은 수치해석을 통해 계산된 폭발조건에 따른 최대 지점회전각을 보이고 있다. 폭발조건 1의 경우, 벽체의 최대 지점회전각은 0.382°로 계산되었고, 이는 UFC 3-340-02 상의 피해없음(none)에 해당되고 DMFC 5-60-30에서 요구하는 ○급 시설의 방호성능을 만족시킨다. 폭발조건 2의 경우, 벽체에 19.290°의 최대 지점회전각이 발생하고, 이는 UFC 3-340-02 상의 스캐빙 영역을 벗어나므로 인장축 콘크리트가 모두 탈락됨을 예측할 수 있다. 또한 DMFC 5-60-30에서 요구하는 ○급 시설의 방호성능을 크게 벗어나는 것으로 나타났다. 따라서 대상 구조체는 방호등급은 ○급이고, 이는 해당시설의 방호등급인 ○급을 충족시키므로, ○○지역 유개화 포상은 적절한 방호등급을 가지는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 폭발하중을 받는 철근콘크리트조 ○○자주포 포상의 방호성능을 수치해석을 통하여 검증하였다. 폭발해석과 구조체 해석 공히 3D M&S를 통한 수치해석을 수행하였고, 이를 위해 Ansys사의 Autodyn 프로그램을 활용하였다. 콘크리트 부재와 철근, 복토 지반의 정확한 기하형상을 모델링하기 위해

SpaceClaim 프로그램을 활용하였다. 기하형상 모델링 후, 재료 물성치를 Workbench 프로그램을 활용하여 반영하였으며, 흙의 물성치는 폭발에 의한 응력전달을 가장 잘 반영하는 것으로 선정하였다. 구조체의 피해 양상은 해석에 의한 시각화된 시뮬레이션 결과와 UFC 기준을 준용하여 판단하였다. 방호성능 만족여부 판별에는 DMFC 5-60-30의 방호성능 요구조건을 준용하였다.

예제 구조물로서 방호 ○○지역 유개화 포상에 대한 방호성능을 평가하였다. 대상 구조물에 방호 ○급에 해당하는 폭발조건 1과 방호 ○급에 해당하는 폭발조건 2를 각각 적용하였다. 구조체가 폭발조건 1을 받는 경우, 주벽체와 지붕슬래브 연결부 근처에서 약간의 소성변형이 발생하였으며, 탄약고에는 피해가 없는 것으로 해석되었다. 또한 발생된 최대 지점회전각이 폭발조건 1의 방호등급을 만족시키는 것으로 나타났다. 반면 구조체가 폭발조건 2를 받는 경우, 주벽체 및 탄약고 벽체 전반에 소성변형이 발생하는 것으로 해석되었고, 최대 지점회전각이 폭발조건 2의 방호등급을 만족시키지 못하는 것으로 해석되었다. 따라서 구조물의 방호등급은 방호 ○급으로 판정되었고, 이는 해당시설의 요구등급을 충족시키므로 ○○지역 유개화 포상은 적정 방호등급을 지닌 것으로 판단되었다.

이 연구의 수치해석에 적용된 복토 지반의 물성치는 그 신뢰도를 확보하기 위하여 자유장에서의 압력전과 양상이 경험식의 결과와 유사하도록 선정하였다. 그러나 이것만으로 복잡한 기하형상을 가지는 매질에서의 압력 전달에 대한 신뢰도가 담보될 수 없고, 이 연구에 쓰인 토질의 상태방정식 자체는 선행연구에서 적용된 것을 그대로 사용하였기 때문에 압력전과 양상을 더 정확히 모사할 수 있는 다른 모델이 존재할 여지가 있다. 이러한 제한사항을 극복하려면, 실증실험을 통해 다양한 상태의 복토지반 내의 압력전달 양상을 파악하고, 이를 적절히 모사할 수 있는 지반모델을 찾는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] 윤병노, “서북도서 2015년까지 전력증강·요새화”, 국방일보, 2011. 10. 05.
- [2] 국방시설본부, ○○지역 작전시설(13-북2-육48) 철근콘크리트조 ○○자주포 유개화 포상의 방호성

- 능 평가, pp. 7-8, 2013.
- [3] El-Taher, M., "The Effect of Wall and Backfill Soil Deterioration on Corrugated Metal Culvert Stability," Ph. D. Dissertation, Queen's University, Ontario, Canada, 2009.
- [4] U.S. Department of Defense, Unified Facilities Criteria 3-340-02 : Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 2008.
- [5] 국방부, 국방·군사 시설기준(DMFC) 5-60-30 : 탄약고 설계지침, pp. 28-29, 2012.
- [6] Hiermaier, S.(ed.), Predictive Modeling of Dynamic Processes, Springer, p. 143, 2009.
- [7] Century Dynamics, AUTODYN Theory Manual, p. 185, 2003.
- [8] Ambrosini, D., Luccioni, B., and Danesi, R., "Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface," Computational Mechanics, Vol. 23, pp. 571-590, 2004.
- [9] Luccioni, B., and Ambrosini, D., "Craters Produced by Underground Explosions," Computational Mechanics, Vol. 25, pp. 1603-1614, 2006.
- [10] 국방부, 방호구조물 설계기준, pp. 119-127, 1998.
- [11] SpaceClaim Corporation, SpaceClaim 2012+ Release Notes, 2012.