

프로빗 함수를 이용한 고폭탄의 위험성에 대한 연구

황경섭*, 전인범
국방기술품질원

A Study on the Risk of High Explosive using Probit Function

Gyeong-Seop Hwang*, In-Beom Jeon
Defense Agency for Technology and Quality

요약 본 연구에서는 155 mm 고폭탄의 조기 폭발에 대한 위험성을 파악하기 위해 폭발 시 주위에 위치한 사람 및 구조물에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다. 고폭탄의 폭발로 인한 사람 및 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해 폭발과압 및 충격량을 기존 연구에서 제시된 상관식을 이용하여 예측 및 비교하였다. 또한, 예측된 폭발과압 및 충격량을 이용하여 고폭탄의 폭발 시 사람 및 구조물에 미치는 영향을 프로빗 함수를 통해 확률론적으로 분석하였다. 본 연구의 결과로 폭원과의 거리가 5 m 이하에서 기존 상관식을 이용해 예측된 폭발과압 및 충격량은 일부 결과를 제외하고 대부분 폭원과 가까울수록 높은 경향이 관찰되었다. 폭발에 의한 사람의 부상은 폐 손상으로 사망하지 않는 것으로 확인되었으며 고막 파열, 머리 충격 및 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률은 폭원과 가까울수록 높게 나타났다. 한편, 폭발에 의한 구조물의 손상은 유리창은 파손되며 구조물의 붕괴, 심각한 및 가벼운 손상 확률은 폭원과의 거리가 2 m일 때 가장 높은 것으로 나타났다. 본 연구는 고폭탄의 사격시험 시 조기 폭발에 대한 폭발 특성 및 위험성을 파악하는데 기초 자료로 활용될 것으로 판단된다.

Abstract The present study was conducted on the effect of an explosion on humans and structures located around it. This was done to understand the risk of a premature explosion of a 155 mm high explosive. The explosion overpressure and impulse were predicted using previous correlations and compared. In addition, probabilistic analysis was performed using probit functions to analyze the effect on humans and structures using the predicted overpressure and impulse. As a result, when the distance from the explosion source was 5 m or less, it was observed that the overpressure and impulse predicted using the previous correlations tended to increase when closer to the explosion source except for some results. Humans were not shown to die from lung damage from the explosion. The probability of eardrum rupture, death from head impact, and whole-body displacement impact was higher when closer to the explosion source. The effect of the explosion on the structures was observed to have the highest probability of major and minor damage and collapse of a structure when the distance from the explosion source was 2 m, and the window was damaged at all distances. The present study will be used as a basic data to understand the blast characteristics and risk of premature explosion during the test of high explosives.

Keywords : Explosion, High Explosive, Overpressure, Impulse, Probit Function

*Corresponding Author : Gyeong-Seop Hwang(Defense Agency for Technology and Quality)
email: qweasd4121@gmail.com

Received September 7, 2022

Revised October 5, 2022

Accepted October 7, 2022

Published October 31, 2022

1. 서론

고폭탄(HE: High Explosive) 등 저장 탄약의 성능유지와 수명주기 판단을 위해서 국방기술품질원은 검사 및 시험을 실시하여 안전성, 사용가능성 및 신뢰성을 수리·통계적으로 분석 및 평가한다. 또한, 사용유무, 정비 및 폐기 등을 판단하고 수명특성체계를 연구해야 하며 이를 저장탄약신뢰성평가(ASRP: Ammunition Stockpile Reliability Program)라 한다. 하지만, 고폭탄 중 박격포탄 또는 곡사포탄류의 사격시험 시 비정상 폭발(예를 들면, 조기 폭발 등)로 인해 인명 또는 재산피해가 발생할 위험성이 존재한다. 사격시험 시 사수 1인의 사격탄약 수는 군 훈련에서의 사수 1인당 사격탄약 수에 비해 많으며, 방위산업체의 신규개발 품목도 시험하고 있어 위험성이 매우 크다. 국내의 경우 고폭탄의 사격시험 도중 폭발 사고로 인해 인명피해가 다수 발생하였다. 이러한 고폭탄의 폭발 시 발생하는 과압(overpressure), 충격량(impulse)은 폐 및 고막 등 장기 손상, 파편에 의한 인체 관통 등 주위 시험인원에게 영향을 미칠 수 있다. 미국 국방부의 UFC(Unified Facilities Criteria) 3-340-02[1]에 따르면, 폭발압력에 의한 부상에 있어 공기를 포함하는 폐는 중요하며, 폭발압력 및 환산 충격량에 따른 폐 손상의 생존곡선과 폭발압력으로 인한 고막 손상 곡선을 제시하고 있다. 따라서 고폭탄의 조기 폭발 시 폭발압력, 충격량, 파편의 속도 등은 사격시험 시 시험인원 안전의 중요한 변수이며 위험성을 감소시키기 위한 연구가 이루어질 필요가 있다.

고폭탄의 사격시험 시 비정상 폭발 발생으로 사람 및 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 폭발파의 변수(예를 들면, 과압, 충격량, 지속 시간 등)를 파악하여야 하며 예측을 통해 폭발과압, 충격량 등을 산정할 수 있다. 하지만, 고폭탄의 폭발 시 폭발파의 변수를 예측하는 것은 폭발물의 특성과 보안의 이유로 공개되지 않아 어려움이 존재한다. 한편, 널리 사용되는 UFC 3-340-02에서 폭발파의 변수에 대해 공개되어 있으며, 해당 기준은 표준 대기압 및 온도 조건에서 TNT 폭발에 대해 Kingery와 Bulmash[2]가 개발한 폭발파의 변수 곡선을 포함하고 있다[3]. 하지만 Kingery와 Bulmash의 연구를 기반으로 환산거리에 따른 폭발파의 변수 변화 그래프가 제시되어 고폭탄의 비정상 폭발에 대해 UFC 3-340-02 그래프를 이용한 폭발파의 변수 예측 시 신뢰성 검토가 필요하다.

폭발 시 사람 및 구조물은 폭발과압, 충격량 등의 중

요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 폭발의 영향 및 구조물의 응답 특성에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있다[2,10-25]. 이에 대해 Ullah 등[3]은 폭발파의 변수를 예측하는 상관식에 대해 정리 및 비교하여 제시하였다. Ullah 등의 연구는 고체 폭발물의 폭발에 대해 다양한 예측 상관식을 비교하였으나, 세부적인 조건(예를 들면, 폭약량, 이격거리 등)에 대한 정보는 제시되지 않았다. 이러한 이유로 Ullah 등의 연구 결과를 토대로 군용 고폭탄의 폭발 상황에서 폭발과압, 충격량 등을 예측하는 것은 제한적이기 때문에 군용 고폭탄의 폭발 조건에 대한 연구가 수행되어야 한다. 한편, 폭발 상황에서 예측된 폭발과압, 충격량을 이용하여 사람 및 구조물에 미치는 영향을 확률론적으로 분석할 수 있다[4,5]. 이때, 가상 사고의 피해 크기와 피해 가능성의 상관관계를 실험식으로 분석하는 프로빗 함수(probit function)를 이용한다. 이러한 프로빗 함수를 이용하여 폭발 사고 시 사람 및 구조물에 미치는 영향을 확률론적으로 분석할 수 있으며, 기존 연구에서 프로빗 분석(probit analysis)을 이용한 연구가 일부 수행된 바 있다[6,7]. 기존의 프로빗 분석을 이용한 연구는 화학물질이 유출되어 폭발하는 증기운 폭발 조건에서 사람 또는 구조물에 미치는 영향에 대해 연구가 수행되었다. 하지만 군용 고폭탄의 비정상 폭발 조건에서 폭발하중을 산정하는 방법과 차이가 있어 사람 및 구조물에 미치는 영향이 달라질 가능성이 있다. 또한, 기존 연구[6,7]는 매우 높은 폭발과압 조건에서 40~400 m에 위치한 사람 또는 구조물에 미치는 영향을 파악하여 비교적 짧은 거리에 위치한 대상물에 미치는 영향을 파악한 연구는 찾아보기 힘든 상황이다. 따라서, 군용 고폭탄의 사격시험 시 비정상 폭발 조건에서 주위에 위치한 시험인원 및 구조물에 미치는 영향에 대해 세부적인 연구가 이루어질 필요가 있다.

본 연구에서는 기존 연구에서 제한적으로 수행되었던 군용 고폭탄의 사격시험 시 비정상 폭발 즉, 조기 폭발 조건에서 주위 시험인원 및 구조물에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다. 군용 고폭탄으로는 155 mm 포탄을 이용하였으며, 다양한 예측 상관식을 이용하여 조기 폭발 시 주위에 미치는 영향으로 폭발과압 및 충격량을 산정하여 비교 및 분석하였다. 또한, 예측된 폭발과압 및 충격량을 이용하여 프로빗 분석을 통해 고폭탄 사격시험 시 조기 폭발 조건에서 주위 시험인원 및 구조물에 미치는 영향을 확률론적으로 평가하여 위험성을 검토하였다.

2. 폭발 특성

2.1 폭발 이론

군용 폭발물의 경우 분해율(rate of decomposition)에 따라 고평탄 또는 저폭탄(low explosive)으로 분류된다[3]. 이때, 고평탄의 경우 일반적으로 고체 폭발물을 의미하며, 박격포탄 및 곡사포탄류가 고평탄에 해당된다. 고평탄의 사격시험 시 조기 폭발의 경우, 폭발물의 구속이 없는 비구속 폭발로 정의된다[1]. 또한, 고평탄의 조기 폭발은 폭발 위치에 따라 비구속 폭발 중 대기 중에서 폭발이 발생하는 구형 폭발(spherical explosion), 지표면과 근접하거나 또는 지표면에서 폭발이 발생하여 지표면 반사에 의해 초기 충격파가 증폭되는 반구형 폭발(hemispherical explosion)로 분류된다.

Fig. 1에 일반적인 폭발의 시간에 따른 압력 변화를 나타내었다. 고평탄과 같은 폭발성 물질이 지상이나 공중에서 폭발하는 경우, 고온의 연소생성물이 팽창하면서 주변 대기를 압축하여 압력 상승이 발생하고 상승된 압력은 폭풍파(blast wave)의 형태로 전파된다[6]. 따라서, 고평탄의 폭발은 급격하게 압력 상승을 발생시키기 때문에 순간적으로 최대압력(peak pressure)에 도달하는 충격파를 가지는 특성이 있다[7]. 폭발이 발생하면 충격파는 매우 짧은 시간(t_A) 이내로 대기압(P_0)에서 최대압력(P_{max})에 도달한다. 충격파는 시간이 지날수록 감소하여 양의 압력 구간(t_d)이 끝나면 음의 압력 구간으로 변화하고, 점차 대기압으로 압력이 변화한다. 이때, 양의 압력 구간에서 시간에 따른 압력 변화를 적분한 값을 양의 충격량(i_s^+), 음의 압력 구간에서 시간에 따른 압력 변화를 적분한 값을 음의 충격량(i_s^-)이라 한다. 기존 연구[4]에 따르면 폭발 시 사람 및 구조물에 중요한 영향을 미치는

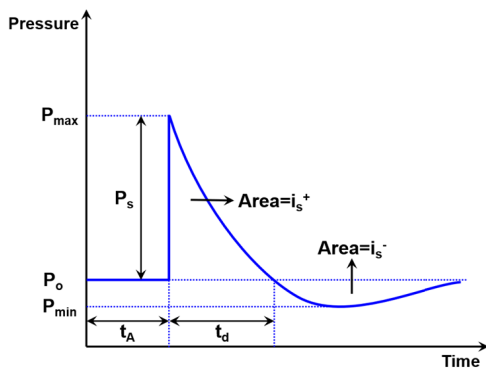


Fig. 1. Typical pressure-time profile of explosion

구간은 양의 압력 구간에서의 과압과 지속시간이라고 보고하였다. 따라서 양의 압력 구간(t_d)에서 폭발과압(P_s) 및 충격량(i_s)에 대한 연구는 매우 중요한 연구 주제 중 하나이다.

2.2 폭발과압

폭발은 에너지가 급격하게 방출되는 현상이며 열을 방출하고 가스를 생산하면서 분해된다[8]. 동시에 고평탄의 화학반응을 통해 높은 강도의 충격파를 형성하며 음속보다 빠른 속도로 충격파를 전파시킨다[9]. 폭발로 인해 빠르게 이동하는 충격파는 주위 압력을 급격하게 상승시키며 시간이 지남에 따라 압력이 점차 감소한다. 따라서, 고평탄의 폭발 시 주위 사람 및 구조물에 지대한 영향을 미치는 폭발과압을 파악하여야 한다. 폭발과압은 폭원으로부터 입사되는 최대 압력과 대기압의 차이 값을 의미한다.

다수의 기존 연구에서 실험 데이터의 분석을 기반으로 폭발과압을 예측하였으며, 다양한 실험적 및 이론적 상관식이 제시되었다. 폭발이 대기 중에서 발생하는 구형 폭발 조건에서 폭발과압을 예측하는 기존 연구를 다음과 같이 나타내었다.

Sadovskiy[10]는 Eq. (1)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \frac{0.085}{Z} + \frac{0.3}{Z^2} + \frac{0.82}{Z^3} \quad (1)$$

Where, P_s denotes overpressure (MPa), Z denotes scaled distance ($m/kg^{1/3}$) * The units of equations (1) to (17) are the same.

Brode[11]는 Eq. (2)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} \frac{0.67}{Z^3} + 0.1 & (1 < P_s) \\ \frac{0.0975}{Z} + \frac{0.1455}{Z^2} + \frac{0.585}{Z^3} - 0.0019 & (0.01 \leq P_s \leq 1) \end{cases} \quad (2)$$

Naumyenko와 Petrovskiy[12]는 Eq. (3)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} \frac{1.050}{Z^3} - 0.0981 & (Z \leq 1) \\ \frac{0.0745}{Z} + \frac{0.250}{Z^2} + \frac{0.637}{Z^3} & (1 < Z \leq 15) \end{cases} \quad (3)$$

Adushkin과 Korotkov[13]는 Eq. (4)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \frac{0.08}{Z} + \frac{0.28}{Z^2} - \frac{0.322}{Z^3} \quad (0.8 \leq Z < 18) \quad (4)$$

Henrych와 Major[12]은 Eq. (5)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} \frac{0.607}{Z} - \frac{0.032}{Z^2} + \frac{0.209}{Z^3} & (0.3 < Z \leq 1) \\ \frac{0.0649}{Z} + \frac{0.397}{Z^2} + \frac{0.322}{Z^3} & (1 < Z \leq 10) \end{cases} \quad (5)$$

Held[14]는 Eq. (6)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = 2 \frac{W^{2/3}}{R^2} \quad (6)$$

Where, W denotes charge mass of TNT (kg), R denotes distance from the center of a charge (m)

Kinney와 Graham[15]은 Eq. (7)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = P_o \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2 \right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2 \right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2 \right]}} \quad (7)$$

Mills[16]는 Eq. (8)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \frac{1.772}{Z^3} - \frac{0.114}{Z^2} + \frac{0.108}{Z} \quad (8)$$

Hopkins-Brown과 Bailey[17]는 Eq. (9)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} -1.245 + \frac{1.935}{Z} + \frac{0.2353}{Z^2} - \frac{0.01065}{Z^3} & (0.05 \leq Z \leq 1.15) \\ \frac{0.0707}{Z} + \frac{0.3602}{Z^2} + \frac{0.4891}{Z^3} & (1.15 < Z \leq 40) \end{cases} \quad (9)$$

Gelfand와 Silnikov[18]는 Eq. (10)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} 1.7 \times 10^3 \exp(-7.5 \times Z^{0.28}) + 0.0156 & (0.1 \leq Z < 8) \\ 8 \times 10^3 \exp(-10.7 \times Z^{0.1}) & (8 \leq Z) \end{cases} \quad (10)$$

Bajic[19]은 Eq. (11)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = 0.102 \frac{W^{1/3}}{R} + 0.436 \frac{W^{2/3}}{R^2} + 1.4 \frac{W}{R^3} \quad (11)$$

한편, 폭발이 지표면과 근접하거나 지표면에서 발생하는 반구형 폭발 조건에서 폭발과압을 예측하는 기존 연구를 다음과 같이 나타내었다.

Newmark와 Hansen[20]은 Eq. (12)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = 0.6784 \frac{W}{R^3} + 0.294 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Where, W denotes charge mass of TNT (kg), R denotes distance from the center of a charge (m)
* The units of equations (12) to (17) are the same.

Swisdak[21]은 Eq. (13)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \exp((A_1 + B_1 \times (\ln(Z)) + C_1 \times (\ln(Z))^2 + D_1 \times (\ln(Z))^3 + E_1 \times (\ln(Z))^4 + F_1 \times (\ln(Z))^5 + G_1 \times (\ln(Z))^6) \times 10^{-3}) \quad (13)$$

Where, A₁, B₁, C₁, D₁, F₁, and G₁ are the simplified Kingery air blast coefficients[3]

Wu와 Hao[22]는 Eq. (14)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} 1.059 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.56} - 0.051 & (0.1 \leq \frac{R}{W^{1/3}} \leq 1) \\ 1.008 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.01} & (1 < \frac{R}{W^{1/3}} \leq 10) \end{cases} \quad (14)$$

Siddiqui와 Ahmad[23]는 Eq. (15)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = 1.017 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.91} \quad (1 \leq \frac{R}{W^{1/3}} \leq 12) \quad (15)$$

Iqbal과 Ahmad[24]는 Eq. (16)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = 1.026 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.96} \quad (1 \leq \frac{R}{W^{1/3}} \leq 12) \quad (16)$$

Ahmad 등[25]은 Eq. (17)의 상관식을 제안하였다.

$$P_s = 2.46 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.67} \quad (17)$$

고폭탄 사격시험 시 조기 폭발로 인해 주위에 위치한 사람 및 구조물에 영향을 미치는 폭발과압을 Eq. (1)~(11)를

이용하여 구형 폭발과 Eq. (12)~(17)를 이용하여 반구형 폭발로 구분하여 예측 및 비교하였다. 이때, 환산거리 (scaled distance)는 폭원과의 거리(R)와 폭약량(W)의 관계로 표현된다. 환산거리는 가장 널리 사용되는 Hopkinson-Cranz 폭발 환산 법칙[26,27]을 사용하였으며 Eq. (18)에 나타내었다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (18)$$

Where, Z denotes scaled distance ($m/kg^{1/3}$), W denotes charge mass expressed of TNT (kg), and R denotes distance from the center of a charge (m)

폭약량으로 155 mm 고평탄을 이용하였으며[28], 본 연구에서 분석한 Table 1에 폭약량 및 폭원과의 거리를 나타내었다. 폭약량의 산정은 폭발물의 중량을 TNT(Trinitrotoluene) 등가계수를 이용하여 TNT 등가 중량으로 변환하는 대표적인 방법인 TNT 등가법[1]을 이용하였다. 또한, 예상하지 못한 충격과 반사의 변화 등 불확실성을 보완하기 위해 TNT 등가중량(equivalent weight)을 20 % 증가하여 산정하였다[1]. 한편, 폭발하중을 산정하는데 있어 가장 널리 사용되는 UFC 3-340-02에서 제시되는 폭발과압과 기존 상관식을 통해 예측된 폭발과압과 비교 및 분석하였다.

Table 1. Summary of explosive for predicting overpressure

Parameters	Values
Effective charge weight (Safety factor 20%) (kg)	9.63
Distance from the center of a charge (m)	1 ~ 5
Scaled distance ($m/kg^{1/3}$)	0.47 ~ 2.35

Fig. 2에 고평탄의 구형 폭발 조건에서 상관식을 이용해 예측된 폭발과압을 비교하여 나타내었다. Adushkin과 Korotkov의 상관식을 제외한 모든 상관식을 통해 예측된 폭발과압은 폭원과의 거리가 증가할수록 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 폭원과의 거리가 입사되는 폭발과압에 중요한 영향을 미치기 때문이다. 한편, 기존 상관식을 통해 예측된 폭발과압 간 차이가 나타나며 거리가 짧을수록 즉, 폭원과 근접할수록 차이가 큰 경향이 나타났다. 폭원과의 거리가 1 m($Z=0.47 m/kg^{1/3}$) 조건에서 UFC 3-340-02의 폭발과압과 가장 큰 차이가 나는

폭발과압은 Mills의 상관식을 통해 예측된 값으로 나타났다. 또한, 폭원과의 거리가 1 m일 때 Kinney와 Graham의 상관식을 통해 예측된 폭발과압이 UFC 3-340-02의 폭발과압과 가장 유사한 것으로 관찰되었다. 기존 연구[3]의 결과와 유사하게 폭원과의 거리가 짧을수록 상관식을 통해 예측된 폭발과압의 정확성이 낮게 나타났다. 또한, 폭원과의 거리가 증가할수록 상관식을 통해 예측된 폭발과압의 정확성이 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 하지만, 폭원과의 거리가 1 m 조건에서 폭발과압을 가장 높게 예측하는 Mills의 상관식 및 가장 낮게 예측하는 Henrych와 Major 상관식의 경우 기존 연구[3]의 결과와 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 기존 연구[3]의 경우 폭약량 및 폭원과의 거리 등 폭발물에 대한 세부적인 정보가 제시되지 않아 본 연구의 결과와 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

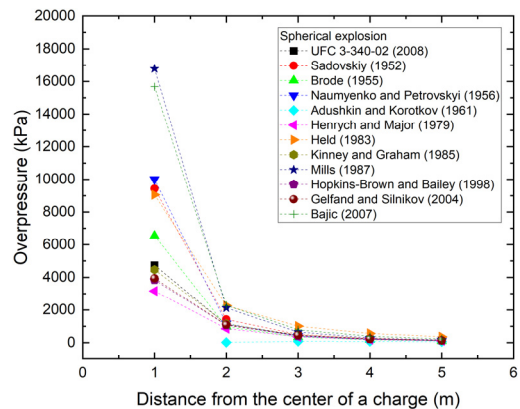


Fig. 2. Comparison of overpressure computed by previous correlations in spherical explosion

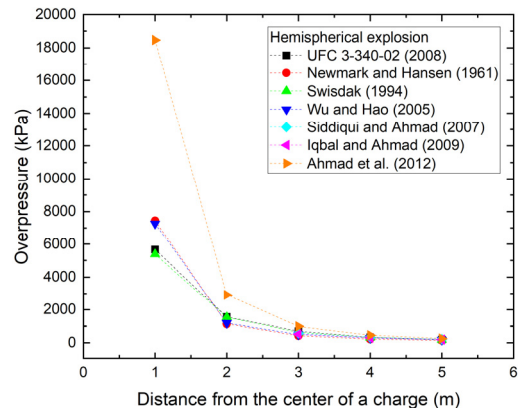


Fig. 3. Comparison of overpressure computed by previous correlations in hemispherical explosion

Fig. 3에 고평탄의 반구형 폭발 조건에서 상관식을 이용해 예측된 폭발과압을 비교하여 나타내었다. 구형 폭발 조건에서의 예측된 폭발과압의 결과와 유사하게 폭원과의 거리가 증가할수록 폭발과압이 감소하는 것으로 관찰되었다. 또한, 기존 상관식을 통해 예측된 폭발과압 간 차이가 나타났으며 폭원과의 거리가 짧을수록 차이가 증가하는 경향이 나타났다. 폭원과의 거리가 1 m 조건에서 UFC 3-340-02의 폭발과압과 가장 큰 차이가 나는 폭발과압은 Ahmad 등의 상관식을 통해 예측된 값으로 나타났다. 폭원과의 거리가 1 m 조건에서 Swisdak의 상관식을 통해 예측된 폭발과압이 UFC 3-340-02의 폭발과압과 가장 유사한 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 구형 폭발 조건과 동일하게 폭원과의 거리가 짧을수록 상관식을 통해 예측된 폭발과압의 정확성이 낮게 나타났다. 폭원과의 거리가 증가할수록 상관식을 통해 예측된 폭발과압의 정확성이 높게 나타났다. 한편, 폭원과의 거리가 5 m 보다 짧을 때, Ahmad 등의 폭발과압 예측 상관식은 다른 예측 상관식에 비해 폭발과압을 과예측하는 경향이 확인되었다. 또한, 구형 및 반구형 폭발 조건 모두 일부 상관식을 통해 예측된 폭발과압은 차이가 크기 때문에 기존 상관식을 통해 폭발과압을 예측할 경우 주의가 필요하다.

2.3 충격량

고폭탄 폭발 시 주위에 위치한 사람 및 구조물에 미치는 영향은 폭발과압 뿐만 아니라 충격량 또한 중요하다. 충격량은 시간에 따른 압력 변화를 적분한 값으로 정의되며 다수의 기존 연구에서 충격량을 예측하는 상관식을 제시하였다. 폭발이 대기 중에서 발생하는 구형 폭발 조건에서 충격량을 예측하는 기존 연구를 다음과 같이 나타내었다.

Sadovskiy는 Eq. (19)의 상관식을 제안하였다.

$$i_s = (34 \sim 36) \times 9.81 \times \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R} \quad (Z > 0.5) \quad (19)$$

Where, i_s denotes impulse (Pa·s), W denotes mass of charge (kg), R denotes standoff distance (m), and Z denotes scaled distance (m/kg^{1/3}) * The units of equations (19) to (24) are the same.

Henrych와 Major은 Eq. (20)의 상관식을 제안하였다.

$$i_s = \begin{cases} 9.81 \times W^{1/3} \left(663 - \frac{1115}{Z} + \frac{629}{Z^2} - \frac{100.4}{Z^3} \right) & (0.4 \leq Z \leq 0.75) \\ 9.81 \times W^{1/3} \left(-32.2 + \frac{211}{Z} - \frac{216}{Z^2} + \frac{80.1}{Z^3} \right) & (0.75 < Z \leq 3) \end{cases} \quad (20)$$

Held는 Eq. (21)의 상관식을 제안하였다.

$$i_s = 300 \frac{W^{2/3}}{R} \quad (21)$$

Kinney와 Graham은 Eq. (22)의 상관식을 제안하였다.

$$i_s = \frac{6.7 \sqrt{1 + (Z/0.23)^4}}{Z^2 \sqrt[3]{1 + (Z/1.55)^3}} W^{1/3} \quad (22)$$

Hopkins-Brown과 Bailey는 Eq. (23)의 상관식을 제안하였다.

$$i_s = \begin{cases} W^{1/3} \left(308.2 - \frac{106.55}{Z} + \frac{18.89}{Z^2} - \frac{0.401}{Z^3} \right) & (0.05 \leq Z \leq 1.15) \\ W^{1/3} \left(1.79 + \frac{196.0}{Z} + \frac{8.62}{Z^2} + \frac{30.5}{Z^3} \right) & (1.15 < Z \leq 40) \end{cases} \quad (23)$$

한편, 폭발이 지표면과 근접하거나 지표면에서 발생하는 반구형 폭발 조건에서 충격량을 예측하는 기존 연구를 다음과 같이 나타내었다.

Swisdak은 Eq. (24)의 상관식을 제안하였다.

$$i_s = \exp(A_4 + B_4 \times (\ln(Z)) + C_4 \times (\ln(Z))^2 + D_4 \times (\ln(Z))^3 + E_4 \times (\ln(Z))^4 + F_4 \times (\ln(Z))^5 + G_4 \times (\ln(Z))^6) \times W^{1/3} \quad (24)$$

Where, A_4 , B_4 , C_4 , D_4 , F_4 , and G_4 are the simplified Kingery air blast coefficients[3]

기존 상관식을 통해 폭발과압을 예측한 폭발물 조건 (예를 들면, 폭약량 및 폭원과의 거리)과 동일하게 충격량을 기존 상관식을 이용하여 예측하였다. 또한, UFC 3-340-02에서 제시한 충격량과 기존 상관식을 통해 예측된 충격량과 비교 및 분석하였다.

Fig. 4에 고평탄의 구형 폭발 조건에서 상관식을 이용

해 예측된 충격량을 비교하여 나타내었다. 폭원과의 거리가 2 m($Z=0.94 \text{ m/kg}^{1/3}$) 이상일 때, 폭원과의 거리가 증가할수록 충격량은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 상관식을 통해 예측된 폭발과압의 결과와 유사한 것으로 확인되었다. 폭원과의 거리가 1 m의 경우, Sadowskiy, Henrych와 Major 및 Held의 상관식을 통해 예측된 충격량은 폭원과의 거리가 2 m일 때의 예측된 충격량에 비해 높게 나타났다. 하지만, UFC 3-340-02, Hopkins-Brown과 Bailey의 상관식을 통해 예측된 충격량은 반대의 경향이 관찰되었다. 한편, UFC 3-340-02의 충격량과 근접하게 예측한 상관식은 Hopkins-Brown과 Bailey로 나타났다. 또한, UFC 3-340-02의 충격량에 비해 Henrych와 Major를 통해 예측된 충격량이 가장 높은 것으로 관찰되며, 폭원과의 거리가 짧을수록 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

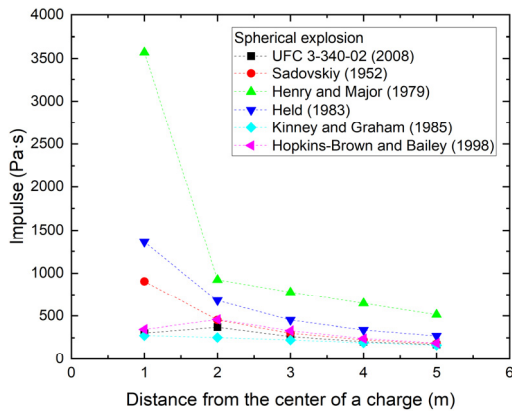


Fig. 4. Comparison of impulse computed by previous correlations in spherical explosion

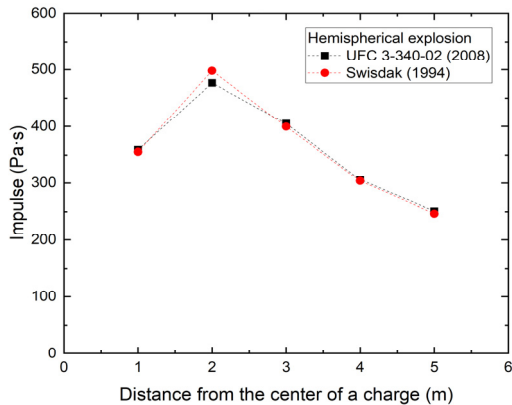


Fig. 5. Comparison of impulse computed by previous correlations in hemispherical explosion

Fig. 5에 고풍탄의 반구형 폭발 조건에서 상관식을 이용해 예측된 충격량을 비교하여 나타내었다. 구형 폭발 조건의 결과와 동일하게 폭원과의 거리가 2 m 이상일 때, 폭원과의 거리가 증가할수록 충격량은 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 폭원과의 거리가 1 m일 때, 상관식 및 UFC 3-340-02를 통해 예측된 충격량은 폭원과의 거리가 2 m일 때의 충격량보다 낮은 것으로 나타났다. 한편, Swisdak의 상관식을 통해 예측된 충격량은 UFC 3-340-02의 예측값과 유사한 것으로 관찰되었다.

3. 프로빗 분석

고폭탄의 폭발 시 폭발과압 및 충격량은 주위에 위치한 사람 및 구조물에 중요한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 UFC 3-340-02를 통해 예측된 폭발과압 및 충격량을 이용하여 사람과 구조물에 미치는 영향을 프로빗 분석[4]을 통해 확률론적으로 평가하였다. Eq. (25)에 프로빗 분석에 사용되는 프로빗 함수와 백분율의 관계를 나타내었다.

$$P = 50 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (25)$$

Where, P denotes probability, erf denotes error function, and P_r denotes probit function

프로빗 함수(P_r)는 Eq. (26)로 나타낼 수 있다.

$$P_r = c_1 + c_2 \ln S \quad (26)$$

Where, S denotes variable according to the type of blast effect, c_1 and c_2 denote coefficient dependent on variable

3.1 사람에 미치는 영향

폭발이 사람에 미치는 영향은 과압으로 인해 사람의 장기 손상 또는 사망을 유발하는 직접적인 영향이 있다. 한편, 파편 또는 잔해들에 의해 충돌 및 사람의 몸이 전도되거나 잔해들의 붕괴로 인해 부상 또는 사망을 유발하는 간접적인 영향으로 구분된다.

3.1.1 폐 손상

폭발로 인한 급격한 압력 상승으로 주위에 위치한 사람은 폐 내·외부의 압력 차이가 순식간에 발생한다. 그 결과 사람의 흉부는 내부로 압축되며 폐의 손상 및 사망

에 이를 수도 있다. 이러한 폐의 손상으로 사망할 확률을 예측하기 위해 Bowen 등[29]의 Eq. (27)과 같은 프로빗 함수를 제안하였다.

$$P_r = 5.0 - 5.74 \ln S \quad (27)$$

Where, P_r denotes probit function * The unit of equations (27) to (42) are the same.

$$S = \frac{4.2}{P} + \frac{1.3}{i} \quad (28)$$

$$\bar{P} = \frac{P'}{P_a} \text{ and } \bar{i} = \frac{i}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} = \frac{1}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} \left(\frac{1}{2} P' t_p \right) \quad (29)$$

Where, P' denotes total overpressure (Pa), P_a denotes ambient pressure (Pa), i denotes impulse (Pa·s), m denotes mass of the human body, and t_p denotes positive-phase duration (s)

$$P' = P_s + \frac{5P_s^2}{2P_s + 14 \times 10^5} \quad (30)$$

Where, P_s denotes overpressure (Pa)

3.1.2 고막 파열

Hirsch[30]는 고막 파열을 예측하기 위해 Eq. (31)과 같은 프로빗 함수를 제안하였다.

$$P_r = -12.6 + 1.524 \ln P_s \quad (31)$$

Where, P_s denotes overpressure (Pa)

3.1.3 머리 충격

Baker 등[31]은 충격파로 인해 사람이 넘어져 발생하는 머리의 충격으로 사망할 확률을 예측하기 위해 Eq. (32)과 같은 프로빗 함수를 제안하였다.

$$P_r = 5.0 - 8.49 \ln S \quad (32)$$

$$S = \frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4.8 \times 10^8}{P_s i_s} \quad (33)$$

Where, P_s denotes overpressure (Pa), i_s denotes impulse (Pa·s) * The units of equations (33) to (42) are the same.

3.1.4 전신 전위 충격

Baker 등은 충격파로 인해 사람이 넘어져 물체와의 충격으로 사망할 확률을 예측하기 위해 Eq. (34)과 같은 프로빗 함수를 제안하였다.

$$P_r = 5.0 - 2.44 \ln S \quad (34)$$

$$S = \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s i_s} \quad (35)$$

고폭탄의 폭발 시 주위에 위치한 사람에게 미치는 영향을 확률론적으로 분석하기 위해 Eq. (27)~(35)를 이용하여 프로빗 값을 계산하였다. 이때, 폭발과압 및 충격력은 UFC 3-340-02를 통해 예측된 값을 사용하였으며, 프로빗 값 계산을 위한 세부 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Values of parameters for probit analysis

Parameters	Values
Ambient pressure (Pa)	101325
Mass of the human body (kg)	75 (for adult man)
Position of the human body	Shock wave flows around the human body

Fig. 6에 고폭탄이 구형 폭발 조건에서 프로빗 함수를 이용해 폭발이 사람에게 미치는 영향을 나타내었다. 폐 손상으로 인한 사망 확률의 경우 폭원과의 거리가 5 m 이하에서 0 %이며 폐 손상으로 사망하지 않는 것으로 확인되었다. 고막 파열이 발생할 확률의 경우 폭원과의 거리가 3 m 이하일 때 99 % 이상으로 발생할 확률이 매우 높았다. 한편, 폭원과의 거리가 4 m에서 87 %, 5 m에서 66 %로 고막 파열이 발생할 확률은 점차 감소하였다. 머리 충격으로 인한 사망 확률은 폭원과의 거리가 1 m일 때 100 %, 2 m에서 11 %, 3 m 이상에서 0 %로 거리가 증가할수록 사망 확률이 감소하였다. 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률의 경우 폭원과의 거리가 1 m에서 59 %, 2 m 이상일 때 0 %로 사망 확률이 감소하였다. 이러한 결과는 사람이 폭원 즉, 고폭탄의 폭발 지점과 가까울수록 고막 파열, 머리 충격 및 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7에 고폭탄의 반구형 폭발 조건에서 프로빗 함수를 이용해 폭발이 사람에게 미치는 영향에 대해 나타내었다. 폐 손상으로 인한 사망 확률은 폭원과의 거리가 5 m 이하에서 0 %이며 폐 손상으로 사망하지 않는 것으로 확인되었다. 고막 파열이 발생할 확률은 폭원과의 거리가 3 m 이하일 때 100 %, 4 m에서 96 %, 5 m에서 83 %로 점차 확률이 감소하였다. 머리 충격으로 인한 사망 확률의 경우 폭원과의 거리가 2 m 이하에서 100 %, 3 m 이상에서 0 %로 나타났다. 전신 전위 충격으로 인한

사망 확률의 경우 폭원과의 거리가 1 m 이하에서 86 %, 2 m에서 8 %, 3 m 이상에서 0 %로 나타났다. 이는 구형 폭발 조건과 동일하게 사람이 폭원과 가까울수록 고막 파열, 머리 충격 및 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률이 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 구형 폭발에 비해 반구형 폭발 조건에서 고막 파열, 머리 충격 및 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률이 비교적 높게 나타났다. 이러한 결과는 반구형 폭발의 경우 초기 폭발파가 지표면 반사에 의해 증폭되는 특성을 가지기 때문에 사람에게 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 또한, 구형 및 반구형 폭발 조건 모두 폭원과의 거리가 5 m 이하일 때 고막 파열 발생 확률이 매우 높게 관찰되어 사람이 폭원과 가까이 있을 때 고막은 폭발에 매우 취약한 것으로 확인되었다.

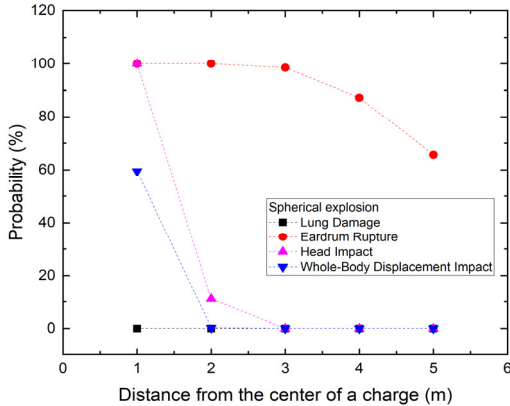


Fig. 6. Probability of damage to human computed by probit function in spherical explosion

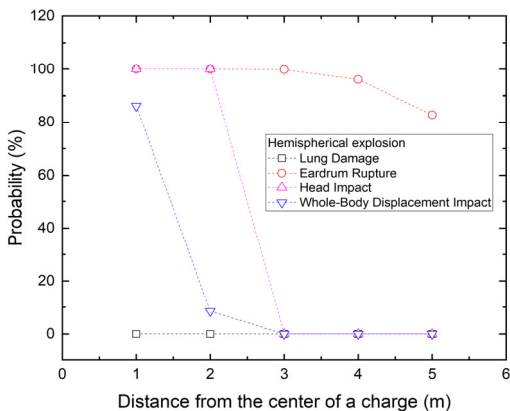


Fig. 7. Probability of damage to human computed by probit function in hemispherical explosion

3.2 구조물에 미치는 영향

구조물에 가해지는 충격파의 영향을 예측하기 위해 TNO[32]가 구조물의 붕괴 확률을 다음과 같이 제안하였다.

3.2.1 구조물 붕괴

$$P_r = 5.0 - 0.22 \ln S \quad (36)$$

$$S = \left(\frac{40,000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i_s} \right)^{11.3} \quad (37)$$

3.2.2 구조물의 심각한 손상

$$P_r = 5.0 - 0.26 \ln S \quad (38)$$

$$S = \left(\frac{17,500}{P_s} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{i_s} \right)^{9.3} \quad (39)$$

3.2.3 구조물의 가벼운 손상

$$P_r = 5.0 - 0.26 \ln S \quad (40)$$

$$S = \left(\frac{4,600}{P_s} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{i_s} \right)^{5.0} \quad (41)$$

3.2.4 유리창 파손

$$P_r = -16.58 + 2.53 \ln P_s \quad (42)$$

고폭탄의 폭발 시 주위에 위치한 구조물에 미치는 영향을 확률론적으로 분석하기 위해 Eq. (36)~(42)를 이용하여 프로빗 값을 계산하였다. 이때, 폭발과압 및 충격량은 UFC 3-340-02를 통해 예측된 값을 사용하였다.

Fig. 8에 고평탄이 구형 폭발 조건에서 프로빗 함수를 이용해 폭발이 구조물에 미치는 영향을 나타내었다. 구조물의 붕괴 확률은 폭원과의 거리가 1 m에서 15 %, 2 m에서 30 %, 3 m에서 8 %로 나타났다. 구조물의 심각한 손상의 확률은 폭원과의 거리가 1 m에서 54 %, 2 m에서 73 %, 3 m에서 41 %로 나타났다. 구조물의 가벼운 손상의 확률은 폭원과의 거리가 1 m에서 91 %, 2 m에서 94 %, 3 m에서 87 %로 나타났으며, 폭원과의 거리가 5 m 이하 구간에서 구조물의 심각한 손상 확률보다 가벼운 손상 확률이 높은 것으로 확인되었다. 유리창의 파손 확률의 경우 폭원과의 거리가 5 m 이하 구간에서 모두 100 %로 나타나 유리창은 폭발에 매우 취약한 것으로 확인되었다.

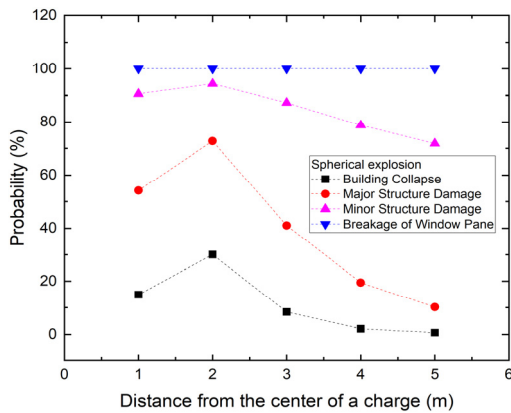


Fig. 8. Probability of damage to structure computed by probit function in spherical explosion

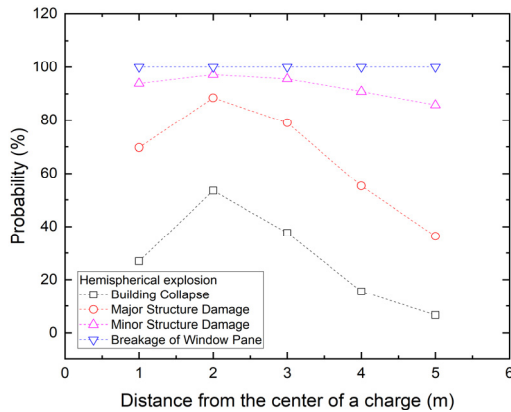


Fig. 9. Probability of damage to structure computed by probit function in hemispherical explosion

Fig. 9에 고평탄이 반구형 폭발 조건에서 프로비트 함수를 이용해 폭발이 구조물에 미치는 영향을 나타내었다. 구조물의 붕괴 확률은 폭원과의 거리가 1 m에서 27 %, 2 m에서 53 %, 3 m에서 38 %로 나타났다. 구조물의 심각한 손상의 확률은 폭원과의 거리가 1 m에서 70 %, 2 m에서 88 %, 3 m에서 79 %로 나타났다. 구조물의 가벼운 손상의 확률은 폭원과의 거리가 1 m에서 94 %, 2 m에서 97 %, 3 m에서 95 %로 나타났으며, 폭원과의 거리가 5 m 이하 구간에서 구조물의 심각한 손상 확률보다 가벼운 손상 확률이 높은 것으로 확인되었다. 유리창의 파손 확률의 경우 폭원과의 거리가 5 m 이하 구간에서 모두 100 %로 나타났다. 구형 폭발 조건보다 반구형 폭발 조건에서의 구조물의 손상 확률(예를 들면, 구조물의 붕괴, 심각한 및 가벼운 손상 확률)이 비교적 더 높게 나타났으며, 이는 반구형 폭발이 반사파의 증첩으로

더 큰 폭발파를 발생시키기 때문이다. 폭원과의 거리가 1 m에서 구조물의 붕괴, 심각한 및 가벼운 손상 확률은 폭원과의 거리가 2 m에서의 손상 확률보다 낮게 나타났다. 한편, 폭원과의 거리가 2 m 이상일 때 폭원과의 거리가 증가할수록 구조물의 붕괴, 심각한 및 가벼운 손상 확률이 감소하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 고평탄의 폭발이 사람에게 미치는 영향과 다른 경향으로 확인되었다. 폭발이 사람에게 미치는 영향(예를 들면, 고막 파열, 머리 충격 및 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률)은 폭원과의 거리가 증가할수록 사람의 부상 확률이 감소하는 것으로 확인되었다. 하지만, 고평탄의 폭발이 구조물에 미치는 영향의 경우 폭원과의 거리가 2 m에서 구조물의 손상 확률이 가장 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 고평탄의 폭발이 사람에게 미치는 영향은 폭발 과압의 지대한 영향을 미치지지만, 폭발이 구조물에 미치는 영향은 폭발과압 보다 충격량이 더 중요한 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 155 mm 고평탄의 조기 폭발 시 주위에 위치한 사람 및 구조물에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 사람 및 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해 폭발과압 및 충격량을 기준 연구에서 제시된 상관식을 통해 예측하였다. 또한, 예측된 폭발과압 및 충격량을 이용하여 사람 및 구조물에 미치는 영향을 프로비트 함수를 통해 확률론적으로 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 아래에 정리하였다.

첫째, 구형 및 반구형 폭발 조건에서 폭원과의 거리가 증가할수록 폭발과압은 감소하며, 폭원과의 거리가 짧을수록 기준 상관식 간 예측된 폭발과압의 차이가 크게 나타나는 경향이 관찰되었다.

둘째, 충격량의 경우, 구형 및 반구형 폭발 조건에서 폭원과의 거리가 2 m 이상일 때 폭원과의 거리가 증가할수록 기준 상관식을 통해 예측된 충격량은 감소하였으며, 폭원과의 거리가 짧을수록 기준 상관식 간 예측된 충격량의 차이가 크게 나타났다.

셋째, 폭발로 인한 사람의 부상 확률은 구형 및 반구형 폭발 조건 모두 폐 손상으로 인해 사망하지 않는 것으로 관찰되었다. 또한, 고막 파열이 발생할 확률, 머리 충격 및 전신 전위 충격으로 인한 사망 확률은 폭원과 가까

올수록 높아지는 경향이 나타났다.

넷째, 폭발로 인한 구조물의 손상 확률은 구형 및 반구형 폭발 조건 모두 유리창이 파손하는 것으로 나타났다. 또한, 구조물의 붕괴, 심각한 및 가벼운 손상의 확률은 폭원과의 거리가 2 m일 때 가장 높게 관찰되었다.

본 연구는 고폭탄의 사격시험 시 초기 폭발에 대한 폭발 특성 및 위험성을 파악하는데 기초자료로 활용될 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 고폭탄 폭발 현장의 제한적인 환경 조건에 대해 위험성이 검토되었다. 따라서 고폭탄의 폭발과 주위에 위치한 사람 및 구조물 간 상관관계에 대해 명확하고 체계적인 검토를 위해서는 향후 다양한 환경 조건에서 고폭탄의 폭발 특성 분석 및 파편이 미치는 영향 등에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] U. S. Department of Defense, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion, U. S. DoD, Washington DC, USA, UFC 3-340-02, 2008.
- [2] C. N. Kingery, G. Bulmash, Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst, Technical Report, Ballistic Research Laboratory, USA, 1984.
- [3] A. Ullah, F. Ahmad, H. W. Jang, S. W. Kim, J. W. Hong, "Review of analytical and empirical estimations for incident blast pressure", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.21, pp.2211-2225, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-016-1386-4>
- [4] M. J. Assael, K. E. Kakosimos, Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions, p.329, CRC Press, 2010, pp.179-187.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9781439826768>
- [5] J. S. Lee, KOSHA GUIDE P-88-2012 Technical Guidelines for Accident Damage Impact Assessment, Technical Report, Korea Occupational Safety and Health Corporation, Korea, pp.1-7.
- [6] Y. K. Yoon, "Effects of explosion on structure", Explosive & Blasting, Vol.37, No.4, pp.10-16, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.22704/ksee.2019.37.4.010>
- [7] Y. K. Yoon, E. H. Ju, "Probabilistic assesment of the effects of vapor cloud explosion on a human body", Tunnel & Underground Space, Vol.31, No.1, pp.52-65, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7474/TUS.2021.31.1.052>
- [8] H. Draganic, V. Sigmund, "Blast loading on structure", Tech Gazette, Vol.19, No.3, pp.643-652, 2012.
- [9] J. Hetherington, P. Smith, Blast and Ballistic Loading of Structures, p.336, CRC Press, 1994.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482269277>
- [10] M. A. Sadovskiy, Mechanical Effects of Air Shock Waves from Explosions according to Experiments, In M. A. Sadovskiy Selected works: Geophysics and physics of explosion, Nauka Press, 2004.
- [11] H. L. Brode, "Numerical solutions of spherical blast waves", J. Appl. phys., Vol.26, No.6, pp.766-775, 1955.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1722085>
- [12] J. Henrych, R. Major, The Dynamics of Explosion and Its Use, p.558, Elsevier, 1979.
- [13] V. V. Adushkin, A. I. Korotkov, "Parameters of a shock wave near to HE charge at explosion in air", PMTF, Vol.5, pp.119-123, 1961.
- [14] M. Held, "Blast waves in free air", Propellant, Explos., Pyrotech., Vol.8, No.1, pp.1-7, 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1002/prop.19830080102>
- [15] G. F. Kinney, K. J. Graham, Explosive Shocks in Air, p.269, Springer-Verlag, 1985.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-86682-1>
- [16] C. A. Mills, "The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects", Proceedings of the 1st Int. Conference on Concrete for Hazard Protection, Edinburgh, pp.61-73, 1987.
- [17] M. A. Hopkins-Brown, A. Bailey, Chapter 2 (Explosion Effects) Part 1., AASTP-4 Royal Military College of Science, Cranfield University, 1998.
- [18] B. Gelfand, M. Silnikov, Translation from Russian to English the Book "Blast Effects Caused by Explosions", Technical Report, European Research Office of the U. S. Army, England, 2004.
- [19] Z. Bajic, Determination of TNT Equivalent for Various Explosives, Master's thesis, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, 2007.
- [20] N. M. Newmark, R. J. Hansen, Design of Blast Resistant Structures, Shock and vibration handbook, Harris, and Crede, eds., McGraw-Hill, 1961.
- [21] M. M. Swisdak, Simplified Kingery Airburst Calculations, Proceedings of the Twenty-Sixth DoD Explosives Safety Seminar, Naval Surface Warfare Center, USA, 1994.
- [22] J. I. Siddiqui, S. Ahmad, "Impulsive loading on a concrete structure", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Vol.160, No.4, pp.231-241, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1680/stbu.2007.160.4.231>
- [23] C. Wu, H. Hao, "Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions", International Journal of Impact Engineering, Vol.31, No.6, pp.699-717, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.03.002>
- [24] J. Iqbal, S. Ahmad, "Improving safety provisions of

structural design of containment against external explosion”, Proceedings of an International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21. Century, IAEA, Taxila, Pakistan, June 2011.

- [25] S. Ahmad, A. Elahi, J. Iqbal, M. A. Keyani, A. G. A. Rahman, “Impulsive loading on reinforced concrete wall”, Proceedings of the Institution on Civil Engineers – Structures and Building, Vol.166, No.3, pp.153-162, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1680/stbu.11.00008>
- [26] B. Hopkinson, British Ordnance Board Minutes, Report 13565, British Ordnance Office, USA, 1944.
- [27] C. Cranz, Lehrbuch Der Ballistik, p.454, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1926.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52612-1>
- [28] I. C. Lee, H. S. Kim, J. S. Nam, S. B. Kim, W. H. Hong, G. Y. Kim, “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 KIMST, Vol.16, No.4, pp.493-500, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2013.16.4.493>
- [29] I. G. Bowen, E. R. Fletcher, D. R. Richmond, Estimate of Man’s Tolerance to the Direct Effects of Air Blast, Technical Report DASA-2113, Defense Atomic Support Agency, USA, 1968.
- [30] F. G. Hirsch, “Effects of overpressure on the ear – A review”, Ann. N Y Acad Sci, Vol.152, No.1, pp.147-162, 1968.
DOI: <https://doi.org/10.1111/i.1749-6632.1968.tb11972.x>
- [31] W. E. Baker, P. A. Cox, J. J. Kulesz, R. A. Strehlow, P. S. Wetine, Explosion Hazards and Evaluation, p.840, Elsevier, 2012.
- [32] The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials, p.337, Committee for the Prevention of Disasters, 1992.

전 인 범(In-Beom Jeon)

[정회원]



- 2014년 2월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 (공학학사)
- 2018년 7월 ~ 2019년 12월 : KCC대죽공장 안전환경팀
- 2019년 2월 : 인하대학교 대학원 환경안전융합전공
- 2020년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

산업안전, 소방, 화약류, 화재·폭발 방호

황 경 섭(Gyeong-Seop Hwang)

[정회원]



- 2019년 2월 : 부경대학교 소방공학 (공학학사)
- 2020년 8월 : 부경대학교 일반대학원 건축·소방공학부 (공학석사)
- 2021년 7월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

소방공학, 과도 비등 열전달, 시험평가