

지상전투차량 취약성 평가를 위한 표적 모델링과 피격선 분석 시스템

유철 · 장은수 · 박강[†] · 최상영

명지대학교 기계공학과

The Target Modeling and The Shot Line Analysis System to Assess Vulnerability of the Ground Combat Vehicle

Chul Yoo, Eun Su Jang, Kang Park[†], and Sang Yeong Choi

School of Mechanical Engineering, Myongji Univ.

Received 17 September 2014; received in revised form 20 July 2015; accepted 28 July 2015

ABSTRACT

Vulnerability assessment is a process to calculate the damage degree of a combat vehicle when the combat vehicle is attacked by an enemy. When the vehicle is hit, it is necessary to analyze the shot line to calculate which components are damaged and judge whether the armor of the vehicle is penetrated by enemy's warhead. To analyze the shot line efficiently, this paper presents the target modeling and the shot line analysis system to assess vulnerability of the ground combat vehicle. This system is easily able to do several functions: 1) the program reads STL files converted from CAD model which is designed by commercial CAD software. 2) It calculates the intersection between triangle of STL mesh and the shot line, and check if the components of the model are penetrated. 3) This program can visualize the results using OpenGL. The vulnerability assessment using the shot line analysis can be used to model the armor of the combat vehicle and arrange the inner components effectively in the early stage of development of the combat vehicle.

Key Words: Ground combat vehicles, Shot line analysis, Target geometry modeling, Vulnerability assessment

1. 서 론

취약성 평가는 표적이 적으로부터 피격 당했을 때 표적이 당한 피해정도를 계산하는 것이다. 표적이 전투상황에서 적의 공격으로부터 생존하기 위해서는 다음의 4가지 단계의 조건을 만족해야 한다:

1) 적에게 노출되지 않아야 한다.

2) 포탄에 피격되지 않아야 한다.

3) 피격되어도 표적이 관통되지 않아야 한다.

4) 관통되어도 표적이 무력화되지 않아야 한다.

이 중 취약성 평가는 포탄에 피격 당한 후 3), 4) 단계에서의 피해정도를 판단하기 위한 활동이다. 따라서, 취약성 평가는 적 포탄에 피격되었을 때 관통여부 판별과 무력화 판단 부분으로 구성된다. 여기서 무력화는 표적이 “기능적 일”을 수행하지 못하는 것을 의미하는데, 여기서 “기능적 일”이란 표적이 전투차량일 경우, 전투차량이 움직이는 기동성(Mobility), 사격을 하는 화력성

[†]Corresponding Author, kxp007@gmail.com
©2015 Society of CAD/CAM Engineers

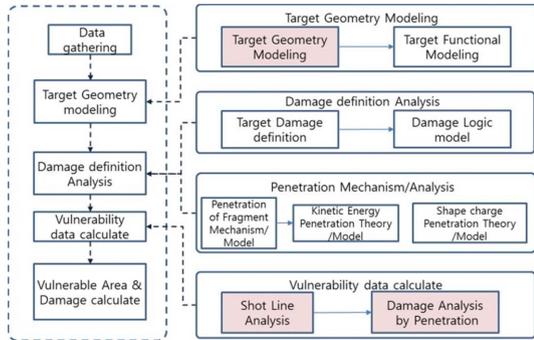


Fig. 1 Procedure of vulnerability assessment

(Firepower), 그리고 무인 전투차량의 경우 무인 차량의 원격조정의 용이성에 관한 운용성(Operability)의 3가지를 말한다^[1].

취약성 평가 절차는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 3가지의 절차로 구성된다. 1) 표적형상모델링: 전투차량의 형상을 모델링을 한 후, 표적 기능 모델링을 한다. 여기서, 표적 기능 모델링은 전투차량의 부품들이 기동성, 화력성, 운용성 중 어느 기능에 연관되어 있는 지를 표현하는 것이다. 2) 피해정의분석: 포탄에 피격된 표적이 입은 피해 수준을 정의하고 피해 논리 모델링을 한다. 3) 취약성 데이터 계산: 관통이론과 피격선 분석을 통해 부품의 관통여부를 판단하고 이에 의한 피해 정도를 분석한다^[2].

본 논문은 형상 모델링과 취약성 데이터 산출(Vulnerability data calculate)에 대하여 다루고 있다. 피격선 분석은 표적이 특정 위치와 방향에서 피격당했을 때 어떤 부품들이 관통되는 지를 계산하는 과정으로서 그 결과물로는 관통된 부품의 종류와 두께, 포탄과 부품의 입사각 등을 계산하는 것이다. 기존에 형상 모델링 및 피격선 분석이 가능한 프로그램으로 BRL CAD가 있다^[3,4]. BRL CAD는 1979년 미국의 BRL(Ballistic Research Laboratory)에서 탄도 미사일, 전자기 분석 등을 위해서 개발한 CAD SW로서 주로 항공기나 전투차량모델을 설계할 때 사용된다. 또한 BRL CAD에서는 모델 렌더링 하기 위한 기법으로 광추적(Ray tracing) 기법을 사용하였는데 피격선이 빛의 경로와 유사하기 때문에 광추적 방법으로 취약성 데이터 산출 중 피격선 분석이 가능하다^[5,6].

하지만 BRL CAD는 자유 곡면을 입력하기가 어렵고 일반 설계자에게 익숙하지 않기 때문에 본

논문에서는 상용 CAD 소프트웨어로 전투차량 형상 모델을 설계하였다. 현재 상용 CAD 소프트웨어들은 CATIA, SolidWorks, Pro Engineering 등이 있으며, 복잡한 곡면 형상 설계가 가능하고 3D 시각화 등 모델설계에 관련된 많은 기능들을 제공하고 있다. 또한 많은 사용자들에게 익숙하기 때문에 취약성 평가를 위한 모델 형상을 설계하는데 더 효율적이다^[7]. 또한 취약성 데이터 산출을 위한 프로그램으로 상용 CAD SW에서 모델링된 전투차량을 입력 받을 수 있는 C 언어 기반 피격선 분석 프로그램(SLAP: Shot Line Analysis Program)을 자체 개발하였다. SLAP는 주어진 피격선에 대해 교차되는 부품과 부품의 두께 및 입사각을 산출하고 운동에너지(KE)탄의 관통방정식에 의한 관통판별을 이용하여 관통 부품을 정의할 수 있다.

2. SLAP: 피격선 분석 프로그램

SLAP는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 표적 형상 모델링, 형상 수입, 관통점 계산(STL 삼각형과 피격선 교차점 계산, 삼각형 내부 교차점 판단), 관통점 정렬 순서로 관통 부품을 정의하고 관통 부품의 두께, 피격선과 관통 부품간 입사각을 산출한다. 그리고 관통방정식을 이용하여 부품의 관통 여부를 판별한다.

2.1 표적 형상 모델링

(1) 상용 CAD SW 모델의 수입

피격선 분석을 위해서는 전투차량 표적모델을 생성해야 하는데 CSG방식으로 모델링 하는 BRL-CAD SW를 사용하는 것보다 다양한 곡면 형상의 표적을 쉽게 입력할 수 있는 상용 CAD SW를 활용하였다.

본 연구에서는 상용 CAD SW인 SolidWorks™를 이용하여 각 부품들을 모델링하고 조립한 후 전체 조립모델을 STL 형식으로 Export 하였는데

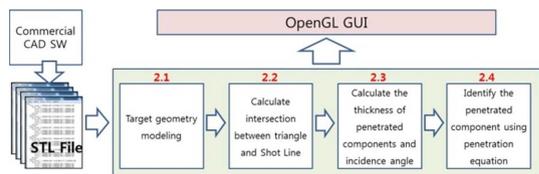


Fig. 2 Schema of the shot line analysis program(SLAP)

STL 형식으로 변환할 때 전체 조립모델 STL 파일 하나로 생성하지 않고 각 부품에 따라 각각의 STL 파일을 생성하였다. 이렇게 함으로써 피격선에 관통된 STL 삼각형이 어느 부품에 해당되는지 찾아낼 수 있다. 또한 전체 조립 후 STL파일로 변환하는 이유는 각 부품들의 STL 삼각형의 좌표가 조립체의 기준 좌표계에 대하여 저장되어 있기 때문에 피격선 분석에 바로 이용할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 3(a), (b)와 같이 STL file의 정보 확인을 쉽게 하기 위해 ASCII 형식의 STL file을 사용하였다. STL은 여러 개의 삼각형으로 입체 모델을 표현하는 방식으로 STEP과 IGES와 달리 복잡하지 않고 Fig. 3(b)와 같이 삼각형을 나타내는 세 점(P_1, P_2, P_3)의 좌표와 삼각형의 법선 벡터(n) 정보만 가지고 있기 때문에 프로그램에서 활용하기 쉽다는 장점을 갖고 있다. STL은 입체 모델을 삼각 평면으로 근사하여 표현하기 때문에 곡면에 대한 오차가 존재하는 단점이 있으나 취약성 평가를 STL 근사모델의 정밀도로도 충분히 수행할 수 있다.

(2) 표적모델 기준좌표계 설정

입력된 STL 모델은 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 OpenGL 화면의 중앙에 위치하지 않을 수 있는데 그 이유는 STL파일로 변환 하였을 때 STL 파일의 기준좌표계가 임의로 설정되기 때문이다. 따라서 STL파일을 SLAP에서 수입 후 기준좌표계를 다시 설정하였다. 수입 후 표적 형상 모델 기

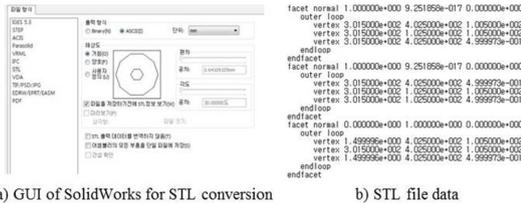


Fig. 3 Importing a SolidWorks model using STL files

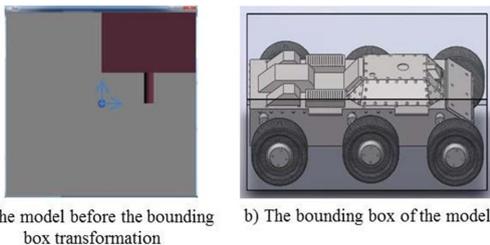


Fig. 4 Coordinate transformation using a bounding box

준좌표계를 설정하기 위해 Fig. 4(b)와 같은 전체 형상이 들어갈 수 있는 최소한 크기의 직육면체인 경계상자를 찾아내고 그 상자의 중심을 기준 좌표계로 잡았다. 표적의 전체 형상을 각 X, Y, Z 좌표의 최대값 최소값을 산출하고 최대값과 최소값의 중간값을 OpenGL의 기준 좌표계와 맞추었다.

2.2 삼각형과 피격선 간 교차점 계산

피격선 분석의 두 번째 과정은 피격선이 부품을 관통하는 점(관통점)의 좌표를 계산하고 관통되는 부품을 알아내는 것으로 다음의 세 단계로 구성된다. 1) STL 삼각형의 평면과 피격선의 교차점을 계산한다. 2) 교차점이 삼각형 내부에 있는지를 판단한다. 3) 1), 2) 과정을 모든 삼각형에 반복한다.

(1) STL 삼각형의 평면과 피격선의 교차점 계산

피격선은 시작점(S_1)과 끝점(S_2)의 좌표를 입력 받아 생성 되는데 다음의 2가지 가정을 적용하였다. 1) 피격선은 직선이다. 2) 피격선은 모든 부품을 완전히 관통한다.

피격선과 평면의 교차점을 계산하기 위하여 식 (1)과 같이 STL 파일 안에 있는 삼각형의 세 꼭지점(P_1, P_2, P_3)을 이용하여 평면방정식 $R(u, v)$ 을 만들고, 식 (2)와 같이 피격선을 생성하는 두 점 (S_1, S_2)을 이용하여 피격선의 직선 방정식 $P(t)$ 을 만든다. \vec{a}, \vec{b} 는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 $\overrightarrow{P_2P_3}$ 방향 벡터와 $\overrightarrow{P_2P_1}$ 방향 벡터이며 t 는 피격선의 매개변수이고 u, v 는 평면 방정식의 매개변수이다.

$$R(u, v) = P_2 + au + bv = P_2 + u[P_3 - P_2] + v[P_1 - P_2] \quad (1)$$

$$P(t) = S_1(1-t) + S_2(t) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 연립하면 식 (3)와 같이 미지수 3개(u, v, t)에 대한 행렬식으로 정리한 후 이를 풀어 매개변수 값 u, v, t 를 구하고 이를 식 (2)에 대입하면 교차점(Q)의 좌표값을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{P_3} - x_{P_2} & x_{P_1} - x_{P_2} & x_{S_1} - x_{S_2} \\ y_{P_3} - y_{P_2} & y_{P_1} - y_{P_2} & y_{S_1} - y_{S_2} \\ z_{P_3} - z_{P_2} & z_{P_1} - z_{P_2} & z_{S_1} - z_{S_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{S_1} - x_{P_2} \\ y_{S_1} - y_{P_2} \\ z_{S_1} - z_{P_2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

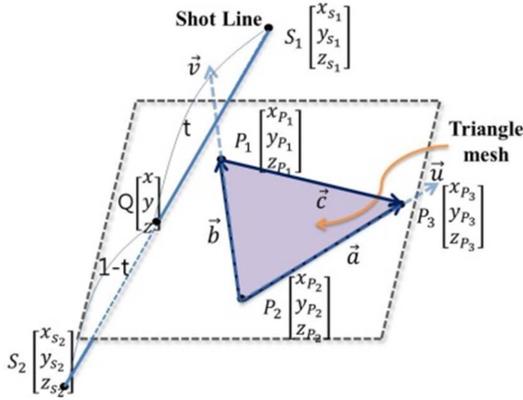


Fig. 5 Calculation of the intersection between a triangle and a shot line

(2) 삼각형 내부의 교차점 존재 판단

위에서 계산된 교차점이 삼각형 내부에 있는지를 판단하기 위해서 식 (4)를 이용하였다^[8]. 앞에서 구한 매개변수 u, v, t 가 식 (4)와 같은 조건을 만족할 때 교차점이 삼각형의 내부에 있게 된다. 삼각형의 내부에 있는 교차점을 관통점으로 정의한다.

$$\begin{cases} 0 \leq t \leq 1 \\ u \geq 0 \\ v \geq 0 \\ (u+v) \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

2.3 피격선 분석의 산출물 계산

피격선 분석 프로그램은 관통 부품 정의, 관통 두께 및 피격선과 관통된 부품 사이의 각인 입사각 산출을 목표로 한다.

(1) 관통 부품의 종류 확인

각 부품에 따라 각자의 STL파일을 저장 하였기 때문에 2.2절에서 산출한 관통점이 속해 있는 STL 삼각형을 찾아냄으로써 그 STL 삼각형이 존재하

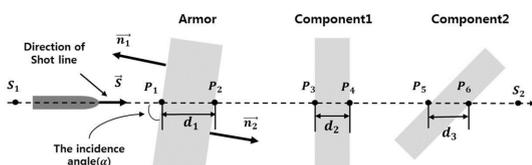


Fig. 6 Calculation of the penetrated thickness and the incidence angle

는 부품을 정의할 수 있다. 또한 피격선의 진행 방향에 따라 관통 부품들을 순차적으로 나열하기 위해 관통점들을 피격선의 시작점(S_1)에서 끝점(S_2)으로 정렬하였다.

(2) 관통 두께 계산

정렬된 관통점들 사이의 거리를 계산하여 Fig. 6의 관통 부품의 두께(d)를 산출한다. 두께를 계산할 때 계산한 관통점들 사이의 거리가 부품의 두께인지 아니면 부품들간의 비어 있는 공간의 거리인지 판단해야 한다. 만일 두 개의 관통점(P_1, P_2)과 이 점들이 속하는 평면의 법선벡터(\vec{n}_1, \vec{n}_2)가 주어져 있을 경우 피격선의 진행벡터($\vec{S} = \vec{S}_1 - \vec{S}_2 / |S_2 - S_1|$)와 \vec{n} 의 내적이 음이면 탄이 부품을 뚫고 들어갈 때를 의미하며, 양이면 탄이 부품을 뚫고 나왔을 때를 의미한다. 따라서 부품을 뚫고 들어감과 나옴이 순차적으로 나타날 경우 ($\vec{S} \cdot \vec{n}_1 < 0, \vec{S} \cdot \vec{n}_2 > 0$) 관통 부품간 사이 거리라고 판단한다.

(3) 입사각 계산

입사각(α)은 2.4절에서 관통여부를 판별 하기 위한 관통 방정식의 변수 중 하나이다. 입사각은 식 (5)와 같이 피격선의 진행 단위 벡터(\vec{S})와 관통점들이 속해있는 평면의 법선 단위 벡터(\vec{n})와 내적을 이용하여 입사각(α)를 계산한다.

$$\alpha = 90 - \cos^{-1}[\vec{S} \cdot \vec{n}] \quad (5)$$

2.4 관통 방정식을 이용한 관통 판별

2.3절에서는 피격선과 만나는 모든 부품을 관통 부품으로 정의하였는데 실제 상황에서는 장갑을 뚫지 못하여 부품들이 완전히 관통되지 않는 경우가 발생한다. 그래서 정확한 부품들의 관통판별을 위해 2.4절에서는 관통 방정식을 이용하여 실제로 부품들의 관통 여부를 판별한다. 관통 판별 방법은 Fig. 7과 같이 먼저 2.3절에서 산출한 부품의 두께와 입사각을 이용하여 관통한계속도(Ballistic limits: V_L)를 계산한다. 관통한계속도는 장갑을 뚫을 수 있는 최소 속도를 의미한다. 피격된 첫 번째 부품에 대한 관통 판별은 산출된 관통한계속도와 탄의 충돌속도(V_{imp})를 비교하여 충돌속도가 더 크면 장갑이 관통되고 관통한계속도의 값이 더 크면 장갑은 관통이 안된 것으로 판단한다. 만약 첫 번째 부품이 관통되면 포탄의 충돌속도와 첫 번째

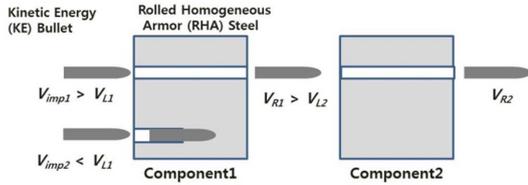


Fig. 7 Decision of penetration using Ballistic limits (V_L) and Impact velocity (V_{imp}) and Residual velocity (V_R) for KE Bullet and RHA steel plates

부품에 대한 관통한계속도를 이용하여 관통 후 잔여속도(V_R)를 계산한다. 계산한 잔여속도는 두 번째 부품에 대한 충돌속도로 사용되고 계산된 두 번째 부품에 대한 관통한계속도와 비교 하여 관통 판단을 한다. 첫 번째 부품이 관통되지 않으면 잔여속도는 0이 되며 관통 과정은 더 이상 발생하지 않는다.

관통방정식에는 탄의 초기속도, 종류, 직경과 길이, 표적의 재질, 포탄의 피격선과 표적 평면의 입사각, 등 변수들이 있다. 하지만 본 논문에서는 관통 판별의 개념 설명을 위하여 간단한 관통방정식으로 1992년에 BRL에서 제안한 식 (6),(7)을 이용한다^[9]. 향후 관통방정식 연구를 통하여 보다 정교한 관통방정식을 사용할 예정이다. 식 (6)은 관통한계속도(V_L)를 산출하는 식으로 운동에너지(KE) 탄 대한 RHA (Rolled Homogeneous Armor) steel 평판의 관통실험을 수치화하여 표현한 식이다^[9]. 식 (6)에서 M은 포탄의 질량을 의미하고 D는 포탄의 지름을 의미한다. 그리고 T와 θ 는 부품의 두께와 입사각으로 2.3절에서 산출한 값을 이용한다. A, α , β 는 실험으로 얻는 상수값으로서 일반적으로 RHA 평판에 대한 A 값의 범위는 1,000에서 60,000이다. 그리고 α , β 는 거의 1에 근접한다^[9].

$$V_L = \sqrt{\frac{AD^3 \left(\frac{T}{D} [\sec(\theta)]^\beta \right)^\alpha}{M}} \quad (6)$$

식 (7)은 관통 후 잔여속도(V_R)을 산출하는 식으로 변수 X는 $(V_{imp}/V_L) - 1$ 과 같다. V_S 는 포탄의 충격 속도이다. 그리고 a, b, c는 실험으로 얻는 상수값으로서 일반적으로 $a = 1.1$, $b = 0.8$, $c = 1.65$ 으로 이용된다^[9].

$$V_R = V_L \left(\frac{aX^2 + bX + c\sqrt{X}}{X + 1} \right) \quad (7)$$

3. 실험 및 결과

3.1 상용 모델 수입

Fig. 8은 프로그램을 테스트를 위해 설계된 지상 전투차량 모델이다. Fig. 8a)는 상용 CAD 프로그램인 SolidWorks에서 설계된 모델이고 b)는 이 모델의 STL 파일을 불러와서 SLAP에서 OpenGL로 구현한 결과이다. 전투차량 모델은 총 29개의 부품으로 이루어져 있고 약 50만개의 STL 삼각형으로 이루어져 있다. Table 1은 SolidWorks에서 설계한 부품 이름들과 이에 대응되는 SLAP의 부품 번호들을 나타낸다.

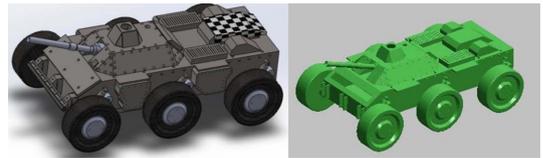


Fig. 8 Ground combat vehicle model; a) The SolidWorks model b) The SLAP model after import from SolidWorks

Table 1 The numbers and name of parts imported to SLAP

SLAP Part No	SolidWorks model name	SLAP Part No	SolidWorks model name
0	Actuator(L)-1	15	Actuator(R)-3
1	Damper(L)-1	16	Damper(R)-3
2	Tire(L)-1	17	Tire(R)-3
3	Actuator(L)-2	18	Electric Generator
4	Damper(L)-2	19	Injection tube
5	Tire(L)-2	20	Under Body
6	Actuator(L)-3	21	Upper Body-1
7	Damper(L)-3	22	Upper Body-2
8	Tire(L)-3	23	Electric Generator Support
9	Actuator(R)-1	24	Engine support
10	Damper(R)-1	25	Engine
11	Tire(R)-1	26	Fuel Support
12	Actuator(R)-2	27	Fuel
13	Damper(R)-2	28	Cannon
14	Tire(R)-2		

3.2 피격선 분석

주어진 피격선에 대하여 계산된 관통점들을 관통된 순서로 나열한다. 관통된 부품은 SLAP Part No로 표시되는데 Table 1을 이용하여 부품의 종류와 이름을 알 수 있다. 또한 관통 부품, 관통점, 관통 부품의 두께, 입사각 정보를 산출하여 표로 작성하였고 OpenGL을 통해 피격선에 따른 관통 부품들을 시각화 하였다.

(1) Z축 방향의 피격선에 대한 피격선 분석:

Z축 방향으로 피격선 ($S_1(0, 0, 5000)$, $S_2(0, 0, -5000)$) 생성하였을 때 Table 2와 같이 관통점들은 총 8개가 생성되고 관통된 부품은 총 3개로 Table 1로부터 Tire(L)-2, Under body, Tire(R)-2가 관통됨을 확인할 수 있다. 각 관통된 부품들의 두께들도 350 mm, 100 mm, 350 mm로 산출되었다. Fig. 9a)는 피격선의 모습이고 b)는 피격선 분석을 통해 관통된 부품들만 표시한 것이다.

(2) 임의방향의 피격선에 대한 피격선 분석:

Table 3은 임의 방향의 피격선($S_1(5000, 5000, 5000)$, $S_2(-5000, -5000, -5000)$)이 발생하였을 때

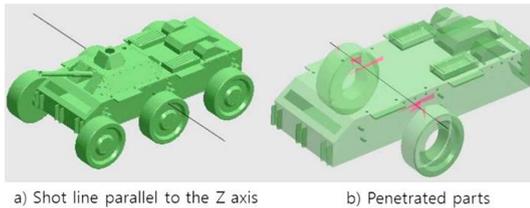


Fig. 9 Result of SLAP for a shot line parallel to the Z axis

Table 2 Result of shot line analysis

SLAP Part No.	Penetrated Points			Penetrated Thickness (mm)	Incidence angle (Degree)
	X	Y	Z		
5	0.0	0.0	1230.0	350	90
5	0.0	0.0	880.0		-90
20	0.0	0.0	750.0	100	90
20	0.0	0.0	650.0		-90
20	0.0	0.0	-650.0	100	90
20	0.0	0.0	-750.0		-90
14	0.0	0.0	-920.0	350	90
14	0.0	0.0	-1270.0		-90

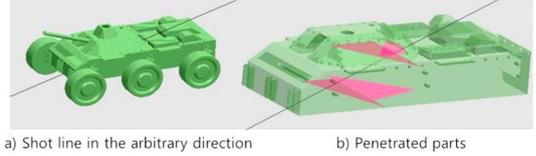


Fig. 10 Result of SLAP in the arbitrary direction

Table 3 Result of the shot line analysis

SLAP Part No.	Penetrated Points			Penetrated Thickness (mm)	Penetration angle
	X	Y	Z		
21	375.5	375.5	375.5	128.8	71.8
21	301.1	301.1	301.1		-54.7
20	224.6	224.6	224.6	173.2	35.3
20	124.6	124.6	124.6		-35.3
20	-624.4	-624.4	-624.4	173.2	35.3
20	-425.4	-425.4	-425.4		-35.3

피격선 분석 결과를 보여준다. 관통점은 6개이고 관통된 부품은 2개로 Table 1에서 확인하면 Upper body, Under body이다. 각 관통된 부품의 두께와 입사각은 Table 3과 같다. Fig. 10은 피격선의 모습과 피격선에 관통된 부품을 표현한 결과이다.

3.3 관통여부 판별

Table 3의 피격선 분석 결과를 이용하여 관통판별을 하였다. Table 3에서 관통 두께 128.8 mm, 173.2 mm, 173.2 mm의 3번의 관통과정에 대하여 관통판별을 수행하였다. 식 (6)을 이용하여 관통여부를 판단하고 식 (7)을 이용하여 관통 후 잔여속도(V_R)를 계산한다. 실험한 탄의 종류는 APFSDS-T/ K-247 운동에너지(KE)탄으로서 직경은 105 mm이며 질량은 18.7 kg이다^[10].

Table 4는 초기속도(V_{in})의 값에 따라 관통 판별을 한 결과이다. 총 4가지 충돌속도(V_{imp})에 대하여

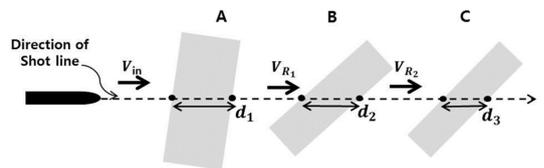


Fig. 11 Penetration analysis using a penetration equation in the case of Table 3

Table 4 Result of penetration test of 3 plates according to different V_{imp}

		$d_1 = 128.8 \text{ mm}$		$d_2 = 173.2 \text{ mm}$	
V_{imp} (m/s)	V_{L1} (m/s)	Penetration	V_{R1} (m/s)	V_{L2} (m/s)	Penetration
500	968.23	X	0	0	X
1000	968.23	O	305.92	1066.6	X
1500	968.23	O	1246.2	1066.6	O
2000	968.23	O	1783.5	1066.6	O
$d_3 = 173.2 \text{ mm}$					
		V_{R2} (m/s)	V_{L3} (m/s)	Penetration	
		0	0	X	
		0	0	X	
		769.45	1066.6	X	
		1212.1	1066.6	O	

시뮬레이션을 하였다. 관통은 Fig. 11과 같이 A, B, C 3부품에 대해 이루어졌고 d_1 , d_2 , d_3 는 Table 3에서 나온 부품 두께로 d_1 은 128.8mm d_2 는 173.2 mm d_3 는 173.2 mm이다. V_{R1} , V_{R2} 는 관통 후 잔여 속도를 뜻하며 V_{L1} , V_{L2} , V_{L3} 은 각 부품 두께와 입사각에 따른 관통한계속도이다. Table 4에서 Penetration은 관통판별 결과를 의미하며 관통이 되면 O, 관통을 하지 못하면 X로 표기하였다.

Table 4에서 확인한 결과, 포탄의 충돌속도 1000(m/s)에서 첫 부품이 관통되었고 1500(m/s)에서 두 번째 관통까지 발생하였다. 3부품 모두 완전 관통되는 경우는 속도가 약 2000(m/s)이상일 때 발생하였다.

4. 결 론

본 논문은 취약성 평가 중 표적의 형상 모델링과 취약성 데이터 산출을 위한 시뮬레이션 방법을 제시하였다. 상용 CAD SW를 이용하여 전투차량 모델을 설계하였고 자체 개발한 SLAP프로그램을 이용하여 피격선 분석 및 관통 분석을 하였다. SLAP에서는 상용 모델러의 STL파일을 이용한 수입, OpenGL을 이용한 모델의 시각화, 관통점의 위치와 관통된 부품들 도출, 피격선상에 관통점 정렬, 관통 부품의 두께 및 입사각 산출을 수행할 수 있었다. 더불어 관통방정식에 의한 관통판별을 하였지만 현재는 운동에너지(KE)탄에 대한 RHA평

판의 관통방정식만 사용하였다. 추후에는 더 다양한 재질의 평판과 탄의 종류에 따른 관통방정식들을 더 많이 이용하여 정확한 관통판별을 할 수 있을 것이다. 이를 통해 추후에 전체적인 취약성 평가를 할 수 있는 프로그램으로 발전할 가능성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 설립된 미래 지상체계분석 특화 연구실의 연구자금을 지원 받아 수행한 것입니다.

References

1. Colonel Brian R. Zahn, 2000, The Future Combat System: Minimizing Risk While Maximizing Capability, *USAWC Strategy Research Project*.
2. Morris Driels, 2012, Weaponering Conventional Weapon System Effectiveness, 2nd Edition, *AIAA Press*.
3. Paul H. Deitz, Harry L. Reed, Jr, J. Terrence Kloplic and James N. Walbert, 2009, Fundamentals of Groun Combat System Ballistic Vulnerability/Lethality, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
4. Pei Yang, Song Bifeng and Han Qing, 2008, Shot Line Geometric Description Method for Aircraft Vulnerability Calculation, *Chinese Journal of Aeronautics*, pp.498-504.
5. Clifford Yapp, 2009, Interactive Raytracing: The nirt Command, *Army Research Laboratory*.
6. Lee, A. Butler and Eric W. Edwards, 2002, BRL-CAD Tutorial Series Volume3 - Principles of Effective Modeling, *Army Research Laboratory*.
7. Li Jun, Yang Wei, Zhang Yugang, Pei Yaing, Ren Yunsong and Wang Wei, 2013, Aircraft Vulnerability Modeling and Computation Methods Based on Product Structure and CATIA, *Chinese Journal of Aeronautics*, pp.334-342.
8. Jiří Havel and Adam Herout, 2010, Yet Faster Tay-Triangle Intersection, *IEEE*, pp.434-438.
9. John A. Zook, 1992, Terminal Ballistics Test and Analysis Guidelines for the Penetration Mechanics Branch, *Ballistic Research Laboratory*.
10. Poongsan Catalog, 2014, Ammunition and Explosive, *Poongsan Corporation*.
11. Gilbert Strang, 2007, Linear Algebra and Its

Application, 4th Edition, *Cengage Learning*.
 12. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling and Brian P. Flannery, 2007, Numerical Recipes, 3rd Edition, *Cambridge Univ. Press*.
 13. Zvi Rosenberg and Erez Dekel, 2012, Terminal Ballistics, Spriger.
 14. Alan Moore and Rick Steiner, 2008, A Practical Guide to SysML, *OMG Press*.
 15. Phillip C. Dykstra, 2013, The BRL-CAD Package: An Over View, *Army Research Laboratory*.
 16. John R. Anderson and Eric W. Edwards, 2002, BRL-CAD Tutorial Series Volume4 – Converting

Geometry Between BRL-CAD and Other Formats, *Army Research Laboratory*.
 17. Yoo, C., Jang, E.S., Park, K. and Choi, S.Y., 2014, Target Geometry Modeling for the Shot Line based Vulnerability Analysis of the Ground Vehicles, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*.
 18. Yoo, C., Jang, E.S., Park, K. and Choi, S.Y., 2014, Development of the Shot Line Analysis Program to Assess Vulnerability of Ground Combat Vehicles, *Proceedings of ACDDE Conference*.



유 철

2013년 명지대학교 기계공학과 학사
 2013년~현재 명지대학교 기계공학과 석사과정
 관심분야: CAD/CAM 응용, Simulation



장 은 수

2014년 명지대학교 기계공학과 학사
 2014년~현재 명지대학교 기계공학과 석사과정
 관심분야: CAD/CAM 응용, CAE 응용



박 강

1986년 2월 서울대학교, 공학학사 (기계설계학과)
 1988년 2월 서울대학교, 공학석사 (기계설계학과)
 1986년 8월 The Pennsylvania State University, Ph.D. (Industrial and Manufacturing Eng.)

학회활동

현 대한기계학회 교육부문 이사
 현 대한기계학회 생산 및 설계 부문 이사
 현 한국정밀학회 종신회원
 2013년 3월~현재 한국 CAD/CAM 학회 부회장
 2010년 3월~2012년 2월 한국 CAD/CAM학회 총무



최 상 영

1982년 육군사관학교 학사
 1985년 국방대학교 국방과학 석사
 1989년 (영)크랜필드 대학 박사
 1989년~2013년 국방대학교 국방과학부 교수
 2013년~현재 명지대 미래지상특화센터 연구 교수