

토양 내 J-hook 궤적을 고려한 침투해석 모델 개발

성 승 훈^{1†} · 지 훈¹

¹국방과학연구소 미사일연구원 선임연구원

Penetration Model in Soil Considering J-hook Trajectory

Seung-Hun Sung^{1†} and Hun Ji¹

¹Senior Researcher, Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

Abstract

This study proposes a penetration model in soil considering the wake separation and reattachment based on the integrated force law (IFL). Rigid body dynamics, the IFL, and semi-empirical resistance function about soil are utilized to formulate the motion of the hard projectile. The model can predict the trajectory in soil considering the spherical cavity expansion phenomenon under various oblique angles and angles of attack (AOA). The Mohr-Coulomb yield model is utilized as the resistance function of the soil. To confirm the feasibility of the proposed model, a comparative study is conducted with experimental results described in the open literature. From the comparative study, the penetration depth estimated from the proposed model had about 13.4% error compared to that of the experimental results. In general, the finite element method is widely used to predict the trajectory in soil for a projectile. However, it takes considerable time to construct the computational model for the projectile and perform the numerical simulation. The proposed model only needs to the dimension of the projectile and can predict the trajectory of the projectile in a few seconds.

Keywords : penetration model, J-hook, wake separation, reattachment

1. 서론

탄체의 변형 혹은 파괴를 무시한다면 탄체를 강체로 가정하여 토양 내 침투 궤적을 예측할 수 있다(Forrestal and Luk, 1992). 즉, 구형공동팽창(spherical cavity expansion) 이론에 따라 탄체와 토양 간 분리(wake separation)와 재접촉(reattachment)이 반복되어 탄체는 J-hook 궤적으로 침투한다.

탄체의 궤적을 계산하기 위한 수치적 방법으로서 탄체표면을 다수의 영역으로 나누고 각 영역 중심에서의 법선방향 응력(normal stress)과 접선방향 응력(tangential stress)에 대한 경험식을 활용해 탄체의 무게중심(center of gravity)에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하는 Differential Area Force Law(DAFL) 방법이 널리 활용되고 있다(Heuze, 1990). DAFL 방법은 PENCO2D와 PENCVR3D 코드에 적용되어 활용되고 있다(Adley *et al.*,

1997; Danielson and Adley, 2000).

또 다른 방법으로서 탄체 형상을 다항식으로 정의한 후, DAFL 방법에 적용되는 응력에 대한 경험식들을 활용해 DAFL 방법 보다 빠르게 탄체 표면에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하는 Integrated Force Law(IFL) 방법이 있다(Youch, 2006). Sun 등(2017)은 IFL 방법을 정형화된 탄체형상 뿐만 아니라 비정형 형상의 탄체에 대해 적용하기 위한 기존의 방법을 개선하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Sun 등(2017)이 제시한 개선된 IFL 방법을 활용하여, 토양에서의 탄체의 침투 궤적을 평가하는 해석모델을 개발한다. 탄체를 강체로 가정하며, 토양에 대한 저항함수는 Mohr-Coulomb 항복 모델(Forrestal and Luk, 1992)을 활용한다. Sun 등(2017)의 모델에는 탄체와 토양 간 분리와 재접촉에 대해 고려하지 않았으나, 본 연구에서는 이를 추가한 모델을

[†]Corresponding author:

Tel: +82-42-821-0913; E-mail: sshgns@add.re.k

Received September 13 2021; Revised November 18 2021;

Accepted December 3 2021

© 2022 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

개발한다. 탄체와 토양 간 분리와 재접촉 기준은 기존 문헌(Bernard and Creighton, 1979; Kong et al., 2014)에 제시된 값을 활용한다. 즉, 본 연구에서는 Sun 등(2017)의 모델을 기반으로 기존 문헌에 제시된 탄체와 토양 간 분리와 재접촉 기준을 활용해 그 기준을 만족하는 탄체의 표면에 대한 응력을 계산함으로써 탄체의 침투 궤적을 예측하는 모델을 개발한다.

이로써 탄체의 입사각 혹은 Angle Of Attack(AOA)에 따른 J-hook 현상을 모사할 수 있다. 이렇게 개발한 모델에 대해 기존 문헌의 데이터를 기반으로 비교/검증 연구를 수행한다.

2. 토양-탄체 간 분리 및 재접촉을 고려한 IFL 방법 기반 침투해석 모델 개발

본 연구에서는 토양에서의 침투 궤적을 예측하는 모델을 개발하기 위해 IFL 방법을 활용한다. 토양은 취성보다 연성에 가까운 성질을 지니기 때문에 자유표면효과(free-surface effects)는 무시한다. IFL 방법을 활용하여 토양에서의 침투 궤적 예측하는 절차는 아래와 같다.

- 초기조건을 정의하고 탄체의 형상정보를 다항식으로 정의한다.
- 토양의 저항함수를 정의하고 탄체와 토양 간 분리와 재접촉에 따른 탄체 표면에 작용하는 응력 분포에 대해 계산한다.
- 응력 분포를 활용해, 탄체의 무게중심에 작용하는 합력과 모멘트를 계산한다.
- 합력과 모멘트 정보로부터 탄체의 가속도, 속도, 위치 정보를 계산한다.
- 시간 증분에 따라 위의 절차를 반복한 후, 탄체의 속도가 '0'에 수렴하면 해석을 마무리하고 탄체의 침투 궤적을 평가한다.

2.1 탄체의 형상정보 정의

탄체의 형상정보 정의를 위한 좌표계는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1(b)의 임의의 포인트 p에서의 탄체 반지름을 $r_w = f(x_w)$ 로 정의하면, 탄체 표면에서의 단면적의 증분은 식 (1)과 같다. 즉, IFL 방법은 탄체 반지름을 길이방향(x_w)에 대한 다항식으로 정의할 수 있으며 이를 활용해 단면적 증분을 계산할 수 있다.

$$dA = r_w d\psi dS = f(x_w) \sqrt{1 + f'(x_w)^2} dx_w d\psi \quad (1)$$

여기서, $dS = \sqrt{1 + f'(x_w)^2} dx_w$ 는 탄체 표면의 아크 길이(arc length)에 대한 증분이며, $d\psi$ 는 Fig. 1(b)에서와 같이 방위각의 증분이다. 탄체의 3차원 좌표계를 Fig. 2와 같이 표현하면, $f'(x_w)$ 는 식 (2)와 같이 정의된다. Fig. 2에서 η 는 탄체 좌표계 y_w 축과 탄체 표면에 위치한 임의의 포인트와의 각도를 의미한다.

$$f'(x_w) = \tan(\pi - \eta) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sin \eta = \sin(\pi - \eta) = \frac{-\tan(\pi - \eta)}{\sqrt{1 + [\tan(\pi - \eta)]^2}} \\ = \frac{-f'(x_w)}{\sqrt{1 + f'(x_w)^2}} \\ \cos \eta = -\cos(\pi - \eta) = \frac{1}{\sqrt{1 + [\tan(\pi - \eta)]^2}} \\ = \frac{1}{\sqrt{1 + f'(x_w)^2}} \end{cases}$$

여기서, $\tan(\pi - \eta)$ 는 임의의 포인트 p에서 탄체 표면의 기울기를 의미한다.

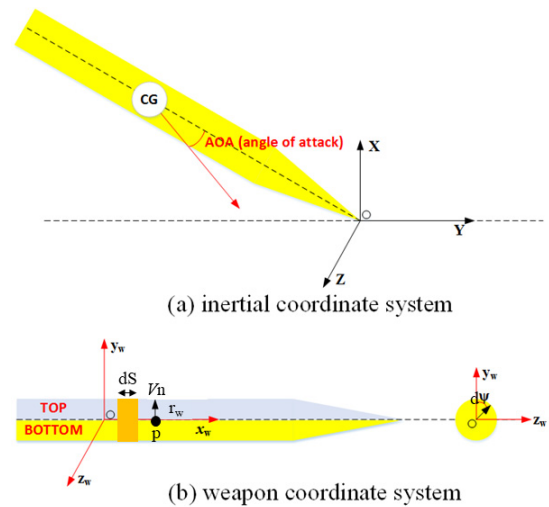


Fig. 1 Projectile coordinate system

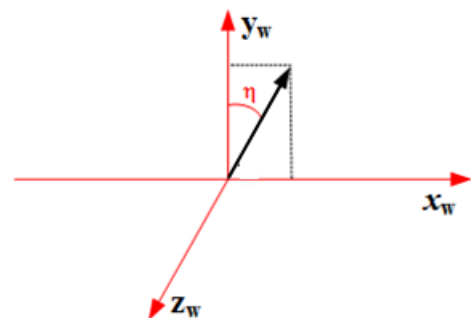


Fig. 2 3-D coordinate system of a projectile

2.2 토양-탄체 간 접촉응력 계산을 위한 저항함수 정의

탄체 임의의 포인트 p에서의 법선방향 속력 V_n 은 식 (3)과 같다.

$$V_n = \vec{V}_p \cdot \vec{n} \tag{3}$$

$$\vec{n} = (\sin\eta, \cos\eta)$$

여기서, \vec{V}_p 는 임의의 포인트 p에서의 속도 벡터로서 식 (4)와 같다.

$$\vec{V}_p = \vec{V}_{cg} + \vec{r}_p \times \vec{\omega} \tag{4}$$

여기서, \vec{V}_{cg} , $\vec{\omega}$ 는 각각 무게 중심에서의 속도 벡터, 각속도 벡터이다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_p = (V_{cgX} + r_{pw}\omega_Z)\sin\eta + (V_{cgY} - x_w\omega_Z)\cos\eta \tag{5}$$

임의의 포인트 p에서의 접촉응력은 법선방향의 응력(σ_n)와 접선방향의 응력(τ_n)으로 구성된다. 토양에서의 법선방향의 저항함수는 구형 공동팽창 이론에 따라, 법선 방향의 공동팽창속도(cavity-expansion velocity)에 대한 다항식은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_n = q_1 + q_2 V_n^2 = \tau_0 A + \rho_0 B V_n^2 \quad (V_n \geq 0) \tag{6}$$

여기서, q_1 과 q_2 는 토양에 대한 재료상수이며, τ_0 는 전단강도, ρ_0 는 토양의 초기상태의 밀도이다. 만약, V_n 이 '0'보다 작을 경우, 법선방향의 응력은 '0'으로 작용한다. 즉, 이러한 상황은 탄체와 토양이 완전히 분리된 상황을 의미한다. 또한, 접선방향의 응력은 식 (7)과 같다.

$$\tau_n = \mu\sigma_n \leq \tau_0 \tag{7}$$

여기서, μ 는 토양과 탄체 간 마찰계수이다.

토양의 동적마찰계수는 토양의 종류, 탄체의 속도 등에 따라 달라지는 값이다. 식 (7)의 토양과 탄체 간 마찰계수(μ)는 아래의 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\mu = \begin{cases} \mu_s - (\mu_s - \mu_d)(v_s/50), & v_s \leq 50m/s \\ \mu_d, & \text{그 외} \end{cases} \tag{8}$$

μ_s 는 정적마찰계수, μ_d 는 동적마찰계수이다.

접촉응력을 법선방향 응력과 접선방향 응력을 활용해 축방향 응력(σ_{at})과 반경방향 응력(σ_{rt})으로 나타내면 식 (9)와 같다. Fig. 3은 식 (6)과 (7)의 응력과 식 (9)의 응력과의 관계를 보여주는 자유물체도이다.

$$\begin{cases} \sigma_{at} = -\sigma_n \sin\eta - \tau_n \cos\eta \\ \sigma_{rt} = -\sigma_n \cos\eta + \tau_n \sin\eta \end{cases} \tag{9}$$

만약, 탄체가 X-Y 평면에서의 2차원 궤적으로 정의된다면, 탄체 좌표계의 xw방향과 yw방향을 따르는 모든 응력은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \sigma_{x_w t} = \sigma_n (-\sin\eta - \mu \cos\eta) \\ \sigma_{y_w t} = \sigma_n (-\cos\eta + \mu \sin\eta) \cos\psi \end{cases} \tag{10}$$

2.3 토양-탄체 간 분리 및 재접촉 현상 정의

강체로 가정된 탄체가 토양을 침투하면서 공동 표면에서 탄체가 접촉 및 분리 현상이 반복되며 J-hook 궤적으로 침투한다. 즉, 탄체의 접촉 및 분리 현상이 발생하는 기준을 정의하고 이를 반영한 모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 Kong 등(2014)의 토양-탄체 분리 발생 기준과 Bernard와 Creighton(1979)의 토양-탄체 재접촉 발생 기준을 활용해 토양-탄체 간 분리 및 재접촉 현상을 정의한다.

2.3.1 토양-탄체 분리 발생 기준

Kong 등(2014)은 탄체와 토양 간 접촉을 유지하기 위한 최소의 각을 분리각(wake separation angle, ϕ)이라 가정하고, 임의의 포인트 p에서 식 (11)의 기준을 만족하면 분리 현상이 발생한다고 정의했다.

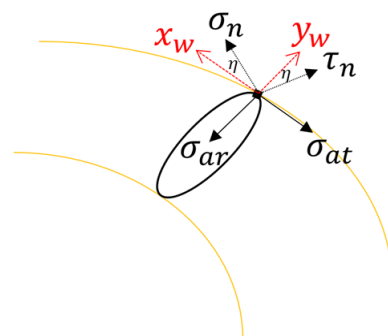


Fig. 3 Free body diagram

$$\begin{aligned} & (V_{cgX} + r_p \omega_Z) \sin \eta + (V_{cgY} - x_w \omega_Z) \cos \eta \\ & < \sqrt{(V_{cgX} + r_p \omega_Z)^2 + (V_{cgY} - x_w \omega_Z)^2} \times \sin \phi \end{aligned} \quad (11)$$

다시 말해, 임의의 포인트 p에서 식 (11)을 만족하면 분리 현상이 발생하여 탄체와 토양이 접촉하지 않는다. 따라서 이때 임의의 포인트 p에서의 탄체-토양 간의 접촉응력(식 (6))은 '0'으로 계산된다.

2.3.2 토양-탄체 재접촉 발생 기준

토양과 탄체의 재접촉은 탄체가 공동 안에서 회전하며 이동할 때 발생한다. 본 연구에서 재접촉 발생 기준은 Bernard와 Creighton(1979)의 기준을 활용했으며, 관련된 변수들은 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다.

식 (12)는 탄체가 토양으로 침투를 시작하는 시점에서 AOA에 따른 임의의 포인트 p에서의 탄체 좌표계 x_w 축과 공동 좌표계 x_c 축 간 거리를 나타낸다. 또한, δ 는 탄체가 토양으로의 침투를 시작한 후, 시간 t에서 임의의 포인트 p에서의 탄체 좌표계 x_w 축과 공동 좌표계 x_c 축 간 거리이며 이는 식 (13)으로 표현된다.

$$\delta_0 = x_w \sin(AOA) \quad (12)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \times (x_w - x_{w0})^2 \times \frac{\omega_Z}{V_{cgX} + r_p \omega_Z} + \delta_0 \quad (13)$$

여기서, x_{w0} 는 Fig. 4의 탄체의 분리(separation) 포인트에서 탄체 좌표계의 x_w 축의 값이다.

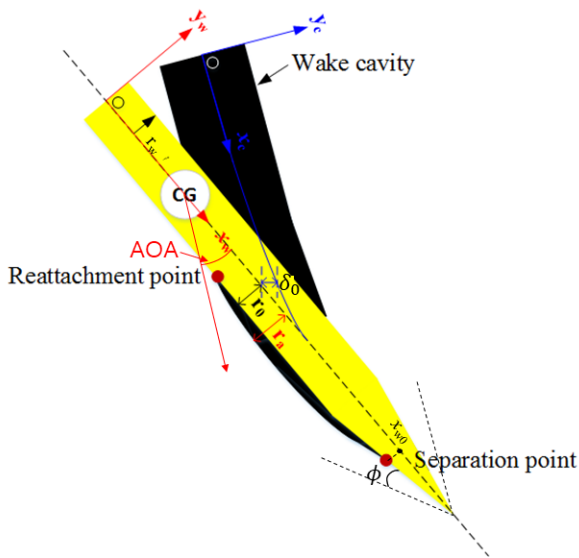


Fig. 4 Parameters of the weapon coordinate system and the cavity coordinate system to estimate the reattachment

탄체-토양의 재접촉은 식 (14)를 만족하는 영역에서 발생하며, 관련된 변수는 Fig. 5와 같다(Bernard and Creighton, 1979; Kong et al., 2014). 다시 말해, 식 (14)를 만족하지 못하는 영역의 접촉응력은 '0'으로 계산된다.

$$r_p > r_a \text{ or } \sin^{-1}(\sin \eta) \geq \phi \quad (14)$$

$$r_p = \begin{cases} \sqrt{(\delta + r_0)^2}, & \pi/2 \leq \beta < 3\pi/2 \\ \sqrt{(r_0 - \delta)^2}, & \text{그 외} \end{cases}$$

$$r_a = \sqrt{r_0^2 + 2 \times r_0 \times (x_w - x_{w0}) \times \tan \phi}$$

2.4 탄체 무게 중심에서의 합력 및 모멘트 합 계산

탄체가 V_0 의 속도로 토양 속에 침투할 때, 임의의 포인트 p에서 탄체-토양의 접촉응력(식 (10))과 탄체 표면의 기울기(식 (2))를 활용해 면적 증분에 따른 합력 증분을 식 (15)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{cases} dF_{xwt} = \sigma_{xwt} dA \\ = \sigma_n [f'(x_w) - \mu] f(x_w) dx_w d\psi \\ dF_{ywt} = \sigma_{ywt} dA \\ = \sigma_n [-1 - \mu f'(x_w)] \cos \psi f(x_w) dx_w d\psi \end{cases} \quad (15)$$

합력 증분에 따른 모멘트 증분은 식 (16)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} dM_t &= x_w dF_{ywt} - y_w dF_{xwt} \\ &= x_w dF_{ywt} - r_p \cos \psi dF_{xwt} \end{aligned} \quad (16)$$

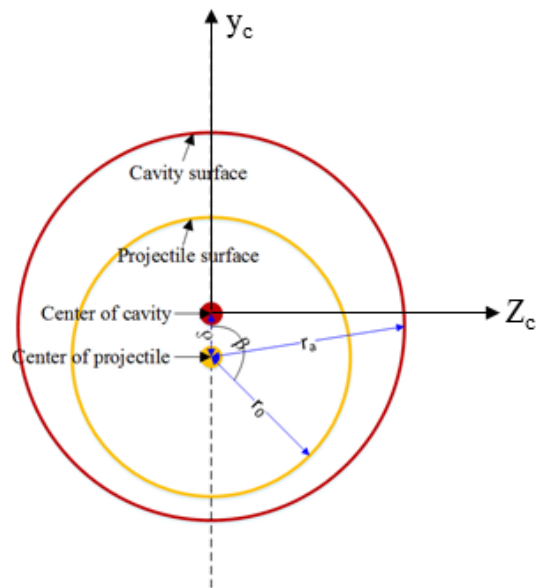


Fig. 5 Parameters to estimate the occurrence of the reattachment

식(15)와 식(16)을 이용해 Fig. 1 탄체의 상면과 하면에 작용하는 합력 및 모멘트 합을 계산하면 식(17) 및 식(18)과 같다.

$$\begin{cases} F_{xwt} = (\psi_{t2} - \psi_{t1}) \int \sigma_n [f'(x_w) - \mu] f(x_w) dx_w \\ F_{ywt} = -(\sin\psi_{t2} - \sin\psi_{t1}) \int \sigma_n [1 + \mu f'(x_w)] f(x_w) dx_w \\ M_t = -(\sin\psi_{t2} - \sin\psi_{t1}) \int \sigma_n [1 + \mu f'(x_w)] x_w f(x_w) dx_w \\ \quad -(\sin\psi_{t2} - \sin\psi_{t1}) \int \sigma_n [f'(x_w) - \mu] f^2(x_w) dx_w \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} F_{xwb} = (\psi_{b2} - \psi_{b1}) \int \sigma_n [f'(x_w) - \mu] f(x_w) dx_w \\ F_{ywb} = (\sin\psi_{b2} - \sin\psi_{b1}) \int \sigma_n [1 + \mu f'(x_w)] f(x_w) dx_w \\ M_b = (\sin\psi_{b2} - \sin\psi_{b1}) \int \sigma_n [1 + \mu f'(x_w)] x_w f(x_w) dx_w \\ \quad + (\sin\psi_{b2} - \sin\psi_{b1}) \int \sigma_n [f'(x_w) - \mu] f^2(x_w) dx_w \end{cases} \quad (18)$$

최종적으로 탄체의 무게 중심에서의 합력과 모멘트 합은 식(19) 및 식(20)과 같다.

$$\begin{cases} F_x = (F_{xwt} + F_{xwb}) \cos\theta + (F_{ywt} + F_{ywb}) \sin\theta \\ F_y = (F_{ywt} + F_{ywb}) \cos\theta - (F_{xwt} + F_{xwb}) \sin\theta \end{cases} \quad (19)$$

$$M = M_t + M_b \quad (20)$$

여기서, θ 는 Fig. 1의 inertial coordinate system(ICS)의 X축과 weapon coordinate system(WCS)의 x_w 축이 이루는 각도이다.

합력과 모멘트 합이 계산되면, 가속도와 각속도는 식(21)을 통해 계산할 수 있다.

$$\begin{cases} dV_x/dt = F_x/m \\ dV_y/dt = F_y/m \\ d\theta/dt = M/I_z \end{cases} \quad (21)$$

여기서, m 은 탄체질량, I_z 는 ICS의 Z축에 대한 일차 관성모멘트이다.

위의 절차는 Fig. 6의 흐름도에 따라 임계속도까지 반복 계산하여 탄체의 침투 궤적을 예측할 수 있다.

3. 실험적 검증

토양에서 탄체의 침투 궤적을 예측하는 모델 개발에 대한 연구도 드물지만, 이를 실험적으로 검증한 연구는 더욱 드물다. 기존 문헌(Forrestal and Luk, 1992)에서는 토양에서 탄체의 침투 궤적을 예측하는 모델을 개발한 후, 실험결과와 비교함으로써 모델의 성능을 확인했다.

본 연구에서도 기존 문헌(Forrestal and Luk, 1992)의 실험결과와 개발한 모델로부터의 해석 결과를 비교함으로써 모델에 대한 검증을 수행한다.

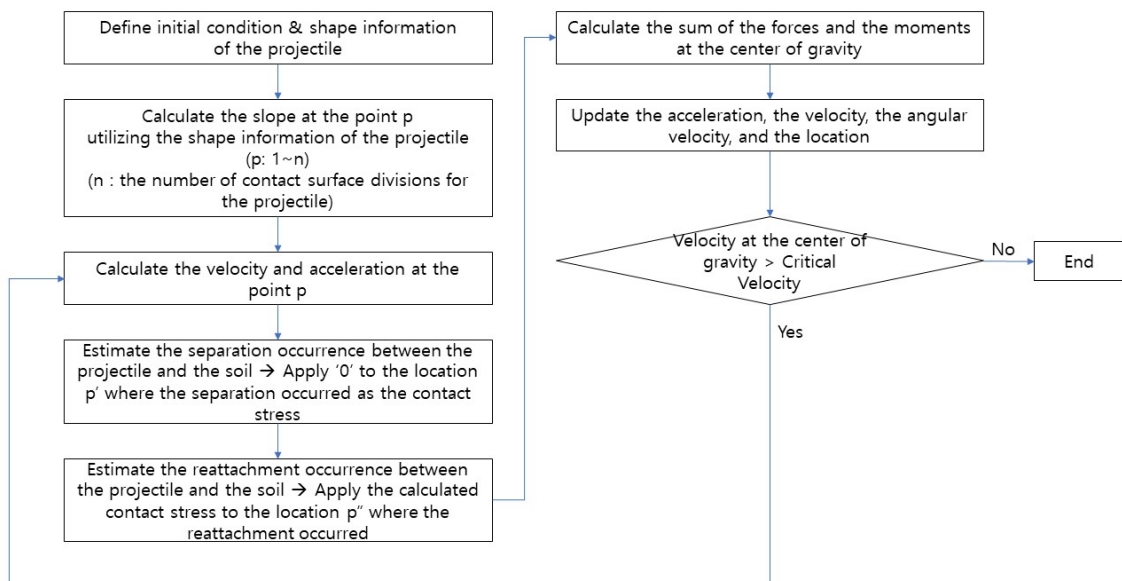


Fig. 6 Flow chart of the proposed penetration model to calculate the projectile trajectory

3.1 수치해석 및 실험에 활용된 탄체 및 토양 정보

본 연구에서는 수치해석을 위해 기존 문헌(Forrestal and Luk, 1992)의 실험에 활용된 탄체 형상 정보, 토양 정보, 초기 조건을 적용했으며 이는 Fig. 7 및 Table 1과 같다. 이때 활용한 변수 정보들은 기존 문헌(Forrestal and Luk, 1992)의 값과 동일하다. 실험은 Nevada주의 Sandia Tonopah Test Range에서 수행됐으며, 세 구역에서 토양을 채취하여 물성을 분석한 후 이를 활용했다(Forrestal and Luk, 1992). Table 1에서 충돌각이란 지면과 직교한 축과 탄체 길이 방향 축(Fig. 4의 x_w 축)이 이루는 각도를 의미한다.

3.2 실험 조건

기존 문헌(Forrestal and Luk, 1992)에서는 총 6회의 실험을 수행했다. 이때의 실험 조건은 Table 2와 같다. 각각의 조건에 대해서 탄체가 토양 표면에 충돌할 시의 형상은 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 Test #1과 #2가 동일한 조건이며, Test #3과 #4가 동일한 조건이다. Test #5와 #6는 탄체의 입사각은 동일하지만, AOA를 다르게 하여 그 영향을 확인하기 위한 실험이다.

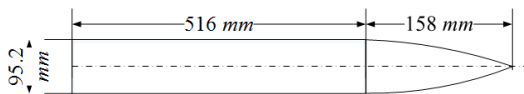


Fig. 7 Projectile geometry(Forrestal and Luk, 1992)

Table 1 Parameters used in numerical simulations

Parameters	Value
Impact velocity(m/s)	refer to Table 2
Impact angle(degree)	refer to Table 2
AOA(degree)	refer to Table 2
Impact angular velocity(rad/s)	0
Soil shear strength(MPa)	10
Soil density(kg/m ³)	1,860
A(resistance coefficient 1)	1.718
B(resistance coefficient 2)	2.215
Soil static friction coefficient	0.2
Soil dynamic friction coefficient	0.06
Projectile density(kg/m ³)	7,850
Moment of inertia(kg·m ²)	1.257
Separation angle(degree)	5

Table 2 Test cases

Test number	Impact velocity(m/s)	Impact angle(degree)	AOA(degree)
#1	280	0	0
#2	280	0	0
#3	278	30	0
#4	280	30	0
#5	280	0	3.5
#6	280	0	4.0

3.3 결과 비교

위의 변수들을 활용해 본 연구에서 개발한 침투해석 모델을 구성한 후, Table 2의 시나리오에 따라 수치해석을 수행했다. 수치해석으로부터 예측된 침투 궤적은 Figs. 9~12와 같고, 실험결과는 Table 3과 같다. 기존 문헌(Forrestal and Luk, 1992)

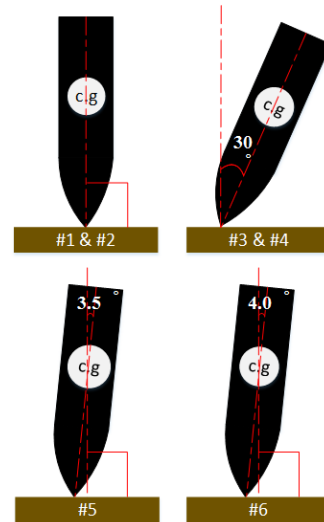


Fig. 8 Geometries for each test case

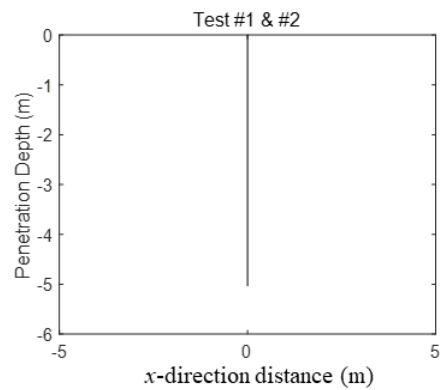


Fig. 9 Simulation result(for Test #1 & #2)

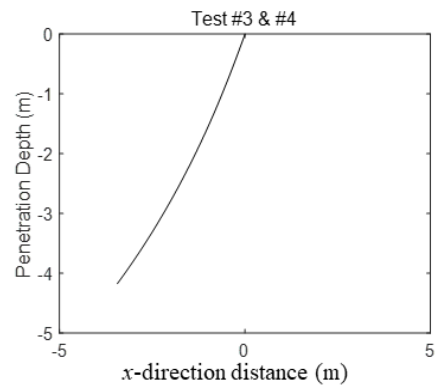


Fig. 10 Simulation result(for Test #3 & #4)

의 실험결과에 대한 침투 깊이는 지표에서 정지 시점의 탄체의 깊이로 정의했으며, 이를 본 해석결과와 비교하였다. Test #1 & #2의 실험 조건은 동일하나, 결과의 차이가 발생하여 이를 평균한 값을 활용해 수치해석과의 비교를 수행하였다.

Test #1과 #2에 대한 수치해석 결과는 침투 깊이가 5.03m 로서 실험결과 대비 수치해석이 약 12% 오차를 나타냈다. Test #3과 #4는 수치해석으로부터 4.18m로 예측됐으며 이는 약 19.3% 오차이다. AOA 차이에 따른 결과는 Test #5와 #6(4.58m, 4.18m)의 비교를 통해 확인할 수 있으며, 이때의 실험 대비 수치해석의 오차는 각각 약 8.8%, 약 13.3%였다. 즉, 평균적으로 약 13.4%의 오차를 나타냈다. 또한, Test #3~#6에 대한 수치해석 결과에서 나타나듯, 개발한 모델은 입사각 또는 AOA에 따

라 발생하는 J-hook 궤적을 모사할 수 있다.

실제 탄체의 토양 침투 실험 시, 토양에 대한 불확실성이 클 뿐만 아니라, 탄체 속도가 감소하면서 토양 동적마찰계수도 달라진다. 이러한 불확실성을 감안할 때 개발한 모델로부터 예측한 침투 궤적이 실제 실험 조건을 잘 모사한다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 토양-탄체 간 분리 및 재접촉을 고려한 IFL 기반 침투해석 모델을 개발하고 이를 기존 문헌의 실험결과 비교하는 연구를 수행하였다.

개발한 모델은 탄체 침투 시 공동(cavity) 발생에 따른 토양과 탄체의 분리 및 재접촉을 고려하여 J-hook 현상을 모사할 수 있다. 즉, 토양과 탄체가 분리가 발생한 탄체의 표면의 접촉응력을 '0'으로 적용함으로써 침투 궤적을 예측할 수 있으며 개발한 모델의 검증에 위해 기존 문헌에서의 실험결과와 비교 연구를 수행했다. 총 6회의 실험 결과와의 비교를 수행했으며, 수치해석으로부터 예측한 탄체의 침투 깊이는 실험대비 약 13.4%의 평균오차를 나타냈다. 또한, AOA가 J-hook 발생의 주요인임을 확인했다.

일반적으로 토양 및 탄체를 모델링하여 유한요소해석을 수행하기 위해서는 많은 노력과 시간이 소요된다. 본 연구를 통해 개발한 침투해석 모델은 유한요소해석에 비해 상대적으로 정밀도는 떨어지지만, 빠른 속도(수 초 이내)로 결과를 예측할 수 있는 장점을 지닌다.

References

Adley, M.D., Berger, R.P., Cargile, J.D., White, H.G., Creighton, D.C. (1997) Three Dimensional Projectile Penetration into Curvilinear Geological/Structural Target, user's Guide for PENCVR3D, U.S. Army Waterways Experiment Station, Instruction Report SL-97-1. MS. USA.

Bernald, R.S., Creighton, D.C. (1979) Projectile Penetration in Soil and Rock: Analysis for Non-Normal Impact, Technical Report SL-79-15. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksbury MS Structures Laboratory. USA.

Danielson, K.T., Adley, M.D. (2000) A Meshless Treatment of Three-Dimensional Penetrator Targets for Parallel Computation, *Comput. Mech.*, 25(2), pp.267~273.

Forrestal, M.J., Luk, V.K. (1992) Penetration into Soil Targets, *Int. J. Impact. Eng.*, 12(3), pp.427~444.

Heuze, F.E. (1990) An Overview of Projectile Penetration into Geological Materials with Emphasis on Rocks, *Int. J. Fock. Mech. Min. Sci. Geomech.*, 27(1), pp.1~14.

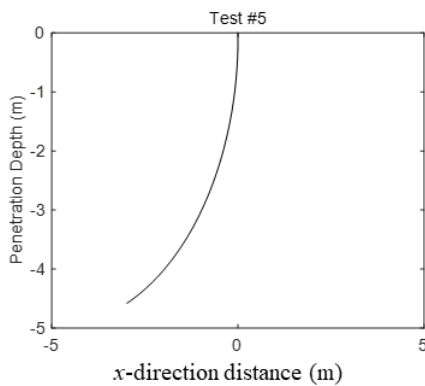


Fig. 11 Simulation result(for Test #5)

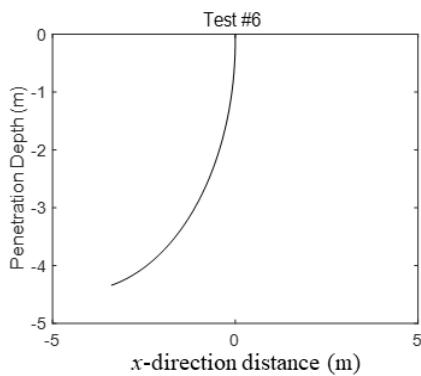


Fig. 12 Simulation result(for Test #6)

Table 3 Test results

Test number	Penetration depth(m) (experimental results)	Penetration depth(m) (numerical simulation results)	Absolute error compared to experimental results(%)
#1	6.48	5.03	22.4
#2	4.98	5.03	1.0
#3	5.18	4.18	19.3
#4	5.18	4.18	19.3
#5	5.02	4.58	8.8
#6	4.82	4.18	13.3

- Kong, X., Fang, Q., Hong, J., Wu, H.** (2014) Numerical Study of the Wake Separation and Reattachment Effect on the Trajectory of a Hard Projectile, *Int. J. Prot. Struct.*, 5(1), pp.97~117.
- Sun, Q., Sun, Y., Liu, Y., Li, R., Zhao, Y.** (2017) Numerical Analysis of the Trajectory Stability and Penetration Ability of Different Lateral-Abnormal Projectiles for Non-Normal Penetration into Soil based on Modified Integrated Force Law Method, *Int. J. Impact Eng.*, 103, pp.159~168.
- Youch, D.** (2006) Efficient Calculation of Earth Penetrating Projectile Trajectories, Naval Postgraduate School, California, USA. Master's Thesis.

요 지

본 연구에서는 토양-탄체 간 분리 및 재접촉을 고려한 IFL 기반 침투해석 기술을 개발하고 이를 기존 문헌의 실험결과와 비교하는 연구를 수행했다. 탄체를 강체로 가정한 후, 토양 내로 침투 시 발생하는 구형공동팽창 현상을 고려함으로써 탄체의 궤적을 예측할 수 있다. 토양에 대한 저항함수는 Mohr-Coulomb 항복 모델을 활용했으며, 입사각 혹은 AOA에 따른 J-hook 현상을 모사할 수 있다. 기존 문헌에서의 실험결과(총 6회)와의 비교 결과, 수치해석으로부터 예측한 탄체의 침투 깊이는 실험대비 약 13.4%의 평균오차를 나타냈다. 일반적으로 탄체의 침투 경로를 예측하기 위해 유한요소법이 널리 활용된다. 하지만, 유한요소법 활용 시, 탄체의 모델링을 위해 많은 시간과 노력이 필요하며, 해석 수행을 위해 수 시간이 소요된다. 본 연구를 통해 개발한 모델을 활용할 시, 탄체의 치수 입력만 필요하며 해석 시간도 수 초 이내이다.

핵심용어 : 침투해석 모델, J-hook, 토양-탄체 간 분리 및 재접촉