

긴 관통자 관통에서 항복 응력의 영향에 대한 연구

황 찬* · 정동택** · 이현주*** · 오수익*

A study on the effect of yield stress in long-rod penetration

Chan Hwang, Dong-Teak Chung, Heon-Joo Lee and Soo-Ik Oh

Key Words : Long-rod penetration, Dynamic yield stress, Element eroding, Lagrangian code

Abstract

This paper presents parametric study of long-rod penetration. Influences of yield stress of penetrator and target material on the penetration results such as crater size and penetrator residual length are contemplated. Numerical experiments are carried out with varying the value of static yield stress of materials. Lagrangian explicit code NET2D was used to perform parametric study. Element eroding algorithm was used to properly simulate long-rod penetration. Analytic and empirical model of long-rod penetration and Taylor test are used to explain the relationships of parameter and simulation results.

기호설명

- P : Penetration depth
- ρ_T : Density of target
- ρ_p : Density of penetrator
- v_0 : Initial velocity of penetrator
- u : Velocity of stagnation point
- Y_T : Yield stress of target
- Y_p : Yield stress of penetrator
- c_0 : Sound speed of target material
- R : Penetration depth
- L : Length of penetrator
- D : Diameter of penetrator

1. 서론

고속 관통 현상을 유한 요소 해석으로 예측하는 데 있어 재료의 물성치가 해석 결과에 미치는 영향을 알아보는 것은 매우 중요한 작업이다. 또한

이러한 작업은 관통 해석 코드 개발에 있어 해석 결과와 일반적인 실험 결과의 경향과 비교를 통해 해석 코드의 유용성을 검토하는데 필요하다.

긴 관통자의 고속 관통 현상에 대해서는 금속 재료의 hydrodynamic 거동에 근거한 이론적 모델들[1]이 제안되었으며 Eulerian 해석 결과에 근거한 결과와 매개 변수 사이의 관계식[2]이 제안되었다.

Taylor 테스트는 재료의 동적 항복 응력을 구할 수 있는 실험[3]이며 표적을 관통할 때의 소진되는 관통자의 거동과 유사성을 가진다.

본 연구에서는 Lagrangian 해석 코드 NET2D 를 사용하여 numerical experiments 를 통해 관통자와 표적의 항복 응력이 관통 해석 결과에 미치는 영향을 확인하였다. NET2D[5,6]는 요소 소진 알고리즘과 변화하는 경계면에 대한 접촉력 처리 기능이 적용되어 안정적인 긴 관통자 관통 해석 성능을 가지고 있다.

2. 배경 이론

2.1 긴 관통자 관통 모델

높은 속도의 관통에서는 일반적으로 재료의 강도보다 훨씬 높은 압력이 발생하여 금속 재료의

* 서울대학교

** 한국기술교육대학교

*** 국방과학연구소

거동이 유체와 비슷해지며 이때는 밀도가 지배적인 매개변수가 된다. Hydrodynamics 의 베르누이 방정식을 금속 재료의 관통에 적용하면 stagnation point 에서 다음과 같은 압력에 대한 평형식이 성립한다고 알려져 있으며 이에 근거한 이론식들이 제안되었다[1].

$$\frac{1}{2} \rho_T u^2 + Y_T = \frac{1}{2} \rho_P (v-u)^2 + Y_P \quad (1)$$

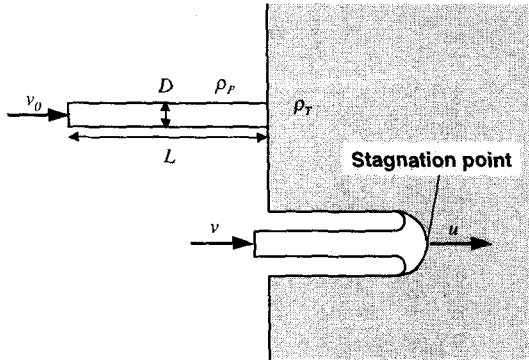


Fig.1 Quasi-stationary flow of rod penetration

또한 관통 결과의 예측을 위해 재료의 특성을 나타내는 변수들과 관통 결과와의 관계식을 구성하기 위해 Eulerian 해석 코드를 사용한 numerical experiment 가 수행되었으며 관통 깊이에 대해서 다음과 같은 관계식이 제안되었다. D^* 는 관통자와 같은 질량을 가지는 구의 직경이며 K , $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 상수이다[2].

$$P/D^* = K (\rho_P / \rho_T)^{\alpha_1} (v_0 / c_0)^{\alpha_2} (Y_T / \rho_T c_0)^{\alpha_3} \quad (2)$$

그러나 이러한 Eulerian 코드에 의한 해석은 Lagrangian 코드에 비해 관통 후 표적에 생긴 crater 너비와 관통자의 남은 길이 등의 관통 후 형상을 확인하는데 어려움이 있다.

2.2 Taylor 테스트

재료의 동적 항복 응력을 구하는 방법으로 원통형의 소재를 강체에 가까운 벽에 충돌시키는 Taylor 테스트가 사용되고 있다. 남은 소재의 형상으로부터 재료의 동적 항복 응력을 구할 수 있다.

강소성 완전 소성 변형을 가정 아래 1 차원 파동 전파를 이용하여 재료의 동적 항복 응력과 변형 후 소재의 형상과의 관계를 나타낸 다음과 같은 식을 유도할 수 있다[3].

$$\sigma_y = \frac{\rho v_0^2 (l_0 - h)}{2 (l_0 - l_1) \ln(l_0/h)} \quad (3)$$

식(3)은 원통형 소재의 항복 응력이 소재의 초기 속도와 밀도 그리고 변형 후 남은 길이로 계산될 수 있음을 보여주며 원통형 소재의 남은 길이와 반비례하는 것을 볼 수 있다.

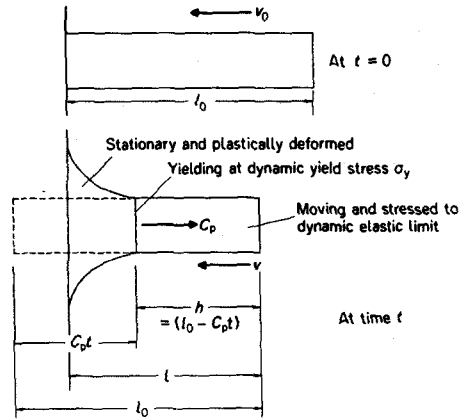


Fig. 2 Taylor cylinder test to estimate dynamic yield stress

관통자가 표적을 관통할 때의 정적상태에서는 관통자 뒷부분의 속도는 거의 초기 속도와 같으며 관통자와 표적의 계면의 속도가 거의 일정하기 때문에 관통자의 동적 항복 응력은 Taylor 테스트에서 유도된 식과 연관 지어 식(4)와 같은 근사식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_y = \frac{\rho (v_0 - u)^2}{2 \ln(L/h)} \quad (4)$$

3. 해석 코드

3.1 개요

관통 해석에 사용된 코드는 4 각형 요소를 사용하는 외연적 2 차원 Lagrangian 해석 코드 NET2D이다. NET2D는 DENA(Defense node algorithm)[4]에 기반을 둔 접촉력 처리 알고리즘을 사용한 코드이며 관통 해석과 같이 심한 변형이 발생하는 문제의 해석을 위해 요소 소진 기능을 가지고 있다.

또한 요소 소진 후 변화하는 경계면에 대한 안정적인 접촉 처리 기능을 가지고 있다.

3.2 접촉력 계산

DENA 는 slave 절점과 master 면과 만나는 지점에 위치하는 가상의 절점을 정의하고 이 절점을 master 면의 역학적인 상태와 등가를 이루도록 하여 절점 대 절점의 접촉력을 계산하는 방법이다. 일반적으로 외연적 해석 코드에서는 시간 증분량이 매우 작으므로 접촉력이 크게 변하지 않는다고 가정하여 연립방정식을 풀지 않는 대신에 이전 시간에서 계산된 접촉력을 사용하여 접촉력을 근사적으로 구하는 방법이다. DENA 는 현재 시간의 접촉력을 계산할 때 현재 시간의 정보와 이전 시간의 접촉력 정보를 모두 사용하기 때문에 다른 접촉 알고리즘에 비해 좀 더 정확한 접촉력 계산이 가능한 알고리즘이다.

3.3 요소 소진 알고리즘

관통 해석에서는 관통자와 표적이 접촉하는 부분에서 국부적으로 심한 변형을 받는 요소가 생기게 되며, 이로 인해 시간 증분량의 크기가 감소하여 해석 시간이 증가하며 요소에서 tangling 등이 발생하여 해석을 중단시키기도 한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 해석 도중 주어진 파괴 조건을 만족하거나 변형이 심하게 발생한 요소를 제거하는 요소 소진 알고리즘을 적용하였다. 등가 소성변형률에 의한 요소 소진 알고리즘을 적용하였으며 소진이 시작되는 값은 관통자와 표적에 모두 210%로 하였다. 요소 소진 알고리즘을 적용할 때 소진 조건으로 쓰인 등가 소성 변형률 값은 일정 값 이상에서는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 못하는 변수이다.

3.4 금속 재료 모델

해석에 사용된 재료 모델은 변형률 속도와 변형률에 의한 경화와 그리고 온도에 의한 연화가 포함된 모델을 사용하였다. 식(5)은 항복 응력식이며 Y_0 는 정적 항복 응력이며 관통자와 표적의 거동 특성을 지배하는 매개변수 중에 하나이다.

$$\frac{\bar{\sigma}}{Y_0} = \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}^p}{\epsilon_0} \right)^n \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_{cr}} \right)^m \exp(-\lambda(T - T_{ref})) \quad (5)$$

4. Numerical Experiment

4.1 관통 해석 문제

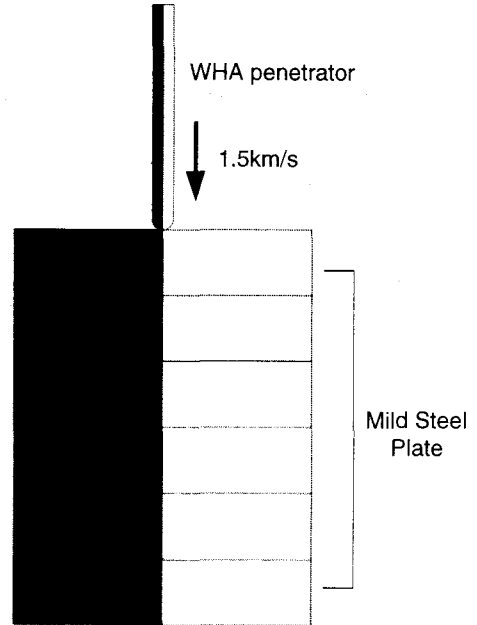


Fig. 3 Schematic of numerical experiments

관통 문제는 적층시킨 mild steel 표적과 WHA(tungsten heavy alloy) 관통자의 수직 관통에 대해 2 차원 축대칭 해석을 수행하였다. 관통자의 직경에 대한 길이의 비는 10.7 이며 초기 속도는 1.5(km/s)로 하였다. 관통자의 초기 속도가 0.5-2(km/s) 범위에서의 관통에서는 hydrodynamic 거동이 나타나면서 재료의 강도 역시 어느 정도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[3].

정적 항복 응력 Y_0 값을 변화시키면서 해석 결과에 미치는 영향을 확인하였다. WHA 와 mild steel 의 재료 모델 입력 값은 실험 데이터에서 구해진 값을 기준 값으로 하였으며 입력 값을 변화시킨 가상의 재료들에 대한 해석을 수행하여 결과들을 비교하였다. WHA 의 정적 항복 응력의 기준 값은 1.205(GPa)이며 mild steel 의 기준 값은 0.258(GPa)이다.

4.2 결과 및 토론

먼저 실험 데이터에 기초한 기준 값을 입력으로

하여 관통 해석을 하였다. 원통형의 crater 가 생기며 관통자 길이에 대한 관통 깊이의 비는 1.267 이며 관통자 직경에 대한 관통자의 남은 길이는 0.5571 이다. 관통 깊이는 실험 데이터 값의 105% 였다.

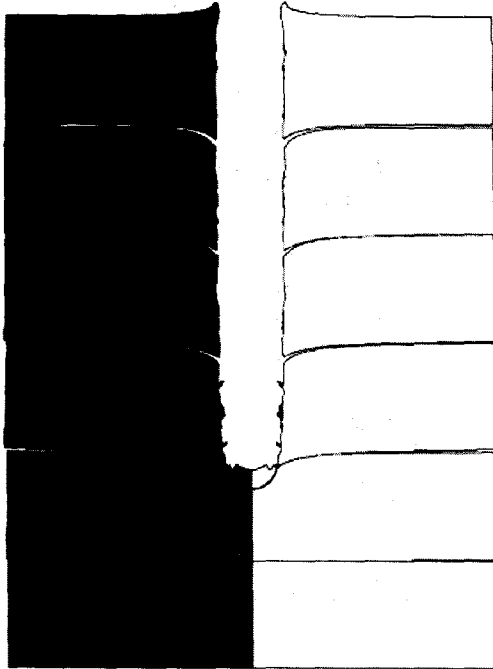


Fig. 4 Deformation shape of reference simulation

WHA 관통자의 항복 응력이 해석 결과에 미치는 영향을 알아 보기위해 0.8(GPa)과 2.4(GPa) 사이의 Y_0 값들에 대해서 해석을 수행하였다.

해석 결과를 보면 관통자의 항복 응력은 기준 값 주위에서 관통 깊이에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 관통자의 항복 응력이 매우 커지게 되면 오히려 관통 깊이가 줄어드는 경향을 보이고 있다.

평균 관통 속도는 항복 응력이 커질수록 줄어드는 경향을 보이는데 hydrodynamics 식(1)의 경향과는 차이가 난다. 초기 속도 1.5(km/s)의 관통에서 발생하는 압력은 식(1)에서 약 3.8(GPa) 정도인데 WHA의 Y_0 는 1.205(GPa)이다. 압력에 비해 관통자의 항복 응력 값이 일정 값 이상 커지게 되면 재료의 유동을 방해하여 오히려 관통 속도와 깊이가 줄어들게 되는 것으로 추측할 수 있다. 일반적으로 관통자의 변형이 거의 없는 강체의 관통에서 오히려 관통 깊이가 줄어드는 것으로 알려져 있다.

Fig. 6 에서 보이듯이 관통자의 남은 길이는 항

복 응력에 비례하는 것으로 나타났다. 관통자의 관통 현상은 Taylor 테스트에서 일정한 속도로 움직이는 벽면에 대한 충돌과 매우 유사하다고 볼 수 있으며 해석 결과의 경향 역시 식(4)을 따르고 있다. Fig. 7 을 보면 관통 깊이는 거의 차이가 없고 관통자의 남은 길이만 차이가 나고 있다.

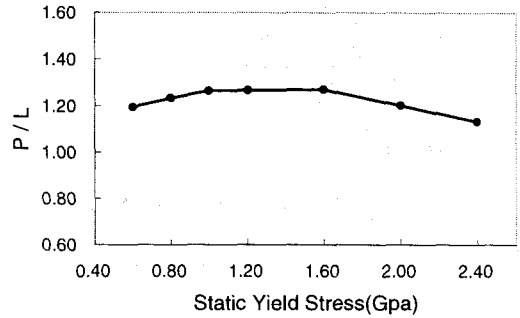


Fig. 5 Normalized penetration depth varying static yield stress of WHA

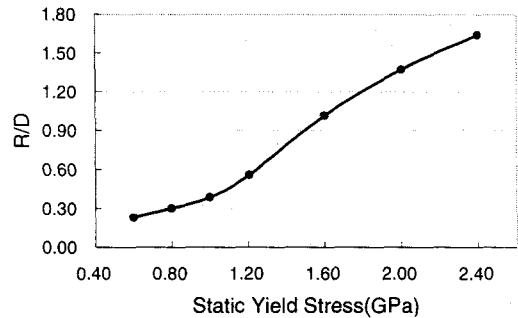
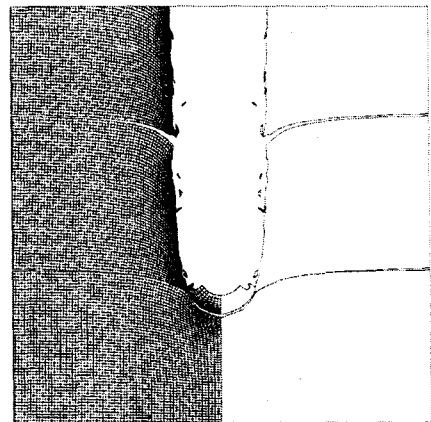
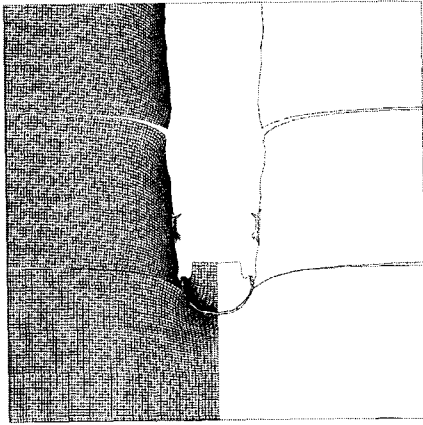


Fig. 6 Normalized residual length of penetrator varying static yield stress of WHA



(a) Static yield stress of WHA = 1.00



(b) Static yield stress of WHA = 1.60

Fig. 7 Deformation shape

다음으로 표적의 항복 응력이 관통 깊이와 관통자의 남은 길이에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 0.20(GPa)에서 0.55(GPa) 사이의 mild steel의 Y_0 값들에 대해 해석을 수행하였다.

표적의 항복 응력은 Fig. 8 에서 나타나듯이 관통 깊이에는 반비례하는 것이 보이며 crater 의 직경에 역시 반비례하는 것으로 나타났다. 일반적으로 관통자의 운동에너지와 crater 의 부피는 비례한다고 알려져 있다[3]. 표적의 항복 응력이 증가하면 표적의 crater 의 단위 부피 당 에너지가 증가하기 때문에 작은 부피의 crater 가 생기게 된다.

그러나 Fig. 9 에서 보이듯이 표적의 항복 응력은 관통자의 남은 길이에 비교적 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Eulerian 해석에 의한 식(2)와 거의 일치한다.

Fig. 10 에서 보면 표적의 항복 응력이 작아지면 crater 가 커지고 남은 관통자의 길이는 거의 같은 것을 알 수 있다.

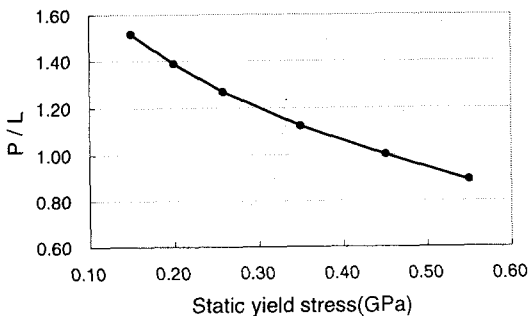


Fig. 8 Normalized penetration depth varying static yield stress of mild steel

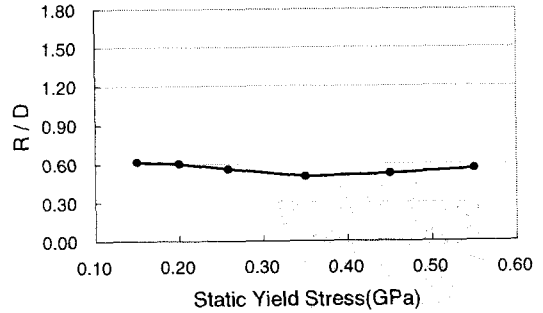
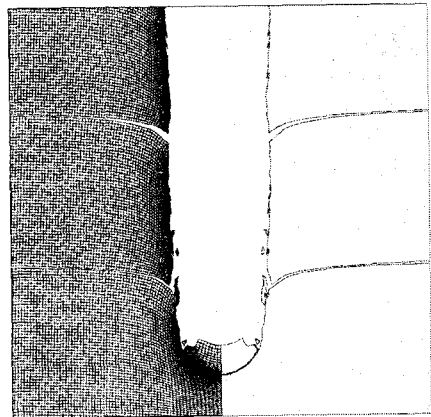
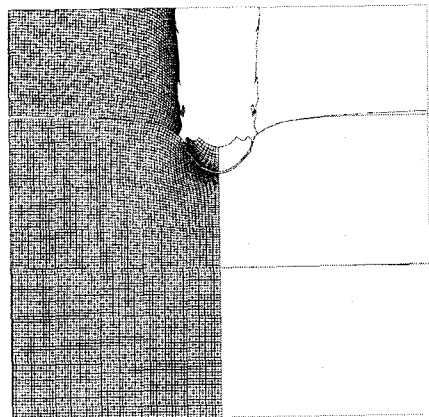


Fig. 9 Normalized residual length of penetrator varying static yield stress of mild steel



(b) Static yield stress of target = 0.20



(b) Static yield stress of target = 0.45

Fig. 10 Deformation shape

5. 결론

적층된 표적에 대한 긴 관통자의 관통에 대해 2

차원 해석을 수행하여 관통자와 표적의 항복 응력이 관통 결과에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 관통자의 항복 응력은 관통 후 남은 길이에 반비례하는 것으로 나타났으며 관통 깊이에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.
- (2) 관통자의 항복 응력이 일정 값 이상 커지게 되면 관통자가 강체에 가까워지기 때문에 오히려 관통 깊이가 줄어드는 것으로 나타났다.
- (3) 표적의 항복 응력은 관통 깊이에 큰 영향을 주며 관통자의 남은 길이에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

위와 같은 해석 결과의 경향을 기존의 이론적, 경험적 모델과 실험 결과의 경향과 비교하여 설명할 수 있었으며 이를 근거로 해석 코드의 유용성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 주관 위탁 연구 과제 (UD980037CD)로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) V. Hohler and A. J. Stilp, Hypervelocity impact of rod projectiles with L/D from 1 to 32, Int. J. Impact Engng Vol. 5, pp. 323-331, 1987.
- (2) W. E. Johson et al., History and application of hydrocodes in hypervelocity impact, Int. J. Impact Engng Vol. 5, pp. 423-439, 1987.
- (3) J. A. Zukas et al., Impact Dynamics, Wiley interscience, 1982.
- (4) Z. H. Zhong, Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems, Oxford University Press, 1993.
- (5) 박동운, 정동택, 오수익, Explicit 유한요소 코드를 위한 접촉 처리 방법 연구. 대한기계학회 96 추계학술대회 논문집.
- (6) 황찬, 정동택, 유요한, 오수익, 2 차원 동적 취성 파괴 해석에 대한 연구, 대한기계학회 99 춘계학술대회 논문집.