

고폭탄 탄약시험 간 이동형 강재 방호벽의 안전성능 판단 및 유효 방호력 평가 방법

전인범
국방기술품질원

Method for evaluating the safety performance and protection ability of the mobile steel protective wall during the high-explosive ammunition test

In-Beom Jeon
Defense Agency for Technology and Quality

요약 본 연구에서는 고폭탄과 같은 고위험 탄약에 대한 신뢰성 시험을 수행하는 기관에서 갖추어야 할 방호벽에 대해 유효 방호력을 평가하였다. 고폭탄이 인원에게 줄 수 있는 영향은 폭발압력에 의한 고막, 폐의 손상 등과 폭발과 동시에 발생한 파편에 의해 받을 수 있는 관통상이 있다. 따라서 COMP B가 충전되어있는 고폭탄을 기준으로, 피해 정도를 산정하기 위한 폭발방호 이론과 수치적 계산과 시뮬레이션을 통한 방호력 검증을 수행하였다. 수치적 계산 결과 시나리오로 설정된 방호벽과 폭발원점의 거리(7 m)에서 고폭탄 폭발 시 방호벽에 미치는 최대 폭발압력은 77.74 kPa이었으며, 50 mm 두께의 방호벽에 대한 파편의 관통력은 41.34 mm로 계산되었다. AUTODYN을 활용한 시뮬레이션 검증에서는 방호벽과 인원에게 영향을 주는 최대 폭발압력은 각각 58.68 kPa과 18.175 kPa이었으며, 파편의 관통력은 35.56 mm였다. 이 수치는 인간의 피해 한계보다 낮은 수치로 방호벽의 방호력은 유효할 것으로 판단되었다.

Abstract In this study, a series of processes for evaluating the effective protection against barriers that should be equipped in institutions that perform reliability tests on high-risk ammunition, such as high-explosive ammunition, were introduced. The impact that high-explosive bombs can have on personnel includes damage to the eardrum and lungs caused by explosion overpressure and penetrating wounds that can be received by fragments generated simultaneously with the explosion. Therefore, a high-explosive with COMP B explosives as its contents were set up, and an explosion protection theory investigation to calculate the degree of damage, numerical calculations and simulations were performed to verify the protection power. A numerical calculation revealed the maximum explosion overpressure on the protective wall when the high-explosive exploded and the penetration force of the fragment against a 50 mm-thick protective wall to be 77.74 kPa and 41.34 mm, respectively. In the simulation verification using AUTODYN, the maximum explosion overpressures affecting the firewall and personnel were 56.68 kPa and 18.175 kPa, respectively, and the penetration of fragments was 35.56 mm. This figure is lower than the human damage limit, and it was judged that the protective power of the barrier would be effective.

Keywords : AUTODYN, Overpressure, Protection Wall, Fragment, Effectiveness Evaluation

본 논문은 국방기술품질원 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : In-Beom Jeon(Defense Agency for Technology and Quality)

email: ibjeon4965@dtqa.re.kr

Received April 22, 2021

Revised May 20, 2021

Accepted June 4, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

산업안전보건법 제38조(안전조치)에 따라 사업주는 산업재해를 예방하기 위하여 필요한 조치를 취하여야 한다.

탄약의 시험을 수행하고 있는 기관에서는 탄약으로 인한 위험성은 반드시 고려되어야 한다. 실제로 박격포탄, 곡사포탄 등과 같은 군용 탄약을 직접 사격하여 신뢰성 시험 등의 업무를 수행한다면 시험 품목에 대해 사격 진지에서 방호시설 설치에 제한이 있더라도 최소한의 방호 시설물을 적용하여 인명피해를 예방해야 한다. 폭발물에 대한 실질적인 방호력을 확인하려면 관련 이론의 조사와 적절한 적용이 필요하다.

폭발성 물질을 다루는 작업에 있어서는 산업안전보건법 관련 KOSHA GUIDE P-102-2013 (사고피해 예측 기법에 관한 기술지침) 등 다양한 기술지침과 연구결과가 있다[1]. 하지만 폭압 및 파편피해의 경우, 주변 장애물에 따라 영향을 받아 세부적인 산출이 어렵지만, 장애물이 없는 개활지에서의 폭발 피해는 기존 이론 및 경험적 식과 같은 피해 산출방법 적용이 용이하다. 탄약의 폭압 및 파편에 대한 경험적 설계 기준은 UFC 3-340-02(Structures To Resist) 에서 상세히 다루고 있다[2].

박영준, 이민수, 이희만의 연구(2016)[3]에서는 RC형 방호벽의 조사 및 모델링을 통해 접적지역에서 TNT의 폭약량을 설정하여 방호벽의 두께를 산출하였다. 이인철 외 6명의 연구(2013)[4]에서는 섬유보강 콘크리트 방호벽의 155 mm 포탄의 파편 방호에 대한 성능을 실증실험을 통해 검토하였다. 본 연구에서는 탄약 및 폭발물의 시험평가를 위한 사격진지에 이동이 용이한 강재 방호벽 설치라는 내용을 중심으로 다양한 탄종별 방호벽의 두께 및 폭발압력의 거동에 대한 해석을 하기위한 프로세스를 수립하고자 하였으며, 실제 폭발물의 위험으로부터 시설, 장비 보다는 시험인원을 증점적 방호대상으로 폭발압력과 파편이 인체에 주는 영향을 고려하여 연구를 진행하였다.

UFC 3-340-02의 실험적, 경험적 폭발압력 및 파편의 산출방법을 적용하여 방호벽 및 인원에게 가해지는 위험정도를 확인 하였으며, AUTODYN 2021 R1 프로그램을 이용하여 방호력의 유효성을 검증하였다.

2. 폭발방호 이론

국내 연구기관에서 폭발에 의한 피해에 대해 많은 연

구가 이루어지고, 폭발압력과 파편의 비산반경 계산으로 피해 범위 및 피해 정도를 추정 할 수 있다. 인명피해 등을 예방하기 위한 방호목적만 고려한다면 세부적인 계산을 거치지 않고 과도한 안전율을 적용하는 것이 효과적이다. 하지만 이동식 방호벽은 과도한 안전율을 적용하면 두께와 부피에 의해 과도한 중량이 될 수 있으며, 이동간 중량에 의한 부가적인 위험성이 추가되기 때문에 세부적인 계산을 통한 적정 방호를 제공하는 두께를 산출할 필요가 있다.

Table 1. Comparison of domestic safety regulations and UFC 3-340-02

Target of damage prediction	Korea safety regulation	UFC 3-340-02
Blast load	Calculation of blast load by TNT equivalent method	
Fragment damage	Focusing on the scattering radius	Penetration force can be calculated

Table 1에서는 폭발에 대한 폭발압력 및 파편에 대한 피해를 산정하는 방식에 대해서 국내 안전관련 법규와 UFC 3-340-02를 비교하였다. 공통점으로는 폭발압력을 판단하는데 있어서 TNT 등가법을 사용하고 있다는 점이다.

국내 안전관련 법규에서는 파편의 비산반경을 기준으로 피해 범위를 예측하는 것이 주요 산정 방법이다. 또한 실제 사고 데이터를 이용하여 정성적으로 피해를 예측하기도 한다. 그러나 파편의 비산반경만을 산출하는 경우, 근접폭발에서의 방호능력을 정량적으로 확인하기 어렵다.

따라서, 파편의 관통능력에 대해 다루고 있는 UFC 3-340-02의 실험적, 경험적 식을 이용한 정량적 계산 방법이 방호벽을 설계함에 있어서 객관적인 결과를 도출할 수 있으며, 방호벽의 안전성능의 유효성을 판단하는데 도움이 된다.

2.1 폭발방호 시스템(Explosive Protective System)

폭발방호 시스템이란 폭발위험이 있는 시설에서 위험성에 대해 시설 또는 인명 피해를 예방 또는 방지하기 위한 시스템이다[2]. 이는 제조 및 생산 시설 내에서 주로 이용되는 방호시스템 체계를 말하지만 고폭탄 등과 같이 탄약의 폭발 가능성이 존재하는 시험평가 업무와 관련하여 적용 시킬 수 있다.

폭발방호 시스템의 개요를 Fig. 1에서 나타내고 있다.

폭발방호 시스템은 피해를 직접적으로 주는 ①피해유발 요소, 폭발 및 파편과 기타 수반되는 위험요소에 피해를 받을 것으로 예상되는 ②방호대상물, 방호대상물의 피해를 완화하거나 방지하는 방호 ③시스템이 있다.

인위적으로 통제가 용이한 것은 방호시스템이며, 피해 유발요소, 방호대상물을 고려하여 적절히 적용시키는 것이 중요하다.

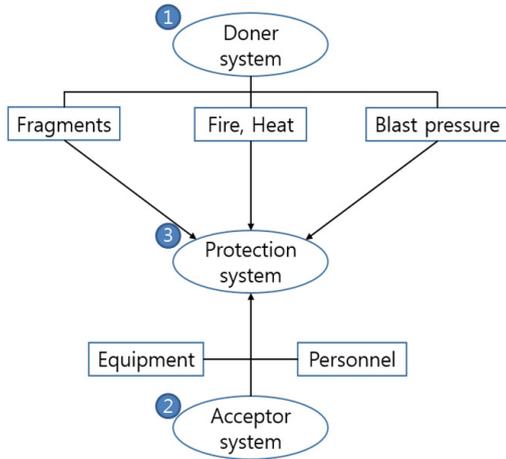


Fig. 1. Example of explosive protective system[2]

2.1.1 피해유발 요소(Doner system)

피해유발 요소는 폭발파 및 파편 등을 발생 시킬 수 있는 것을 말한다. 고폭탄약 자체나 점화원 등이 이에 해당 될 수 있다.

2.1.2 방호대상 요소(Acceptor system)

방호대상 요소는 피해유발요소로부터 직접적으로 피해를 받을 것으로 예상되는 요소를 말하며, 주요 시설, 장비, 인명은 피해를 완화 또는 방지해야 될 대상이다.

2.1.3 방호시스템(Protection system)

방호시스템은 방호대상 요소를 방호할 목적으로 설치되는 방호구조물 또는 피해를 경감시킬 수 있는 기계를 의미한다. 또한 방호시스템의 구성요소로는 위험으로부터의 거리도 해당 된다. 방호구조물은 방호벽(Barriers), 대피소(Shelters) 등이 해당 된다.

2.2 폭발압력 산정

폭발성 물질의 폭발거동 분석에 있어서 폭발압력의 산

정은 폭발로 인한 주변 피해를 예측하는데 주요한 요소가 된다. 폭발성 물질의 폭발 거동 관련 연구를 진행하는 방법은 대표적으로 TNT 등가법이 있다. 이는 증기는 폭발과 같은 국내의 가스폭발 산업사고와 고체 화약류의 폭발 관련 분석에 널리 이용되고 있으며, UFC 3-340-02에서도 TNT 등가법을 이용한 폭발 해석을 권장하고 있다[2].

TNT 등가법은 다양한 종류의 폭발물의 중량을 그 폭발물의 TNT 등가계수를 이용하여 TNT 중량으로 변환하여 폭발해석을 진행하는 것을 말한다.

TNT 등가법을 나타내는 식 (1)과 같다[5].

$$W_{TNT} = \alpha_e \times \frac{W_f \times E_{mf}}{E_{mTNT}} = \alpha_m \times W_f \quad (1)$$

Where, W_{TNT} : TNT equivalent mass

α_e : TNT equivalent factor based on energy

α_m : TNT equivalent factor based on mass

W_f : mass of explosive substances

E_{mf} : heat of combustion of explosive substances(J/kg)

E_{mTNT} : explosion heat of TNT(J/kg)

TNT 등가법으로 특정 폭발물의 질량을 TNT로 환산 이후 다음 식을 적용하여 환산거리(Z)를 구한다.

식 (2)에서 W_d 는 설계된 폭발물의 질량으로, 실제 폭발물의 질량을 TNT 당량으로 환산한다음 20%의 안전율을 적용한 질량이다.

$$Z = \frac{R}{W_d^{1/3}} \quad (2)$$

Where, Z : scaled distance($m/kg^{1/3}$)

R : distance from the origin of the explosion(m)

W_d : denotes design charge weight(kg)

폭발로 인한 폭발압력은 환산거리 Z 를 적용하여 경험식에 의해 구할 수 있다.

식 (3)은 적용이 용이하여 UFC 3-340-02에서도 최대 폭발압력을 구하는데 이용되고 있다. TNT 등가법과 환산거리를 이용하여 폭발원점으로부터 떨어진 지점이 받게 되는 최대 폭발압력 산정할 수 있다[6].

$$P_s = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (3)$$

Where, P_s : incident pressure(kPa)
 Z : scaled distance($m/kg^{1/3}$)

2.3 파편 피해 산정

파편의 피해 산정에 관해서는 UFC 3-340-02의 관통 계산식을 사용했다[2].

식 (4)는 Gurney energy 상수를 이용하여 실린더형의 탄체에 담긴 폭발물의 1차 파편의 초기비산 속도를 구할 수 있다[7]. 이때 적용되는 폭발물의 질량도 폭발압력 산정 시와 같은 방법으로 20%의 안전율을 고려하게 되어 있다.

$$v_0 = \sqrt{(2E')} \times \sqrt{\frac{W_d/W_c}{1+0.5(W_d/W_c)}} \quad (4)$$

Where, v_0 : initial velocity of fragments(m/s)
 W_d : design charge weight(kg)
 W_c : weight of casing(kg)
 $\sqrt{2E'}$: Gurney Energy Constant(m/s)

식 (5)는 속도 감쇠 계수를 반영한 폭발원점으로 부터의 특정 거리에서 파편의 속도를 측정하는 것이다. 일반적인 Mild Steel(탄소강) 파편에 대해 적용할 수 있으며, 속도 감쇠 계수에는 항속계수가 포함되어 있으며 1차파편에 대해 0.6의 항속계수를 적용한다. UFC 3-340-02에 따르면, 식(5)는 20 ft(약 6 m) 밖의 거리에서 사용하며, 6 m 이내의 거리에서는 식(4)의 초기속도를 적용하도록 되어 있다[2].

$$v_s = v_0 e^{-0.0101R_f/W_f^{1/3}} \quad (5)$$

Where, v_s : fragment velocity at a distance R_f from the center of detonation(m/s)
 v_0 : initial fragment velocity(m/s)
 R_f : distance from the center of detonation(m)
 W_f : fragment weight(kg)

식 (6)은 파편의 속도를 계산하면 파편의 무게와 속도를 이용하여 탄소강 파편이 탄소강으로 이루어져 있는 강재를 관통하는 깊이를 구하는 식이다. 일반 탄소강의 파편이 강재를 관통할 때의 관입깊이(mm)를 구할 수 있다. 강재의 조건은 브리넬 경도 150 이상의 강재라는 조건이 있다.

$$x = 25.4 \times 0.21 \{ (35.274/1000) W_f \}^{0.33} \times \{ (3.281/1000) V_s \}^{1.22} \quad (6)$$

Where, x : depth of penetration(mm)
 W_f : fragment weight(g)
 V_s : striking velocity of fragment(m/s)

최종적으로 관통력을 산정한 이후, 방호력을 유효하게 제공할 것으로 판단되는 두께를 산정할 수 있다. 방호벽 설계의 핵심은 인명피해 방지이며, 인원이 파편에 그대로 노출되지 않도록 하는 것이 중요하다.

Fig. 2는 연구절차 개념도이다. 조사된 폭발방호 이론과 가장 위험한 사고시나리오 1가지를 수립하고, 그에 대한 폭발압력 및 파편피해의 정도를 경험, 실험적식으로 산출한 후 시뮬레이션을 통해 방호벽 뒤의 인원의 피해 가능성을 판단하고 설계를 확정하는 절차를 가지고 있다.

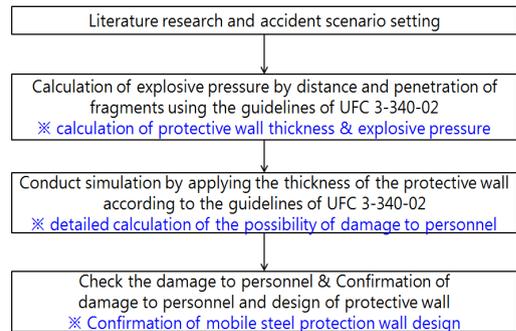


Fig. 2. Conceptual diagram of research procedure

3. 방호벽 설계 절차 및 시나리오

3.1 방호벽 설계 절차 수립

방호 구조물의 설계 절차를 요약 해보면 크게 일반구조 및 형상 설계, 방호수준 결정 및 방폭 및 방탄 성능결정, 제작사양서 등 작성을 통한 설계 반영의 단계를 거쳐야 하며 Fig. 3에서 절차 보여주고 있다.

첫 번째, 일반 구조 및 형상 설계를 실시한다. 일반 구조 및 형상은 방호구조물을 사용하게 될 사용자가 목적에 맞게 사용할 수 있도록 하는 것이다. 즉 이동형 방호벽이 시험평가 업무의 작업내용에 방해가 되지 않아야 한다.

두 번째, 형상 및 구조를 사용목적에 맞게 설정 한다면 잠재적인 위험상황에 맞는 방폭 및 방탄 설계가 필요하

다. 방폭 및 방탄 설계에서는 UFC 3-340-02 등의 자료를 참고하여 폭발하는 화약류의 정보를 파악하고, 사고의 시나리오를 설정하여 방호대상물의 위치에서 받는 피해를 산정 할 준비를 한다.

세 번째, 경험식 및 실험식에 의한 방호대상물의 응답을 산출하여 적절한 방호력을 가질 수 있는지 확인하고 가능하다면 실증실험 또는 Autodyn 등의 프로그램을 이용해 가시적인 방호구조물의 응답을 확인 하여 설계를 변경하거나 확정하는 과정이 필요하다.

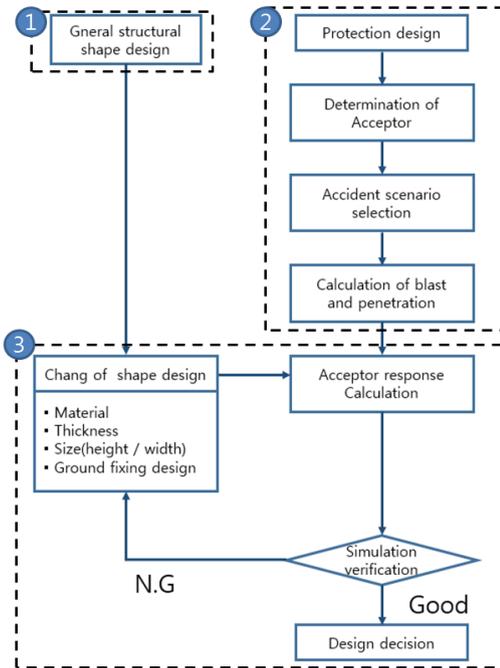


Fig. 3. Protection design process

3.2 사고시나리오

사고시나리오는 일정 거리에서 고폭탄이 폭발하는 시나리오로 적용하였다. 고폭탄의 경우 시험평가 국방규격에서 신관 종류에 따라 조기폭발을 ①초기폭발(Premature), ②고도 상승 시 조기 폭발(UP-leg Early), ③초기폭발(Early)과 같이 3가지 세부항목으로 구분하는 경우가 있다. Fig. 4에서는 고폭탄의 비행 중 조기폭발의 용어 설명이며, KDS 국방규격에서는 탄약 시험 간 이러한 조기폭발 현상이 발생하는 것을 신관의 주요 결점 중 하나로 정하고 있다.

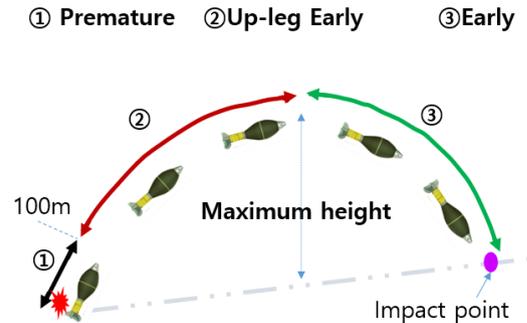


Fig. 4. Examples of early explosions of HE

조기폭발로 인해 발생 가능한 사고 중에서 가장 위험한 시나리오는 100 m 이내에서 초기폭발(Premature)이다. 100 m 이내 에서의 초기폭발은 사례가 거의 없지만, 국방규격 등에서 신관의 주요 결점으로 분류 되어 있는 만큼 발생할 가능성은 존재한다. 따라서 인명피해를 최우선적으로 방지해야 하는 안전관리 측면에서는 가능성이 낮더라도 초기폭발을 반드시 고려해야 한다. Table 2은 방호대상물(Acceptor)과 사고시나리오를 선정 한 내용이다.

Table 2. Acceptor and scenario selection

Division	Selection
Determination of acceptor	Personnel, Protection wall
Accident scenario	Premature explosion of HE (7m)

시나리오는 앞서 언급된 고폭탄의 초기폭발이며, 시험 간 고폭탄과 인원의 거리 차이를 고려하여 고폭탄이 발사되어 포신을 통과함과 동시에 인원과 방호벽으로부터 7 m의 근접거리에서 고폭탄의 폭발에 의한 피해를 기준으로 하였다.

또한 사고시나리오에 적용된 폭발물의 정보는 다음과 같다. 시나리오에 반영된 고폭탄은 방호벽을 설치 할 사격진지에서 시험평가가 수행되는 고폭탄 중 고위험 고폭탄의 정보를 참고하여 적용하였다.

시나리오의 개념도는 Fig. 5와 같다. 장소는 평지이며, 주변에 장애물은 없다고 가정하였다. Table 3은 시나리오에 적용된 고폭탄의 정보이다.

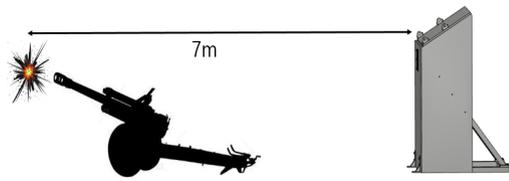


Fig. 5. Scenario concept (Explosion at a distance of 7m)

Table 3. Set explosive information

Division	Contents
Name	"A" High-explosive bomb
Explosive mass	Comp B, 8 kg
Explosive mass by safety factor(20%)	Comp B, 9.6 kg (TNT equivalent: 10.656 kg)
Gurney energy constant from UFC 3-340-02	Gurney energy of Comp B 2710 m/s
Total mass of cylinder (material)	43kg (mild steel)

* The information is different from the actual HE

추가적으로, 파편의 관통력 계산에서는 파편의 초기속도와 질량이 주요 변수이다. 따라서 설정된 사고시나리오에서 발생할 파편의 질량을 설정하는 과정이 필요하다.

고폭탄 폭발 시 형성된 파편의 질량에 대한 질량 분산 확률을 이용한 파편의 평균 및 최대 중량 판단 방법인 Mott's distribution이 있다. 하지만 실제 실린더형 고폭탄 폭발 시 탄체 질량의 약 20%가 파편 형성에서 제외될 수 있으며, 이 방법을 이용해 산술적으로 파편의 중량을 확인하는 것은 실제 파편의 형성과 차이가 있을 수 있다고 판단하였다[8].

따라서 고폭탄의 실증실험 의한 결과를 참고하여 파편의 질량을 설정하였다. 155 mm 고폭탄 KD 544의 폭발 실증실험에서 발생한 파편이 평균 60 g 이었고, 7 g에서 113 g의 질량 범위였으며[11], 사고시나리오의 고폭탄은 KD 544 고폭탄 보다 탄체 자체의 질량이 높기 때문에 130 g 크기의 질량으로 설정하였다. 또한 시뮬레이션 검증을 고려하여 파편의 모양은 실린더형으로, 재질은 일반 탄소강으로 Table 4와 같이 설정하였다.

Table 4. Fragment information

Division	Contents
Mass	0.13 kg
Shape	Cylinder
Material	mild steel(steel 1006)

4. 계산에 의한 피해 산출 결과

4.1 폭발압력 산정 결과

방호벽이 받는 폭발압력의 산정은 방호벽이 폭발원점으로부터 7 m 거리에 이격되어 있고, 폭발은 지상으로부터 1 m 위치에서 발생한 것으로 설정된 시나리오에 따라 수행하였다.

폭발물의 정보와 식 (1)~(3)을 이용한 거리별 폭발압력의 산정결과는 Table 5와 같으며, 폭발원점으로부터 2 m의 거리부터 7 m까지 받는 폭발압력을 나타낸다. 계산 결과 시나리오의 방호벽이 받는 폭발압력은 77.74 Kpa로 계산되었다.

Table 5. Calculation result of explosion load by distance

Distance (m)	scaled distance (m/kg ^{1/3})	Explosion load (kPa)
1	0.454	18568.06
2	0.909	2341.12
3	1.363	717.23
4	1.818	319.95
5	2.272	176.51
6	2.727	111.69
7	3.181	77.74

4.2 방호벽에 대한 파편의 관통력 계산 결과

Table 4에 설정된 파편의 질량을 반영하고, 식 (4)~(6)을 이용하여 파편의 초기속도와 SS275에 대한 관통력을 계산하였다.

그 결과 고폭탄 폭발에 의한 파편의 초기속도는 1243.16 m/s, 7 m 까지의 거리별 파편 속도와 파편의 관통력은 Table 6과 같으며, 시나리오의 방호벽이 영향 받는 파편의 관통력은 41.34 mm 였다.

Table 6. Calculation result of fragment velocity and penetration thickness by distance

Distance (m)	Fragment velocity (m/s)	Penetration thickness (mm)
0	1243.16	48.99
1	1218.67	47.82
2	1194.66	46.67
3	1171.12	45.56
4	1148.05	44.46
5	1125.43	43.39
6	1103.26	42.36
7	1081.52	41.34

5. 피해방지 설계 및 검증 시뮬레이션

UFC 3-340-02의 지침에 따라 구해진 수치적 계산 결과 값에 따라 1차적으로 방호벽의 두께가 50 mm이어야 한다는 사항이 설계에 반영된 후 방호벽의 형상을 구체화 하여 시뮬레이션을 실시했다. 시뮬레이션 검증 수행은 고폭탄에 대해 경험, 실험적으로 구해진 방호 수치가 알맞는지 최종 확인을 하기 위함이다. 시뮬레이션에 의한 폭압의 영향, 파편의 관통력 값과 수치적 계산 값을 비교 하면서 방호벽의 안전성에 대한 재확인과 수치적 계산이 힘든 방호벽 뒤편에 폭발압력의 영향을 확인하여 완성도 있는 설계를 실시 할 수 있다.

5.1 폭발압력 및 파편 피해 방지 설계

설정된 시나리오에서 구해진 결과 값을 이용하여 유효한 방호력을 가질 수 있는 방호벽의 사양을 대략적으로 산출할 수 있다. Fig. 6에서는 설정한 폭발 시나리오에서 방호벽에 도달하는 폭발압력과 파편의 SS275에 대한 관통두께를 나타내고 있으며, 여기서 고려해야 할 점은 방호벽을 타고 인원이 있는 내부로 넘어가는 폭발 압력의 산정이 필요하다고 판단되었다.

계산 상 폭발원점으로부터 직선방향으로 받는 폭발압력은 77.74 kPa이며, 방호벽을 넘어가서 인원에게 도달하는 폭발로 인한 압력을 확인해야 정확한 인원 피해를 산정 할 수 있다. 폭발 과압에 의한 사람의 귀의 피해 정도는 Table 7과 같다. 또한 폭발 과압에 의한 사람의 폐의 피해 정도는 Table 8과 같다.

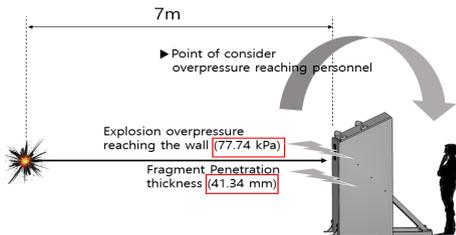


Fig. 6. Points to applied to the protection wall specification

Table 7. Ear damage due to explosion overpressure[10]

Maximum effective overpressure(kPa)	Type of Damage
19.6	1% ruptured eardrums
34.3	5% ruptured eardrums(Threshold)
49	10% ruptured eardrums
98.1	50% ruptured eardrums
205.9	85% ruptured eardrums

Table 8. Lung damage due to explosion overpressure[11]

Maximum effective overpressure(kPa)	Type of Damage
210 to 280	Threshold
560 and above	50% damaged lungs
700 to 850	Threshold of lethality
900 to 1300	50% lethality
1400 and above	Near 100% lethality

Table 7과 Table 8에서 알 수 있듯이, 사람이 폭발 압력에 가장 약한 부분은 귀의 고막이다. 폐와 다른 신체 부분은 귀에 비해 상대적으로 5%의 사람이 고막 파열의 가능성이 있는 폭발 압력인 34.3 kPa 이하에서는 대부분의 인원의 신체가 안전 할 수 있다. 앞서 계산된 폭발 압력이 방호벽이 놓인 위치인 7 m에 도달하는 수치는 77.4 kPa이기 때문에 방호벽이 없더라도 파편이 발생하지 않는다는 가정 하에 고막파열의 가능성은 존재하나, 사망에 이르는 않을 것으로 판단된다.

파편 피해는 앞서 7 m 거리에서 공기저항을 고려하여 약 41.34 mm의 관통력을 가지는 것으로 계산 되었으며, 방호벽의 두께를 50 mm 이상으로 설정한다면 안전하다고 판단된다.

결론적으로, 계산식에 의한 폭발압력 및 파편의 피해를 방지하기 위한 기본적인 방호설계는 두께 50 mm, 높이는 사람의 키보다 높은 2 m의 방호벽으로 결정되었다.

5.2 방호력 검증 시뮬레이션

방호력을 확인하기 위한 시뮬레이션 프로그램은 ANSYS AUTODYN 2021R을 사용 하였다. AUTODYN은 폭발 및 파편에 의한 거동 시뮬레이션에 특화되어 있다. 파편 피해에 대해서는 Lagrange 해석을 이용하였으며, 폭발 압력 확인에 대해서는 Lagrange-Euler 해석을 이용하였다.

5.2.1 폭발압력 산정 시뮬레이션

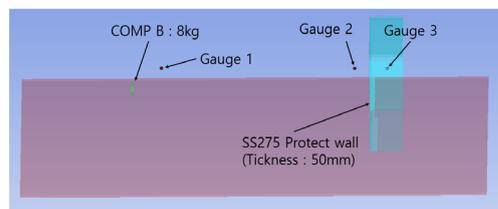


Fig. 7. Overpressure simulation overview

시뮬레이션은 Fig. 7과 같이 지면으로부터 높이 1 m 인 폭발원점으로부터 직선거리 상 7 m의 거리에 방호벽의 앞면을 세우고, 콘크리트 바닥에 고정되어 있다고 가정하였다. 이외의 정보는 사고시나리오와 같은 정보를 반영하였다. 폭발원점에 인접한 압력을 측정해보기 위해 게이지 1을 이용하였고, 위치는 지면으로부터 높이 1.6 m, 폭발원점으로부터 1.5 m 거리에 설치하였다. 방호벽 인접거리에서 압력을 측정할 수 있는 게이지 2,3을 설치하였으며, 지면으로부터 높이 1.6 m, 방호벽 앞쪽과 안쪽으로 0.8 m 거리에 설치하였다. 대기(Air)는 가시적으로는 가로 14 m, 세로 6 m, 높이 4 m의 공간을 적용하였다.

Table 9에서는 시뮬레이션에 반영된 방호벽의 재질인 SS275의 물성 수치를 나타내었다.

Table 9. preoperties of protect wall(SS275)

Properties	Value
Density (g/cm ³)	7.83
Yield stress (MPa)	400
Hardening constant (MPa)	410
Bulk Modulus (GPa)	159
Size	2m(W) × 1m × 2m(H) Thickness of front side : 50mm

Fig. 8에서는 속도 벡터를 이용하여 확인한 폭발 파동의 이동을 보여주고 있다. 고폭탄의 폭발 이후 19.54 ms에서는 방호벽 앞면에서 반사되어 폭발원점 방향으로 이동하는 파동을 볼 수 있다.

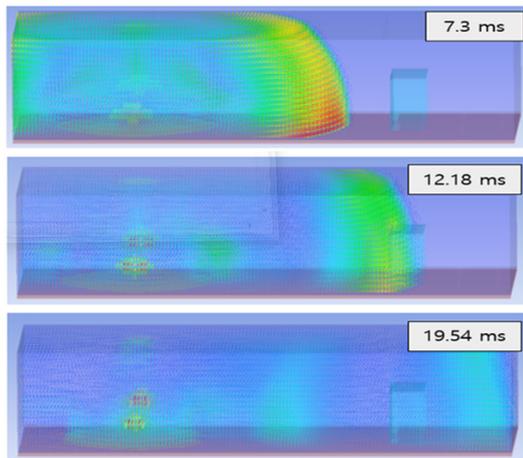


Fig. 8. Conceptual wave expansion sequence using velocity vectors

Fig. 9에서는 게이지 1,2,3 위치에서 시간에 따른 압력을 측정된 결과이다. 게이지 1에서는 폭발원점과 약 2400 Kpa의 압력이 측정되었다.

게이지 2,3의 최대압력은 게이지 2가 160 kPa, 게이지 3이 119.5 Kpa로 측정 되었다. 측정된 압력들은 대기압 101.325 Kpa의 압력이 합산된 수치로 실질적인 폭발에 의한 과압은 게이지 2번이 58.68 kPa, 게이지 3번이 18.175 kPa로 측정된 것이다.

따라서 시뮬레이션 결과, 방호벽 안쪽에 있는 인원이 받을 수 있는 압력은 18.175 kPa로 1%의 인원의 고막이 파열 될 수 있는 압력 보다 낮았다.

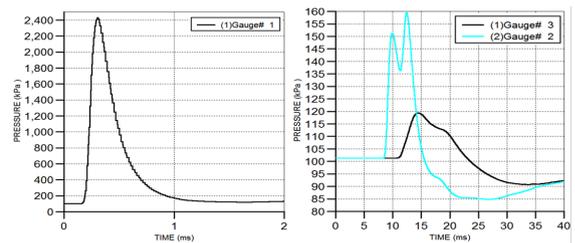


Fig. 9. Pressure v.s. Time of gauge number

5.2.2 파편관통력 산정 시뮬레이션

파편관통력을 확인하기 위한 시뮬레이션의 구성요소는 130 g의 질량을 갖는 높이가 바닥 지름의 2배인 실린더형 파편과 50 mm의 두께를 갖는 SS275 강재 재질 벽을 이용했다. 방호벽은 고정되어 있도록 설정하고 방호벽에 직각으로 입사되며 Table 6에 의해 구해진 7 m 거리에서의 충돌속도인 1081.52 m/s를 적용했다. 파편의 물성은 탄소강인 STEEL 1006을 적용했다.

Table 10에서는 파편의 기본정보를 나타내고 있다. 파편의 관통 시뮬레이션 양상은 Fig. 10에서 보여주고 있다. 130 g의 파편이 방호벽 강재에 1081.52 m/s로 직각입사가 된다면, 결과적으로 50 mm 두께의 SS275 재질 방호벽을 통과하지 못했다.

Table 10. Properties of fragment material(Steel 1006)

Properties	Value
Density (g/cm ³)	7.896
Yield stress (MPa)	285
Bulk Modulus (GPa)	140

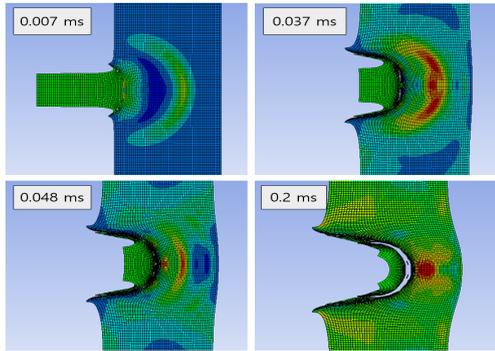


Fig. 10. Fragment impact simulation by AUTODYN

Fig. 11는 파편의 충격 후 0.2 ms의 시점의 결과를 보여준다. 파편은 약 35.56 mm의 깊이로 관입되었으며, 파편을 이루고 있는 노드들은 속도벡터가 파편 이동속도의 반대방향으로 전환되어 방호벽 면과 공간이 생긴 것을 볼 수 있다.

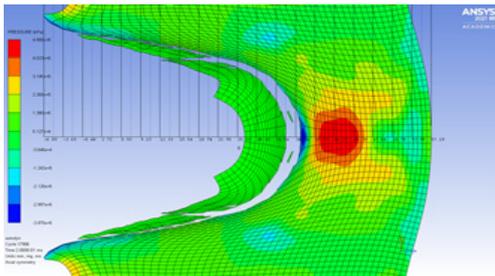


Fig. 11. Fragment penetration simulation at 0.2 ms

6. 결론

고폭탄의 근접거리 폭발에 대한 시나리오를 1가지 설정하여 폭발 압력의 크기가 인체에 주는 영향을 고려한 방호벽 뒤의 인원 피해 예상 및 발생하는 파편의 관통력 계산을 통한 방호벽 두께 설정을 하였다. 이는 방호벽을 사용하는 인원의 임무에 맞는 형상 설계보다 앞서서 최악의 사고시나리오에서 방호벽 뒤에 있는 인원이 과연 안전한가에 대해 판단하는 과정이었다.

시나리오에서 설정된 고폭탄이 곡사포에서 발사된 뒤 바로 초기폭발(Premature explosion)되었을 때, 방호벽 뒤의 인원까지 영향을 주는 폭발압력과 방호벽 재질에 대한 파편의 관통력에 대해 수치적 계산과 시뮬레이션 결과는 Table 11과 같았다.

Table 11. Difference between numerical calculation and simulation result

Cause of damage	Numerical Method (UFC 3-340-02)	Simulation (AUTODYN)
Overpressure (kPa)	Protect wall : 77.74	Protect wall : 58.68 personnel : 18.175
Fragment penetration (mm)	41.34	35.56

AUTODYN 시뮬레이션에서는 결과 값이 수치적 계산보다 다소 낮았으며, 폭약량에 안전성을 고려하는 수치적 계산 특성상 시뮬레이션의 거동보다 높게 산정된 것이라고 판단된다.

위 결과를 통해 방호벽 뒤의 인원이 안전하게 시험을 진행 할 수 있는지에 대해 판단하였으며, 수치적 계산을 통하여 방호벽의 방호사양을 설정하고 시뮬레이션을 이용해 검증절차를 거치는 과정이기 때문에 다른 탄약 품목의 방호시설을 구축할 때 참고할 만한 자료가 될 수 있다. Table 11의 결과에서는 인간의 피해 한계 미만의 폭발압력과 방호벽이 파편을 방호할 수 있는 것으로 확인되었다.

다만, 시험현장의 모든 환경적 요소를 고려할 수 없어 실증시험과 같은 실제 폭발시험으로 얻어진 수치 또는 주변 장애물들을 세부적으로 고려하여 산정한 수치와는 차이가 있음을 고려해야 한다.

References

- [1] K. Y. Kim, KOSHA GUIDE P-102 Technical guidelines for predicting accident damage, Technical report, Korea Occupational Safety and Health Corporation, Korea, pp.1
- [2] U.S. Department of Defense, Unified Facilities Criteria: Structures to resist the effects of accidental explosions, UFC 3-340-02, 2008
- [3] Y. J. Park, M. S. Lee, H. M. Lee, "Suggestion on the Prototype of the Korean Barriers Through the Investigation and Modeling of RC Protective Installments in Contact Areas", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 16, No. 4, pp.341~348, 2016
DOI: <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2016.16.4.341>
- [4] I. C. Lee, H. S. KIM, J.S. Nam, S. B. Kim, G. Y. Kim, "Evaluation of Protective Performance of Fiber Reinforced Concrete T-Wall", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 13, No. 5, pp.465~473, 2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2013.13.5.465>

- [5] Y. K. Yoon, "Evaluation of blast pressure generated by an explosion of explosive material", *journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 36, No. 4, pp.26~34, 2018.
- [6] D. J. Jeon, M. J. Lee, S. E. Han, "A Modified Equation of Parameter of Free-air Blast Load", *journal of Korean Association for spatial structures*, Vol. 16, No. 4, pp.117~123, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.9712/KASS.2016.16.4.117>
- [7] J. E. Kennedy, gurney Energy of Explosives : Estimation of the Velocity and Impulse Imparted to Driven Metal, Research report, Sandia Laboratories, U. S, pp.12
- [8] C. S. Hwang, Y. H. Park, S. K. Park, "The Study on the Fragment Ejection Velocity and Spray Angle from a High Explosive Cylindrical Warhead", *journal of Korean Society of Aeronautical & space Sciences*, Vol. 47, No. 12, pp 904~912, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.12.904>
- [9] I. C. Lee, H. S. Kim, J. S. Nam, "Evaluation of Protective Performance of Protection Materials for Field and Structural Body by Ignition of 155mm Artillery Shell and C-4 Explosive", *journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, pp.493~500, 2013
- [10] W. S. Han, M. Son, H. J. Park, Study on analysis model and effect factors in fire and explosion accidents(II), Research report, Occupational Safety & Health Research Institute, Korea, pp.23
- [11] A. Malhotra, D. Carson, S. McFadden, "Blast pressure leakage into buildings and effects on humans", *Procedia Engineering journal*, Elsevier Ltd, Guangzhou, China, Procedia Engineering 210, pp. 386~392, 2017

전 인 범(In-Beom Jeon)

[정회원]



- 2014년 2월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 (공학사)
- 2018년 7월 ~ 2019년 12월 : KCC 대죽공장 안전환경부 사원
- 2019년 2월 : 인하대학교 일반대학원 환경안전융합전공 (공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질 원 연구원

<관심분야>

산업안전, 소방, 위험물, 화재·폭발 방호