

바닥 면이 정사각형인 격실 내 100% 인명피해를 위한 최소 화약량 산정

한민성[†]

Calculation of the Minimum Charge Weight Required for 100% Personnel Target Lethality inside a Room with a Square Base

Minsung Han[†]

ABSTRACT

The probability of lethality of personnel targets inside a room is a key issue at assessing effectiveness of a weapon system. In this study, the minimum charge weight to achieve 100% lethality of personnel targets inside a box-type room is proposed at each side length of a base of a room. A fast running blast wave model is used to simulate the pressure-time histories of the blast generated by an internal explosion inside a room, and Axelsson SP method is used to evaluate the lethality of personnel targets under the blast. 176 different internal explosion scenarios are simulated for cases of TNT weights ranging from 20kg to 170kg inside a room whose square base has a side length ranging from 5m to 15m. A linear model and a charge-density model were developed to predict the minimum charge weight to achieve 100% lethality inside a room given a length of a base of a room.

Key words : Weaponering, Internal Explosion, Blast, Blast Injury

요약

격실 내 인명 살상확률을 계산하는 문제는 무기체계의 효과분석에 있어서 중요한 문제이다. 본 연구에서는 바닥 면이 정사각형인 직육면체 형태의 격실에서 격실 크기에 따른 인명 살상확률 100%를 만족하는 최소 화약량을 산출하는 식을 개발한다. 내부 폭발로 인해 생성된 폭풍파의 압력 이력은 고속 계산 폭압 모델로 계산하였고, 폭풍파에 노출된 인명의 살상확률은 Axelsson SP 방법론을 적용하여 계산하였다. 한 변의 길이가 5m에서 15m인 정사각형을 바닥 면으로 하는 격실 안에서 무게 20kg에서 170kg의 TNT가 폭발하는 총 176 가지의 시나리오들에 대해 시물레이션이 수행되었다. 선형 모델 및 화약 밀도기반 모델을 개발하여 표적 격실의 바닥 면의 한 변의 길이에 따른 인명피해 100%를 만족하는 최소 화약량을 예측하였다.

주요어 : 무기추천, 내부 폭발, 폭풍파, 인명피해

1. 서론

내부에서 폭발로 인한 격실 내 인명 살상확률을 계산하는 문제는 무기효과 분석 분야에서 중요한 문제이다. 예를 들어, 침투탄두를 이용하여 지하 벙커 내의 인명을 살상하는 임무가 있을 수 있다. 이러한 임무의 계획단계에서 무기를 선정할 때에는 폭발물이 의도된 위치 내에

서 폭발 할 경우 인명 살상확률이 100%가 만족되는 화약량을 탑재한 무기가 추천된다. 따라서 표적 격실의 대략적인 정보가 주어졌을 때, 해당 격실 내 인명이 모두 살상되는 최소 화약량을 산출할 수 있는 모델이 필요하다.

격실 내에서 폭발물이 폭발하여 인명을 살상하는 과정의 시물레이션은 폭발물의 의한 폭압전파 해석 및 폭압에 의한 인명피해 해석 등을 요구하기 때문에, 모사정도에 따라 굉장히 긴 시물레이션 시간이 요구될 수도 있다 (Park, 2017). 뿐만 아니라, 표적이 되는 격실의 기하학적 구조, 탄두가 폭발하는 위치, 탄두의 화약량 등 시물레이션을 정의하는데 필요한 변수들도 다양하다. 이러한 제약 조건들 때문에 기존의 격실 내에서 폭발물을 이용하여

Received: 1 February 2019, **Revised:** 29 March 2019,
Accepted: 29 March 2019

† Corresponding Author: Minsung Han
E-mail: minsung.han@gmail.com
Agency for Defense Development

인명을 살상하는 임무의 시뮬레이션은 특정한 상황을 가정한 상황에서만 수행되었다. 따라서 격실에서 폭발물을 이용하여 인명을 살상하는 일반적인 상황에서 인명 살상 확률에 영향을 미치는 중요 변수의 분석은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 격실을 정사각형의 바닥 면을 가진 일정한 높이의 직육면체로 가정한다. 그리고 다양한 크기의 격실 내에서 폭발물의 양이 변화함에 따라 인명 살상 확률은 어떻게 변화하는지 다수의 시뮬레이션을 통하여 알아본다. 그리고 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 격실의 크기가 결정되었을 때, 인명 살상 확률 100%를 만족시키는 최소화약량을 예측하는 모델을 제안한다.

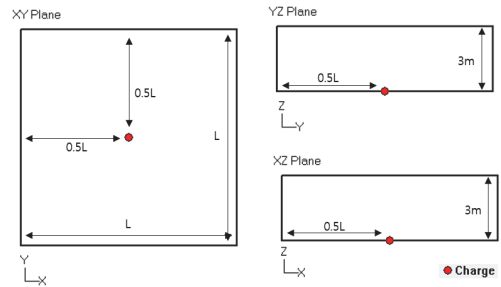
논문은 다음과 같이 구성되어있다. 2장에서는 전체 시뮬레이션 수행 방법을 소개하고 시뮬레이션의 각 세부 단계에 사용된 해석 방법론들을 설명한다. 3장에서는 시뮬레이션 결과를 보여주고, 그 결과를 통해 획득된 화약량 예측 모델들을 소개한다. 결론에서는 본 연구를 요약한다.

2. 시뮬레이션 방법

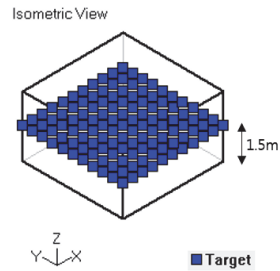
2.1 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 다음과 같은 가정들을 설정한다. 첫째, 공격 목표가 되는 격실은 정사각형의 바닥 면을 가진 높이 3m의 직육면체이다. 둘째, 폭발물은 격실의 바닥 면에서 폭발하며, 이 폭발지점은 정사각형 형태의 바닥 면의 중앙지점에 위치한다. 셋째, 격실 내 인원은 격실 상에 균등하게 분포하며 인명피해의 기준이 되는 위치는 인원의 폐가 위치한 높이 1.5m 지점이다. 이러한 가정들은 Figure 1a 및 1b에 도식화되어있다.

Figure 2는 전체 시뮬레이션의 흐름도이다. 먼저 정사각형 격실의 한 변의 길이를 결정하여 격실을 정의한다. 그다음 해당 격실 내에서 폭발물의 화약량을 바꾸어가며 인명피해를 시뮬레이션하고 인명 살상 확률을 기록한다. 위 과정을 격실을 바꾸어가며 반복한다. 최종적으로 인명 살상 확률을 폭발물이 폭발하는 격실 바닥 면의 한 변의 길이와 폭발물의 화약량의 함수로 표현한다. Table. 1은 시뮬레이션의 변수들을 요약한 표이다. 본 연구에서는 11가지의 격실과 16가지의 화약량에 대해 총 176번의 시뮬레이션을 수행하였다.



a) Coordinate of an Explosive



b) Target Locations

Fig. 1. Simulation setting

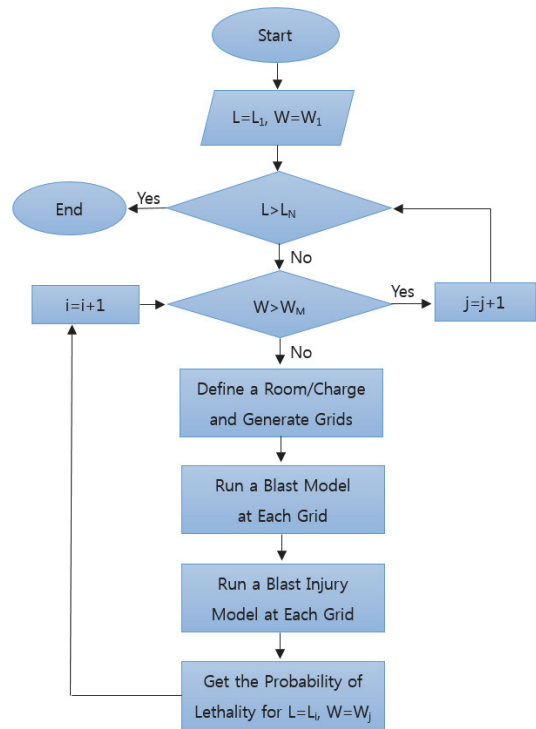


Fig. 2. Simulation flow chart

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Variation
Room Type	Square (W/L=1)
Room Side Length	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15m
Room Height	3m
Explosion Height	0m
Coordinate on the Base Plane of the Explosion	Center of the Room (L/2,L/2)
Charge Type	TNT
Charge Weight	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170kg

2.2 폭압(Blast Pressure) 모델

무기효과 분석분야에서 사용되는 폭압 모델들은 크게 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics)모델과 고속 계산 모델(Fast Running Model)로 나눌 수 있다 (Driels, 2012). LS-Dyna 등에서 사용되는 전산 유체 역학 모델은 실제와 가까운 폭압을 모사하지만, 시뮬레이션 시간이 길다는 단점이 있어, 176번의 시뮬레이션을 수행하는 본 연구에 사용할 폭압 모델로서는 적합하지 않다. 고속계산모델로는 CONWEP, BlastX 등이 있는데, 이러한 모델들은 계산유체역학 모델들보다는 덜 정확하지만 매우 빠른 계산 시간을 가지고 있어 본 연구에 적합하다.

CONWEP의 경우 Figure 3과 같은 개활지에서 생성된 이상적 폭압을 가정하여, 최대 폭압 및 폭압 지속 시간 등을 Kingery- Bulmash 차트를 바탕으로 폭풍파의 폭압의 시간 이력을 결정한다(TM-5-855-1, 1986). 따라서 CONWEP은 본 연구에서 수행하는 격실 내에서 생성된 비이상적 폭풍파의 폭압을 시뮬레이션하기 적합하지 않다. BlastX는 U.S. Army Engineering Research and Development Center(ERDC)에서 개발된 코드로서 격실 내부에서의 폭발로 인해 생성된 폭풍파의 폭압 이력을 계산하기 위한 목적으로 개발되었다(Driels, 2012). BlastX는 전산 유체 역학 모델로 생산한 폭압 데이터베이스를 이용하여, 주어진 상황의 폭풍파의 압력 이력을 데이터베이스에 저장된 폭압 이력들의 내삽을 통해 계산한다. BlastX는 다양한 내부 폭발 시나리오에서 실제 실험데이터와 비교, 검증되었으며 본 연구의 시뮬레이션과 같이 직육면체 격실 내 폭발로 인해 생성된 폭풍파의 압력 이력은 실제 실험데이터와 유사하다(Britt, 2008)

Figure 4는 BlastX에서 시뮬레이션 한 내부 폭발로 인해 생성된 폭풍파의 폭압 이력의 예시이다.

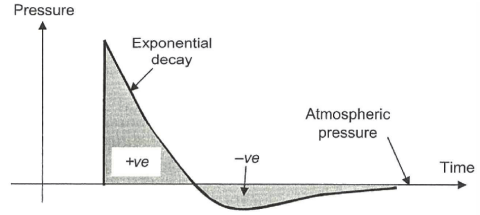


Fig. 3. Pressure-time history of an ideal blast

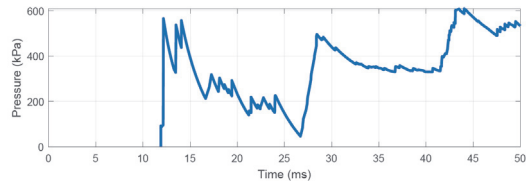


Fig. 4. Pressure-time history generated from BlastX

2.3 폭풍파에 의한 인명피해 모델

폭풍파는 다양한 형태로 인명피해를 입힌다. Table 2는 폭풍파가 인명피해를 입히는 메커니즘과 해당 메커니즘으로 인한 인명피해 종류에 대한 요약이다. 본 연구에서는 문제를 단순화하기 위하여 과압(overpressure)으로 인한 인명피해만을 고려한다. 과압으로 인한 인명피해의 종류에는 안구 손상, 폐 손상, 내장 손상, 고막 손상 등이 있지만 폐 손상이 인명피해와 직접적인 관련성이 있다. 폭풍파의 과압에 따른 인명피해 확률은 Bowen, Bass, Axelsson, Johnson 등의 연구가 있다(Teland 2012). Bowen은 13가지 종류의 동물들에 대해 2097회의 실험을 통해 폭압에 노출된 동물들의 24시간 내 생존확률을

Table 2. Types of blast injury

Category	Damaging Mechanism	Types of Injuries
Primary	Overpressure	1. Blast Lung 2. TM rupture 3. Abdominal hemorrhage 4. Eye Rupture
Secondary	Flying Debris	1. Penetrating Ballistic 2. Eye penetration
Tertiary	Impulse from Being Thrown by the Blast	1. Fracture 2. Brain Injury
Quaternary	All Others	1. Burns 2. Asthma 3. Angina 4. Hyperglycemia

조사하였다(Bown, 1965). 하지만 Bowen 및 Bass가 제안한 과압에 의한 인명 살상기준들은 Figure 3과 같이 과압 및 양압 지속시간(positive time)이 잘 정의되는 이상적 폭발 이력을 가진 폭발파에 노출된 인명의 인명피해만을 효과적으로 계산한다(Teland 2012). 따라서 본 연구에서 Bowen 및 Bass의 인명 피해기준을 사용할 수 없다.

본 연구에서는 Axelsson 폐 모형과 ASII 인명 살상기준을 사용하기로 한다. Axelsson 폐 모형은 과압이 폐부를 압박할 때 움직임이 강제된 폐가 단자유도모델(Single Degree of Freedom)과 같이 움직인다고 가정한다. 폭발 $(p(t))$ 에 영향을 받는 흉벽의 변위(x)는 다음 Equation (1)을 만족한다(Axelsson, 1996).

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = A \left[p(t) + P_0 - \left(\frac{V}{V - Ax} \right)^\gamma P_0 \right] \quad (1)$$

Table 3은 식 (1)에 포함된 변수들을 정리한 표이다. Teland (2012)는 Axelsson 모델을 Axelsson BTD(Blast Test Device)모델과 Axelsson SP(Single Point)로 구분한다. Axelsson BTD는 흉부를 원통형이라고 가정하고 90도 간격으로 4지점의 폭발 이력을 해석하여 각기 다른 4지점의 흉벽 이동 속도 중 최대 이동속도를 구한다. 반면 Axelsson SP의 경우 흉부 전면에 도달하는 폭발파만을 고려하여 흉벽 이동속도를 구한다. Figure 5는 Figure 4로 주어지는 폭발에 노출된 흉벽의 움직임을 Axelsson SP 모델로 해석한 결과이다.

Table 3. Parameters used in Axelsson model for a 70kg human

Parameters	Symbol	Value
Effective Area of a Chest Wall	A	0.082m ²
Effective Mass of the Thorax	M	2.03kg
Initial Gaseous Volume of the Lungs	V	0.00182m ³
Damper Coefficient	C	696ns/m
Spring Constant	K	989N/m
Polytropic Exponent for Gas in Lungs	γ	1.2
Ambient Pressure	P_0	101325N/m ²

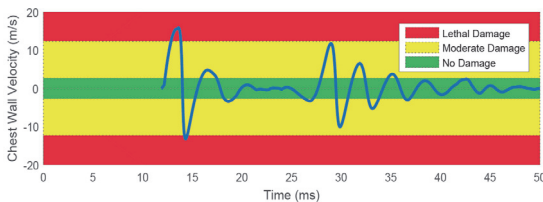


Fig. 5. A chest wall velocity profile under a blast

2.4 ASII 인명피해 기준

Axelsson (1996)은 흉벽 이동속도와 ASII(Adjusted Severity of Injury Index)간의 양의 상관관계를 바탕으로, 흉벽 이동속도를 통해 인명 피해확률을 계산하는 수식을 제안하였다. Teland (2012)는 이 연구 데이터를 이용하여 Axelsson SP로 해석된 흉벽 이동속도를 이용해 ASII를 예측하는 수식을 Equation (2)와 같이 제안하였다.

$$ASII_{SP} = 0.175 V^{1.205} \quad (2)$$

Equation (2)를 적용하여, 인명 피해기준과 ASII 및 흉벽 이동속도간의 상관관계를 Table 4에 요약하였다. 본 연구에서는 ASII 3.6을 기준으로 ASII가 3.6 보다 더 높은 값에 노출된 인명은 살상된 것으로 간주한다.

Table 4. Injury level, ASII, and chest wall velocity

Injury Level	ASII	Chest Wall Velocity (m/s)
Negative/none	0.0-0.2	0.0-1.1
Trace to slight	0.2-1.0	1.1-4.2
Slight to moderate	0.3-1.9	1.6-7.2
Moderate to extensive	1.0-7.1	4.2-21
50% lethality	>3.6	>12

2.5 격실 내 인명 살상확률 계산

격실 내 인명 살상확률을 계산하기 위해서는 Figure 1a와 같이 폭발물을 배치하고, Figure 1b와 같이 격실의 바닥 면을 0.5m 간격으로 나누어 높이 1.5m 지점에 폭발 이력을 예측할 점들을 지정한다. BlastX는 해당 예측 점에서 폭발 이력을 계산하고, 이 폭발 이력은 Equation (1)을 푸는 MATLAB 코드에 전달된다. MATLAB의 ODE

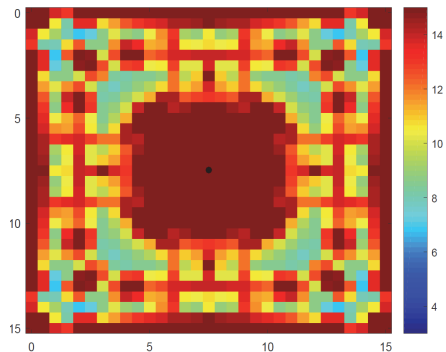


Fig. 6. Chest wall velocities

Solver는 Equation (1)을 풀어 시간에 따른 흥벽의 변위와 이동속도의 이력을 계산한다. Figure 6은 TNT 60kg가 한 변의 길이가 15m인 정사각형의 바닥 면을 가진 높이 3m 격실에서 폭발했을 때, 격실 내부 인명의 최대 흥벽 이동속도의 분포도이다. Figure 7은 ASII가 3.6을 초과하는 지점들을 살상지점으로 표시한 그림이다. 전체 계측점수 대비 살상지점 수의 비율을 격실 내 인명 살상확률로 정의한다.

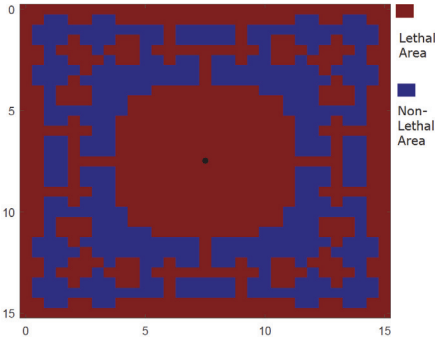


Fig. 7. Lethal areas (TNT=60kg, 15m by 15m, P=59%)

3. 시뮬레이션 결과

3.1 격실의 크기와 화약량에 따른 인명 살상확률

격실 바닥 면의 한 변의 길이가 5m부터 1m간격으로 15m까지 변하고, 한 격실 내에서 폭발하는 화약량이 20kg부터 170kg까지 변할 때, 176회의 시뮬레이션 결과 격실 내 인명 살상확률은 Figure 8과 같았다. 더 큰 방의 인명을 모두 살상하기 위해서는 더 많은 화약량이 요구

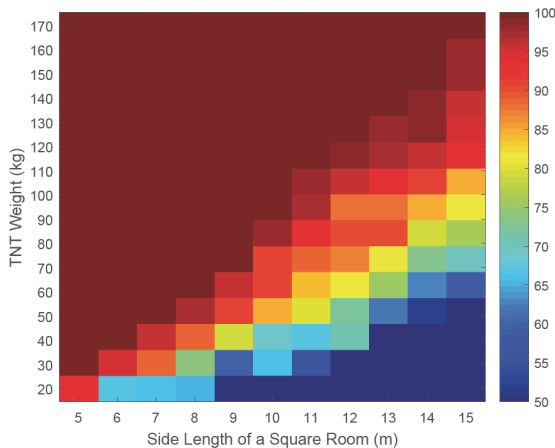


Fig. 8. Probabilities of personal target lethality

되었으며, 같은 양의 화약량은 더 작은 방에서 폭발하였을 때 더 높은 인명 살상확률을 보여주었다.

격실 내 인명 살상확률을 격실 바닥 면의 길이와 화약량의 함수로 정의 할 때, 다음과 같이 정의되는 집합 (3)을 고려하자. 이 집합은 격실 내 인명을 100% 살상하는 최소의 화약량들의 집합이다.

$$\{(L_i, W_j) | P(L_i, W_j) = 1, \text{ and } W_j \leq W_k \text{ for } \forall i, j, k\} \quad (3)$$

위 집합의 원소들을 좌표에 표시하면 Figure 9와 같다. 이 좌표점 간의 상관관계를 선형으로 가정하여 최소자승법(Least Square Method)을 이용하면 Equation (4)를 얻는다.

$$W_{100\%,LS} = 13.63X - 44.55 \quad (4)$$

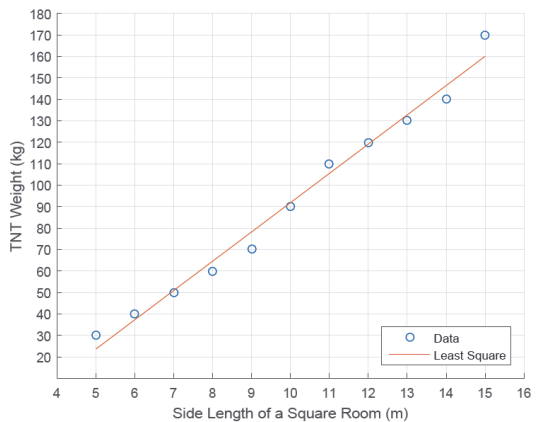


Fig. 9. Minimum required charge weights required for 100% lethality for a room with a square base

3.2 화약밀도(Charge Density)적 관점

Hopkinson-Cranz법칙에 의하면, 이격환산거리(Scaled Distance)가 같다면 같은 압력 이력의 폭발파가 도달한다 (Baker 1973). 이격환산거리는 폭발파 발생지점과 폭발파 도달지점 사이의 거리를 화약량의 1/3 제곱으로 나눈 거리로서, 폭발파가 공간상에 균등하게 전파된다고 가정할 때, 폭발파 전파 공간을 폭발물의 무게로 나눈 화약밀도적 개념이다. 따라서 격실 내 화약밀도가 격실 내 인명을 100% 살상하는 최소 화약량을 결정하는 변수일 수 있다. 표적 격실의 바닥 면의 한 변의 길이 당, 해당 격실 내 인명을 100% 살상하는 화약밀도를 좌표에 표기하면 Figure 10과 같다.

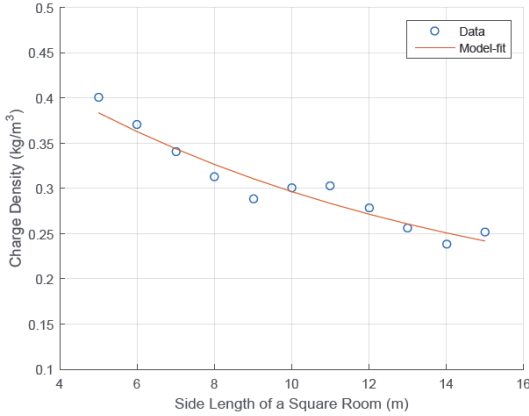


Fig. 10. Minimum charge density required for 100% lethality for a room with a square base

이때, 최소 화약밀도와 표적 격실의 바닥 면 길이와는 음의 상관관계가 예측되는데, 화약밀도는 0보다 항상 커야 하므로, 다음과 같은 지수함수모형을 설정한다.

$$D_{100\%} = ae^{bX} + c \quad (5)$$

공학적인 판단으로 c 는 0.15로 설정하였다. 양변에 로그를 취해 최소자승법으로 Equation (6)을 얻는다.

$$D_{100\%} = 0.372e^{-0.0934X} + 0.15 \quad (5)$$

화약밀도를 Equation (5)에 대입하면,

$$\frac{W_{100\%}}{3X^2} = 0.372e^{-0.0934X} + 0.15 \quad (6)$$

최소 화약량을 예측하는 Equation (7)을 얻는다.

$$W_{100\%,Density} = 1.12X^2e^{-0.0934X} + 0.45X^2 \quad (7)$$

3.3 선형모델과 화약밀도 기반 모델의 비교

Equation (4)로 제시된 선형모델과 Equation (7)로 제시된 화약밀도 기반 모델의 집합 (3)내 데이터 점들에 대한 RMS(Root Mean Square) 오차는 Table 5에 정리되었다. 화약밀도기반 모델이 선형모델보다 RMS 오차가 더 작음을 알 수 있다.

선형모델과 화약밀도기반 모델이 외삽에도 유용한지 알아보기 위하여, 격실 바닥 면의 길이가 30m까지 증가

Table 5. RMS errors for the two models

	Linear Square	Density Model
RMS Error	5.30	4.33

할 때, 인명 살상확률 100%를 만족하는 최소 화약량의 예측 값들을 모델별로 계산하여 Figure 11에 그림으로 나타내었다. 두 모델의 예측 값들의 차이는 15m 이후 점차 증가한다. 이 예측 값들이 실제로 격실 내 인명피해 확률 100%를 달성하는지 알아보기 위하여, 바닥 면의 한 변의 길이가 26m, 28m, 30m의 세 격실에서 두 모델이 제시한 최소 화약량 만큼의 폭발물의 배치하여 인명피해를 시뮬레이션한 결과는 Table 6과 같다.

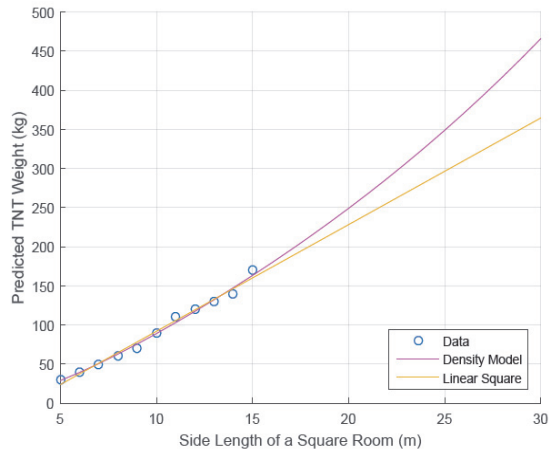


Fig. 11. Predictions of the two models on the minimum charge weights required for 100% lethality

Table 6. Comparisons on predictions of the two models

		Linear Square	Density Model
26m	Predicted Charge Weight	310kg	371kg
	Personnel Target Lethality	0.93	0.98
28m	Predicted Charge Weight	337kg	417kg
	Personnel Target Lethality	0.96	0.99
30m	Predicted Charge Weight	365kg	466kg
	Personnel Target Lethality	0.93	0.96

선형모델과 화약밀도기반 모델 모두 외삽에 이용될 때에는 인명 살상 100%를 만족하는 최소화약량을 정확히 예측 하지는 못 하였으나, 화약밀도기반 모델의 경우 모델이 예측한 화약량이 폭발했을 때 격실 내 인명피해 확

률은 100%에 근접하였다.

4. 결론

격실 내 인명을 살상하기 위한 임무의 무기추천을 위한 최소 화약량 예측 모델을 개발하였다. 격실의 바닥 면을 정사각형으로 높이를 3m로 가정하고, 다양한 바닥 면 길이 및 다양한 화약 무게에 대해 격실 내 인명피해 확률을 계산하는 다수의 시뮬레이션을 수행하였다. BlastX를 폭압 모델로 사용하여 격실 내 폭압 이력을 예측하고, Axelsson SP방법을 통해 계산된 최대 흥벽 이동속도를 이용하여 격실 내 인명의 살상여부를 결정하였다.

주어진 공간에서 인명 살상 100%를 만족시키는 최소 화약량들을 조사하여 다음 두 모델을 제시하였다. 한 모델은 표적 격실의 바닥 면의 길이와 인명 살상 100%를 만족시키는 최소 화약량 사이의 상관관계를 선형함수로 예측한 모델이다. 다른 모델은 격실 내 인명 살상을 100%를 만족하는 화약량의 화약밀도와 표적 격실의 바닥 면의 길이를 지수함수 관계로 가정하고, 이 관계를 바탕으로 최소 화약량을 추정하는 모델이다. 내삽 및 외삽의 영역에서 화약밀도적 관점에서 제시된 모델이 더 나은 예측결과를 보였다.

본 논문에서 제시한 모델들은 격실 내 인명을 살상하기 위한 임무를 가정한 전장 임무상황에서, 무기에 탑재될 화약량을 대략적으로 선정하는데 큰 도움을 줄 것으로 기대한다. 또한 해당 임무를 위한 고충실도 시뮬레이션을 설계한 데 있어서 유용한 참고자료가 될 것이다.

References

Axelsson H., Yelverton J.T. (1996), "Chest Wall Velocity Predictor of Nonauditory Blast Injury in a

Complex Wave Environment", *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, Vol. 40, No. 3, pp. 31-37.

Baker, W. E. (1973). *Explosions in Air*, University of Texas Press, Austin

Bowen I. G., et al. (1965) "Estimate of Man's Tolerance to the Direct Effects of Air Blasts" Technical Progress Report, DASA-2113. Defense Atomic Agency, Department of Defense, Washington, D.C.

Britt J., McMahon G. (2008) "Tabular Explosive Source Models used in BlastX" *Proceeding of the 20th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock*.

"Explosions and Blast Injuries" Department of Health and Human Service. CDC.

Driels M.S. (2012) *Weaponizing: Conventional Weapon System Effectiveness*, U.S. Naval Postgraduate School, Monterey, California.

Kingery C. N., Bulmash, G. (1984) "Airblast Parameters from TNT Spherical Airburst and Hemispherical Surface Burst," Ballistics Research Lab., ARBRL-TR-02555, Aberdeen Proving Ground, MD.

Park S. (2017) "The Effect of Obstacles in a Compartment on Personnel Injury Caused by Blast", *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 26, No. 3.

(박성준, (2017) "격실 내 장애물이 폭압에 의한 인명 피해에 미치는 영향", 한국시뮬레이션학회 논문지, Vol. 25, No. 3)

Teland, J.A. (2012) "Review of Blast Injury Prediction Models" FFI/Rapport-2012/00539

TM-5-855-1. (1986) *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*, Washington, D.C.



한민성 (minsung.han@gmail.com)

2012 University of California, Berkeley, Applied Mathematics, B.A.

2014 Columbia University, Applied Mathematics, M.S.

2014~ 현재 국방과학연구소 연구원

관심분야 : 폭풍파, 시뮬레이션, 국방 M&S