

텅스텐 원형 관통자의 관통특성에 관한 연구

조종현* · 이영신*† · 김재훈* · 배용운**

* 충남대학교 기계설계공학과, ** 국방과학연구소

Study on Penetration Characteristics of Tungsten Cylindrical Penetrator

Jong Hyun Jo*, Young Shin Lee*†, Jae Hoon Kim* and Yong Woon Bae**

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

** Agency for Defense Development.

(Received February 20, 2013 ; Revised May 30, 2013 ; Accepted June 13, 2013)

Key Words: Obliquity Angle(경사각도), L/D(기하형상비), Penetration(관통)

초록: 미사일 설계에서는 매우 효율적이며 치명적인 극히 작은 탄두를 필요로 한다. 탄두에서 각 관통자의 관통성과 관통자의 총 개수는 탄두 파괴성능에 영향을 미치는 주요 요인이다. 관통자 L/D의 설계는 탄두의 공간과 중량에 직접적인 관련되어 있다. L과 D는 발사체의 길이와 직경이다. AUTODYN-3D code가 관통자 관통의 영향을 연구하기 위해 사용되었다. 수치해석의 목적은 초기속도, 경사각도, 관통자의 L/D와 같은 다양한 초기 조건 아래 초고속 충격에 의해 생성되는 관통자의 관통특성을 확인하는 것이다. $L/D \leq 4$ 에서의 초기 충격속도 증가는 잔류질량과 잔류속도를 감소시킨다.

Abstract: The design of missile require extremely small warheads that must be highly efficient and lethal. The penetration characteristics of each penetrator and the total number of penetrators on the warhead are obvious key factors that influence warhead lethality. The design of the penetrator shape and size are directly related to the space and weight of the warhead. The design of the penetrator L/D was directly related to the space and weight of the warhead. L and D are the length and the diameter of the projectile, respectively. The AUTODYN-3D code was used to study the effect of penetrator penetration. The objective of numerical analysis was to determine the penetration characteristics of penetrator produced by hypervelocity impacts under different initial conditions such as initial velocity, obliquity angle and L/D of penetrator. The residual velocity and residual mass were decreased with increasing initial impact velocity under $L/D \leq 4$.

1. 서 론

오늘날의 새로운 탄두기술은 탄도 미사일 적재에 대응하여 높은 치사력을 얻기 위해 개발 및 설계 되어야 하고 이는 지상의 모든 치명적인 영향을 줄이며 탄도 미사일의 내부시스템을 모두 파괴할 수 있는 성능을 가지고 있어야 한다.^(1,2)

현재 탄도미사일 요격용으로 부각되는 탄두 개념은 Fig. 1과 같은 관통자 자탄 모듈을 탑재한 탄두이다.^(3,4)

탄두는 다수의 관통자를 포함하며 탄두 주변의

폭발핵에 의해 관통자가 분산되는 방식이다. 이러한 탄두 방식은 특히 미사일과 방어미사일이 직접 타격이 가능한 궤적으로 근접하여, 빗겨 나갈 경우에도 관통자 자탄 모듈의 탄두가 표적지향성으로 폭발하여 미사일 방어를 할 수 있다. 이는 요격이 어려운 자탄 탑재형 탄도탄에 대해서도 뛰어난 효과를 나타내고 있다. 자탄 모듈을 탑재한 탄두의 개념 및 설계 개발을 위하여 기초연구 및 선행 연구로서 탄두에 탑재되는 개별 자탄으로서 불리는 관통자의 관통 성능 연구가 필수적이다.⁽⁵⁻⁷⁾

본 논문은 개별 관통자과 표적체의 종말 조우 조건에서의 관통 효과를 계산하기 위해 범용 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 다양한 기하형상비에 따른 원형 텅스텐 관통자의 고속 관통해석을 수행하고 그 결과로 관통자의 충격 거동 및 관통 후의 상태를 분석하였다. 이는 관통자 자탄의 관

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

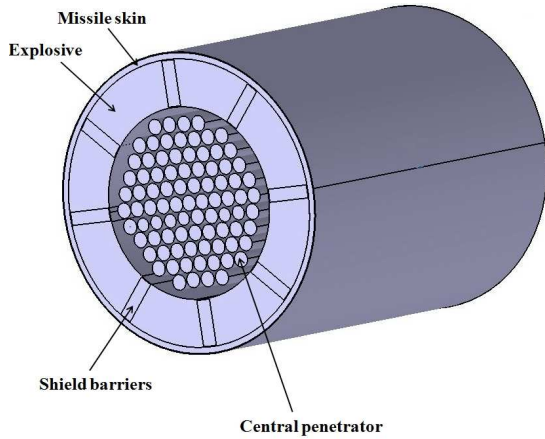


Fig. 1 Description of aimable penetrator warhead⁽⁶⁾

통 성능 연구의 최종 목표인 관통자의 최적설계를 위한 것이다.

2. 고속 관통자 최적화 방법론

최종 탄두에 삽입되는 관통자의 최적설계를 위해서는 다양한 조건에서의 관통자 관통 성능 해석이 이뤄져야 한다. Fig. 2 는 관통자의 최적설계를 하기 위한 간략 절차를 나타내는 것으로 해석 후 결과를 이용하여 관통자의 중량, 길이, 기하형상비를 선정할 수 있다. 따라서 대응 표적에 따라 관통자의 최적설계가 가능하다.

본 연구는 다양한 기하형상비에 따른 고속 관통자 수치해석을 수행하고 결과로서 관통자의 잔류 질량, 잔류속도, 잔류 운동에너지를 고찰하였다. 잔류질량과 잔류속도, 잔류운동에너지가 관통자의 관통특성에 부여되는 의미는 다음과 같이 크게 3 가지로 볼 수 있다.

- 기하형상비에 따른 관통자의 관통특성 판단
- 일정한 표적체에 대한 1 차 관통 후 다음에 오는 2, 3 차 관통 가능여부 확인
- 탄두에 삽입되는 관통자 선정 가능

관통자의 최적설계는 Fig. 3 과 같은 관통자의 구성배열과 관통자의 중량 및 총 개수 등 요구사항에 따라 결정할 수 있다.

관통자의 L/D 와 탄두 내부에 삽입되는 방식은 성공적인 관통자의 최적설계에 필요한 주요 요인이다. 탄두 내부에 삽입되는 원형 관통자의 기본설계는 Fig. 3 과 같이 일정한 탄두 직경(D_w)으로 배열에 따라 구성될 수 있다. Airgap 은 각 관통자의 여섯 측면에 존재하며 더 효율적인 삽입방식에

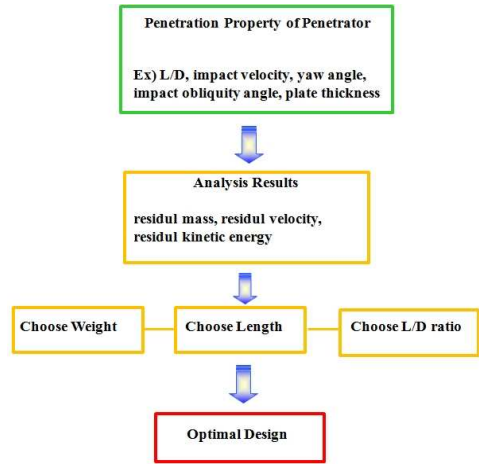


Fig. 2 Flow chart of optimal design for penetrator

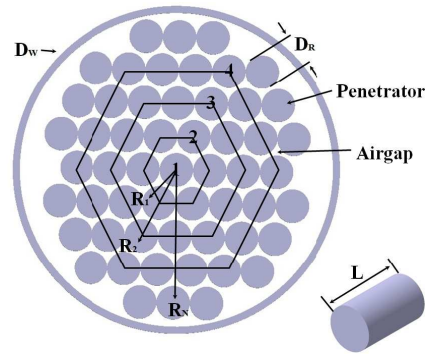


Fig. 3 Concept of cylindrical penetrators of kinetic energy warhead⁽⁵⁾

따라 그 비중을 줄일 수 있을 것이다. 열의 함수로 탄두에 삽입되는 관통자의 총 수를 추정할 수 있으며 이러한 유도는 각 열의 둘레를 기준으로 원형 관통자의 직경으로 나눔으로써 가능하다.

1 열의 관통자의 수는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$N_{R(1)} = 2\pi R_1 / D_r \quad (1)$$

여기서 R₁ 은 탄두의 중심에서 첫 번째 열의 반경이며, D_r 은 관통자의 직경이다. 열의 수가 N 으로 확대 된다면 N 번째 열의 관통자 수에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$N_{R(N)} = \frac{2\pi}{D_r} \left(\frac{D_r}{2} + D_r(N-1) \right) \quad (2)$$

N 번째 열까지의 관통자 총 수에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$N_R \cong \pi N^2 \quad (3)$$

하나의 관통자 질량은 다음 식과 같다.

$$M_R = \frac{\pi}{4} D_R^2 L \rho_R \quad (4)$$

여기서 L 은 관통자의 길이이고 ρ_R 은 재료 밀도이다. 따라서 관통자의 총 코어 중량은 다음과 같이 계산된다.

$$W_T = N_R M_R = \frac{\pi}{4} N^2 D_R^2 L \rho_R \quad (5)$$

이러한 방정식으로 탄두내에 삽입되는 원형관통자의 총 중량과 수를 계산할 수 있다.

예로서 Fig. 4는 602 mm 동일 체적의 탄두 내에 기하형상비와 질량에 따라 다른 관통자의 개수를 보여준다. 단일 관통자의 질량과 기하형상비가 작을수록 각 53, 80, 113 개로 동일체적 내에 많은 수의 관통자를 삽입할 수 있다.

3. 관통자의 관통 해석 방법 및 모델링

고속 관통자의 거동 예측을 위한 관통해석은 다양한 변수에 의해 반복적인 관통해석을 수행해야 한다.

3.1 관통해석 변수 정의

수치해석을 수행하기에 앞서 Fig. 5 와 같이 고속 관통시 고려되는 관통자와 표적체 사이의 해석 변수를 언급할 수 있다.

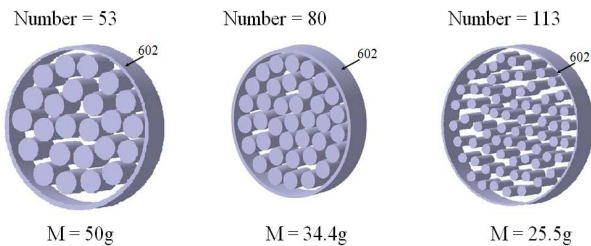


Fig. 4 Various penetrator numbers according to the ratio of L/D in the constant volume warhead

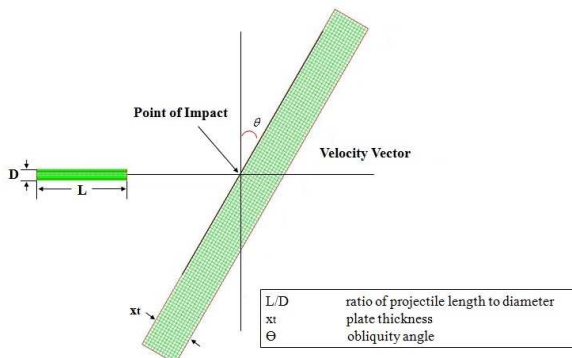


Fig. 5 Definition of strike and spatial orientation angles

Fig. 5 에서 L/D 는 발사체의 길이와 직경으로 표현된 관통자의 기하형상비를 나타내며, 충격경사각 θ , 표적체 두께 t 등 관통자의 관통성능에 영향을 미치는 구성요소가 있다. 관통해석에 영향을 미치는 해석변수를 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 발사체 즉 관통자 측면에서 관통자의 질량, 관통자의 재질, 관통자의 L/D , 관통자의 충격속도 등을 해석 변수로 정할 수 있고 두 번째로 표적체 측면에서 표적체의 두께, 표적체의 재질, 표적체의 경사각 등을 해석 변수로 지정할 수 있다.

본 논문은 관통자의 L/D 값, 충격속도와 표적체의 두께 및 경사각을 해석 변수로 지정하여 수치해석을 수행하였고 해석 결과로 관통자의 잔류속도, 잔류질량 및 운동에너지를 도출 하였다. 발사체로서 총 28 개의 다양한 기하형상비를 갖는 원형 관통자가 시뮬레이션에 적용되었다.

3.2 고속 관통해석방법

Table 1 과 Table 2 는 시뮬레이션 전반에 걸쳐 적용된 관통자와 표적체의 구성 모델과 재료 물성치를 나타낸다. 관통자는 텅스텐 재료가 사용이 되었고 표적체는 Steel-4340 이며 참고문헌에서 인용되었다.^(8,9)

상태방정식(equation of state ; EOS)은 재료의 유체역학적(hydrodynamic) 거동을 묘사하는 식으로 압력, 밀도, 내부에너지의 관계를 기술한다. 충돌조건에 따른 재료거동현상에 따라 Shock 상태방정식, Tillotson 상태방정식, Puff 상태방정식, SESAME 상태방정식 등이 사용되며 본 연구에서는 충격파(shock wave)효과를 고려한 Shock 상태방정식이 사용되었다. 식 (6)과 같이 압력과 밀도 및 내부에너지의 관계를 나타내는 식으로서 실험적, 이론적으로 다양하게 개발되었다.

$$p(v, e) = p_H - \frac{\Gamma(v)}{v} (e - e_H) \quad (6)$$

여기서, p_H 와 e_H 는 각각 기준압력, 기준 에너지로 식 (7), 식 (8)과 같이 표현된다.

$$p_H = p_0 + \rho_0 c_0^2 \frac{\eta}{(1 - S\eta)} \quad (7)$$

$$e_H = e_0 + \frac{\eta}{\rho_0} p_H - \frac{\eta^2}{2} \frac{c_0^2}{(1 - S\eta)^2} \quad (8)$$

여기서 Γ 는 Gruneisen Gamma, $\Gamma = v \left(\frac{\partial p}{\partial e} \right)_v$ 이고 S 는 충격파 속도(μ_s)를 물질의 음속(c_0)과 물질

의 속도(μ_1)에 대해 $\mu_s = c_0 + S\mu_1$ 과 같이 선형근사 할 때 사용되는 선형비례상수이다. η 는 압축률을 의미한다.⁽¹⁰⁾

비교적 작은 압력이 발생하는 경우에는 선형 상태방정식을 사용하고 금속재료의 변형해석에는 주로 Mie-Grueisen 상태방정식을 사용한다. 본 논문은 Hugoniot 의 응용과 함께 Mie-Gruneisen 기반의 Shock 상태방정식이 사용되었다.

본 논문은 관통자의 충격거동에 의해 생성되는 파편해석을 위해 동적파편의 해석적 모델을 기준으로 FLS(flaw-limited spall)이론을 기반으로한 추계학적(stochastic) 파괴기준을 사용하여 관통 시 발생하는 파편을 현실적으로 구현하였다. 이는 다양한 충격속도 및 충격각도에 따른 관통후 관통자의 파편 질량을 예측하기 위한 해석적 방법이다. 추계학적 파괴기준은 Fig. 6 과 같이 실제 재료는 파괴와 균열을 야기시키는 미세한 결함(weak points)을 보유하고 있다는 가정아래 Mott 의 통계적 분포를 바탕으로 재료의 파괴 응력 또는 파괴 변형율을 임의로 추출하여 수치적으로 파괴 확률로서 구현하는 기법이다.⁽⁹⁾ Fig. 6(a)는 Steel plate 표적체의 weak points 를 나타내며 Fig. 6(b)는 파괴 응력값에 따른 파괴 확률이다. 10 의 파괴 확률값을 갖는 것이 Steel-4340 표적체이며 5, 2.5 의 파괴 확률값을 갖는 재료는 Steel-4340 의 강도보다 낮은 재료이다. 파괴 확률값은 재료의 실험과 해석을 통해 비교 고찰해서 얻어지는 값으로 참고문헌[11]에 따라 결정되었다.

표적체 Steel-4340 재료의 주 파괴응력값은 720 MPa 이다.^(12,13)

본 연구에서 수행된 충격거동은 AUTODYN-3D 의 절점탈락기능(erosion)을 사용하여 구현되었다. 절점탈락기능이란 하나의 요소가 충격에 의해 변형이 발생될 때 그 변형율이 변형 한계에 도달하면 삭제되어 해석을 계속 진행할 수 있도록 하는 기능이다.⁽⁹⁾ 또한 본 논문은 Lagrange, ALE, Shell, Beam 및 비정렬 격자체의 충격해석을 구현하기 위해 적용되는 접촉 알고리즘을 사용하였다. 구체적으로 External Gap 으로 요소의 선형 및 각운동량을 보존하는 알고리즘이다. Fig. 7 은 요소 사이의 Gap 크기를 보여주며 녹색으로 표시되어있는 부분이 요소표면구간의 접촉감지영역으로 각 요소의 Gap 이다. 이러한 모든 접촉감지영역의 노드는 관통의 깊이에 비례하여 가해지는 힘에 의해 격퇴되는 원리로 충격해석을 수행한다. Gap 의 크기는 요소간의 상호작용에 관련된 부분으로 가장 작은 요소면의 1/10 에서 1/2 의 범위에 있어야 한다. 본 논문의 시뮬레이션은 150 %의 절점탈락

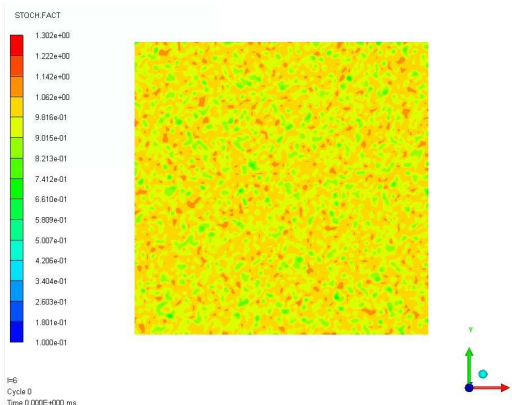
기능 값을 설정하였고 발사체와 표적체의 상호작용 Gap 크기는 0.044 mm 이다.

Table 1 Material constitutive model in simulation

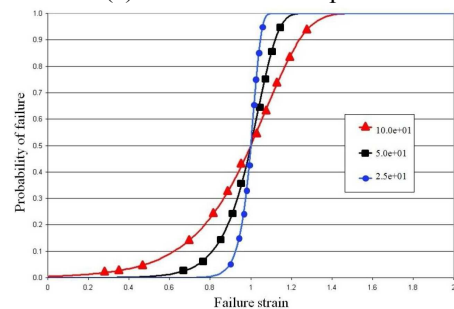
Structure	EOS	Strengthen	Failure model
Penetrator	Shock	Von-Mises	Hydro
Steel plate	Linear	Johnson-Cook	Principal stress

Table 2 Physical properties for materials

	Penetrator	Steel plate
Material	Tungsten	Steel-4340
Density[g/cm ³]	19.29	7.83
Bulk Modulus[GPa]	310	167.4
Shear Modulus[GPa]	160	81.8
Principal Tensile Failure Stress[GPa]	-	0.72



(a) Stochastic weak spot



(b) Material stress-damage probability

Fig. 6 Stochastic weak spot addition in steel plate and material stress-damage probability curves

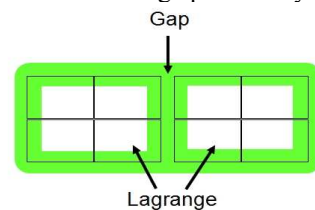


Fig. 7 The contact detection zone of a surface segment

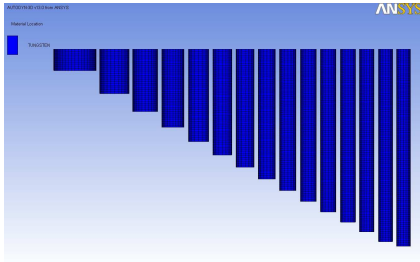


Fig. 8 Used penetrator sizes and shapes

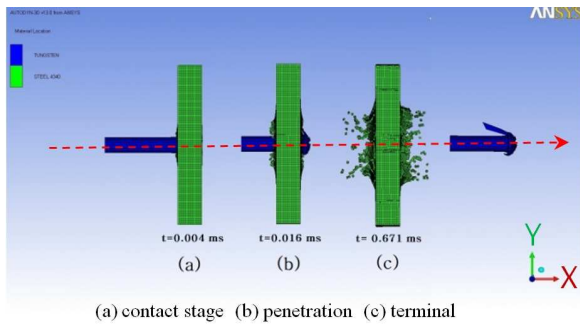


Fig. 9 Evolution procedure of the penetrator under impact velocity 1500 m/s

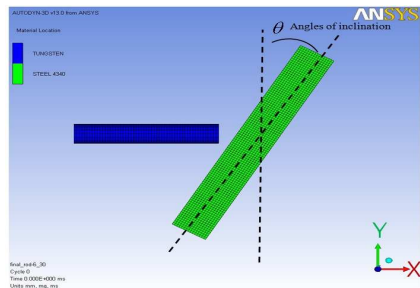


Fig. 10 Angle of inclination for cylindrical penetrator

Fig. 8 은 0.5 ~ 14 까지의 기하형상비를 갖는 총 28 개의 원형 관통자 모델링 중 일부를 나타낸 것이다. 이들 원형 관통자는 72 g 으로 동일한 중량을 갖는다.

4. 관통해석 결과 및 고찰

고속 관통자의 전체적인 관통과정은 Fig. 9 와 같다. 각 관통자는 X 축 방향으로 관통이 수행되며 각 시간에 따라 총 3 단계로 관통과정을 나타낼 수 있다. 관통자가 표적체에 접촉하는 부분(Fig. 9(a))과 표적체를 관통하는 과정(Fig. 9(b)), 끝으로 관통 후 관통자가 표적체를 빠져나가는 부분(Fig. 9(c))이다. 이러한 관통과정은 시뮬레이션 전반에 걸쳐 보여진다. 각 관통자의 잔류속도, 잔류질량, 잔류운동에너지는 관통자가 표적체를 완전관통후 측정하였다. 잔류속도는 관통후 관통자가 갖고 있

는 속도로 정의하였다. 경사각에 따른 관통해석의 경우 Fig. 10 과 같이 표적체의 경사각을 변경함으로써 해석을 수행하였다. 따라서 관통자의 수직성분의 변화는 없으며 관통후 수직충돌과 같이 각 관통자의 해석결과를 도출하였다.

4.1 충격속도에 따른 해석결과

관통자가 1500, 2000, 2500 m/s 의 충격속도를 가질 때 L/D 에 따른 수치해석이 수행되었으며 잔류질량, 속도, 운동에너지를 Fig. 11 에 각각의 선도로 나타내었다. 초기질량이 72 g 인 관통자는 관통후 질량이 감소한다. 이는 관통거동에 의해 관통자의 질량 일부가 파편으로 균열 및 파열되어 부서지기 때문이다. 하지만 여러 L/D 값에 따른 관통자의 잔류질량은 상대적으로 다른 해석결과를 보인다. 예를 들어 L/D 가 1.5 인 관통자는 충격속도 1500 m/s 일 때 잔류질량은 61.9 g 으로 14% 감소하였고, 충격속도 2500 m/s 일 때는 39.3 g 으로 45.5 % 감소하였다. L/D 가 10.5 일 경우 속도 1500 m/s 에서 67.3 g 으로 6.6 % 감소하였고 2500 m/s 일 때는 63.1 g 으로 12.4 % 감소하였다. 관통자는 L/D 값이 증가함에 따라 잔류질량이 상대적으로 크게 증가함을 보였다. 잔류질량의 증가는 관통자의 잔류운동에너지에 영향을 미치는 인자이며 이는 다음에 오는 2, 3 차 관통여부와도 관계가 깊다. 또한 L/D 값이 증가함에 따라 관통자의 잔류속도가 상대적으로 크게 유지되는 결과를 보인다. 예를 들어 L/D 가 1.5 의 관통자일 경우 충격속도 1500 m/s 일 때 잔류속도는 1216 m/s 로 284 m/s 감소하였고, 충격속도 2500 m/s 일 때는 2136 m/s 으로 364 m/s 감소한다.

L/D 가 10.5 인 관통자의 경우 1500 m/s 일 때 1442 m/s 으로 58 m/s 감소하였고 2500 m/s 일 때는 2429 m/s 으로 71 m/s 감소하였다. L/D 의 값이 증가함에 따라 관통후 초기 충격속도의 감소가 상대적으로 크게 작음을 보였다. 속도의 제곱에 비례하는 운동에너지를 고려한다면 이러한 결과는 L/D 의 값이 증가함에 따라 관통자의 관통성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 이렇듯 L/D 의 값에 따라 관통성능을 평가할 수 있었다. Fig. 11 의 수치해석결과와 같이 3 개의 선도에서 볼 수 있는 공통된 관통특성은 L/D 의 값이 3 까지 선형적으로 결과값이 증가함을 보인다는 것이다. Fig. 11(a)에서 잔류질량은 L/D 의 값이 3 까지는 급격히 증가함을 보이며 그 이후의 값에서는 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. Fig. 11(b)에서 잔류속도는 L/D 의 값이 2.5 까지 급격히 증가함을 보이며 그 후 일정하게

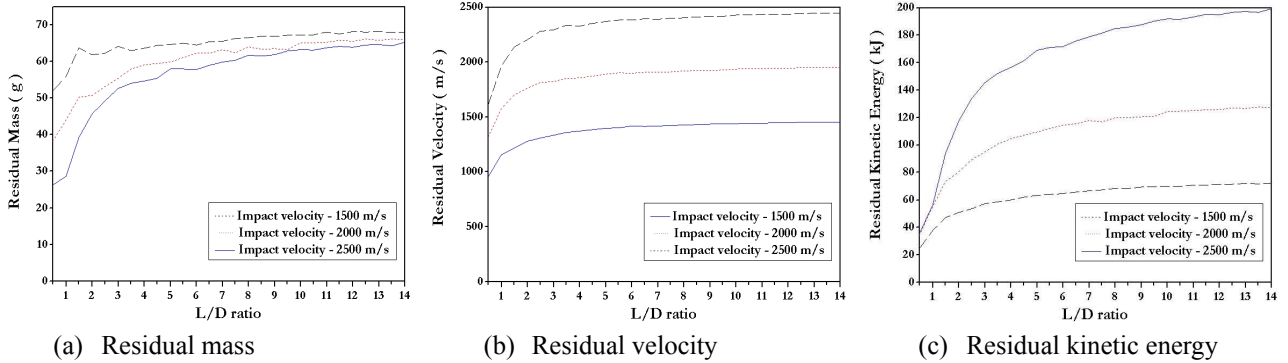


Fig. 11 Results of residual mass, velocity and kinetic energy under various ratio of L/D with different initial velocity

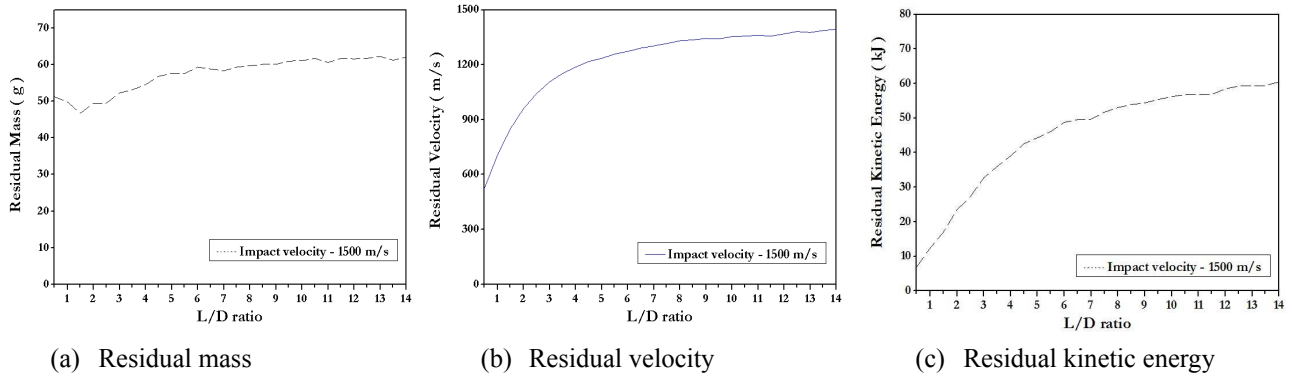


Fig. 12 Results of residual mass, velocity and kinetic energy under various ratio of L/D for 60 mm thickness plate

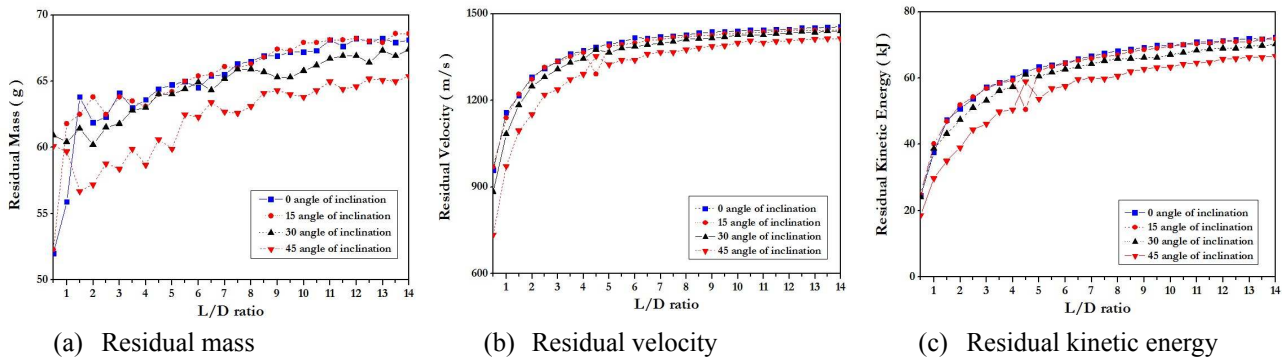


Fig. 13 Results of residual mass, velocity and kinetic energy under various ratio of L/D with different obliquity angle

유지됨을 또한 볼 수 있다.

4.2 표적체 두께에 따른 해석결과

관통자는 1500 m/s의 동일한 충격속도로 60 mm의 표적체 두께에 L/D 값에 따라 시뮬레이션이 수행되었다. Fig. 12의 해석결과는 전반적으로 앞서 30 mm의 표적체 두께에 수행된 해석결과와 동일한 경향을 보였다. 수행된 30 mm 표적체 두께의 충격거동 결과와 비교하여 L/D의 값이 증가함에 따라 잔류질량, 속도, 운동에너지 등 관통자의 관통성을 평가할 수 있었다.

예를 들어 L/D가 1.5의 관통자일 경우 30 mm의 표적체 두께일 때 잔류 질량은 61.9 g으로 14% 감소하였고 60 mm의 표적체 두께일 때는 46.7 g으로 35.2% 감소하였다. L/D가 10.5의 관통자의 경우 30 mm의 표적체 두께일 때 67.3 g으로 6.6% 감소하였고 60 mm의 표적체 두께일 때는 61.8 g으로 14.2% 감소하였다. 결과는 관통 후 표적체 두께에 관계없이 관통자는 L/D의 값이 증가함에 따라 잔류질량이 증가함을 보였다. 30 mm에서 60 mm로 표적체 두께의 증가는 관통자의 잔류질량을 감소시키는 동일한 경향이 보이지만 그 감소율은 L/D 값에 따라 그 격차가 상대

적으로 컸다.

4.3 충격 경사각에 따른 해석결과

관통자는 1500 m/s 의 동일한 충격속도로 L/D 의 값과 경사각에 따라 시뮬레이션이 또한 수행되었다. 관통자는 전반적으로 경사각의 증가함에 따라 잔류 질량이 미세하게 감소함을 보인다. 이는 관통거동 중 관통자와 표적체의 충돌영역의 증가로 인해 파편으로서 균열 및 파열되어 부서지는 질량이 증가하기 때문이다. 하지만 각 L/D 값에 따른 관통자의 잔류질량은 상대적으로 다른 해석결과를 보인다(Fig. 13).

예를 들어 L/D 가 1.5 의 관통자일 경우 경사각이 15°, 30°, 45° 일 때 잔류질량은 각각 62.5 g, 61.4 g, 56.7 g 으로 감소하였고 L/D 가 10.5 의 관통자의 경우 경사각이 15°, 30°, 45° 일 때 잔류질량은 각각 67.9 g, 66.2 g, 64.3 g 으로 감소하였다. 이는 관통자가 표적체를 수직 관통할 때 L/D=1.5 의 관통자는 61.9 g, L/D=10.5 의 경우 67.3 g 으로 경사각 충격에 따른 잔류질량이 더 감소함을 알 수 있다. 이러한 경사각에 따른 해석결과는 동일한 질량의 관통자가 L/D 의 값이 증가됨에 따라 잔류질량이 상대적으로 크게 증가함을 보였다.

잔류속도는 앞서 수직으로 관통해석을 수행한 결과와 동일하게 L/D 값이 증가함에 따라 관통자의 잔류속도가 상대적으로 크게 남아있는 결과를 보인다. L/D 의 값이 증가함에 따라 관통후 초기 충격속도의 감소가 상대적으로 크게 작음을 보였다. 이러한 결과는 L/D 의 값이 증가함에 따라 경사각의 여부와 무관하게 관통자의 관통성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 Lee 의 해석결과에서도 알 수 있다.⁽¹⁴⁾ 그는 고정 또는 이동하는 경사판에서 L/D 에 따른 관통자의 관통성능을 연구하였다. 1.8 km/s 와 2.2 km/s 의 초기속도에서 L/D=1 인 단일형 관통자와 단일형 관통자를 5 개로 분절된 분절형 관통자로 해석을 수행하였다. 그 결과는 Table 3 에 보여진다. 여기서 P/L(ratio of penetration depth to penetrator length)은 관통 성능이다. 5 개로 분절된 관통자보다 단일형 관통자가 각 초기속도에 따른 관통성능이 우수한 것을 알 수 있다. 분명 분절형 관통자는 동일한 길이인 단일형 관통자의 관통 성능

Table 3 Simulation results for normal impact into thick targets⁽¹⁴⁾

Projectiles	L/D=1		5 of L/D=1	
Velocity(km/s)	1.8	2.2	1.8	2.2
P/L	1.85	2.15	1.36	1.65

을 증가할 수 없다는 것이다. 이러한 경향은 Charters 의 L/D=5 인 관통자의 관통성능 실험과 동일한 결과이다.⁽¹⁵⁾

4.4 관통성능고찰

L/D 의 값에 따른 관통성능은 관통자의 후미에 그 특성이 잘 나타나있다. Fig. 14 는 2 ~ 6 의 L/D 를 갖는 관통자로 1500 m/s 의 충격속도에서 관통 해석에 따른 후미 측면의 잔류속도이다. 잔류속도 해석결과에서 진동이 발생하는 이유는 실제 관통자의 damping 의 영향을 무시한 결과이다. 특히 기하형상비가 작아질수록 이 현상은 더욱 크게 나타난다. 관통후 이러한 수치적 변동은 수렴된다. L/D 가 2 일 경우 1280 m/s 로 가장 작은 잔류속도가 발생하였으며 L/D 가 6 인 관통자와는 약 160 m/s 의 격차를 보인다. 각 관통자의 잔류속도 격차가 4 이상의 L/D 에서 점차 감소함을 알 수 있다. 관통자의 후미는 일정한 표적체에 대한 1 차 관통 후 다음에 오는 2, 3 차 관통 가능여부에 미치는 중요한 인자이기 때문에 관통과정 중 후미 측면의 잔류속도가 최대한 존재해야 한다.

Fig. 15 는 1500 m/s 의 충격속도로 각 관통자의 후

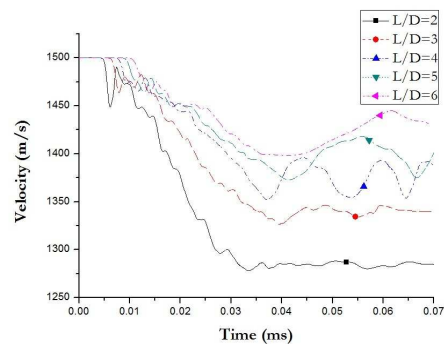


Fig. 14 Comparison of residual velocity of penetrator with different L/D at 1500 m/s

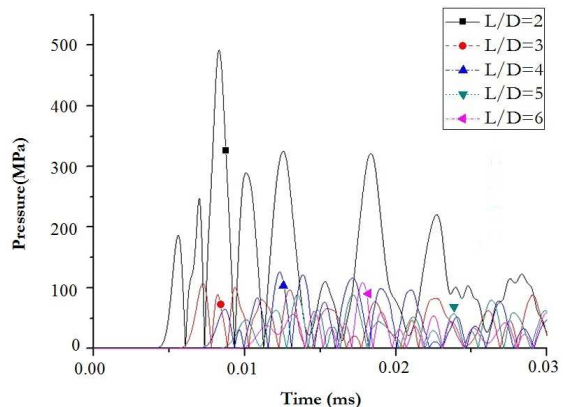


Fig. 15 Result of impact pressure with different L/D of penetrator at 1500 m/s

미 측면에서 측정된 충격압력 데이터이다. 충격압력은 관통시 관통자와 표적체 사이의 접촉계면에서 발생하는 접촉압력과 같은 의미이다. 관통자와 표적체 사이의 충격거동에서 발생하는 충격압력은 특정 단순화된 조건에서 물리적 모델로 설명될 수 있다. 충격에 의해 생성된 두 충격파는 약한 것으로 간주되며 이는 충격속도가 재료의 음속보다 작다는 것을 의미한다. 이러한 가정에서 Recht 와 Ipson 의 모델은 충격거동 과정 중 압력 상승의 필수적인 물리적 방정식을 도출하였다.⁽¹⁵⁾ 방정식의 자세한 유도는 참고문헌[17,18]에서 찾을 수 있다. 표적체에 관통하는 관통자의 충격은 높은 온도와 thin fluid zone 을 야기시키는 관통자와 표적체 사이의 경계영역에서 높은 압력 P 를 생산한다. 관통자와 표적체는 비압축성으로 가정되며 충격거동은 강체와 소성으로 정의된다. 또한 그것은 관통자의 압력 파동이 압력과 지속시간에 의해 정의된 직사각형처럼 형성된 것으로 추정되고 있다. 충격압력 P 는 운동량 보존에서 유추할 수 있다. 참고문헌[17,18]에 따라 압력 P 에 대한 방정식은 다음 식 (9)와 같다.

$$P = v_0 \frac{\rho_p U_{p'} \rho_T U_T}{\rho_p U_{p'} + \rho_T U_T}$$

ρ : density
 U : shock velocity
 v_0 : impact velocity
 p' : penetrator
 T : target

Fig. 15 의 압력 데이터는 각 관통자 후미 측면의 특정 노드에서 추출한 압력 P 에 대한 해석결과이다. 관통과정 중 발생하는 최대압력은 0.49 GPa 으로 L/D 가 2 일 때 발생하였다. 반면 L/D 가 3 이상에서는 약 0.1 GPa 으로 후미 측면에 발생하는 최대 압력이 감소하였다. 또한 L/D 가 증가함에 따라 일정한 압력구간으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 충격의 시작부분에 영향을 받는 유일한 영역인 관통자와 표적체 사이의 접촉구간인 경계면에 의해 발생한다. 충돌시 경계면의 증가는 관통자에 최대압력을 동반한 진동충격을 유발시키며 따라서 잔류속도, 질량, 운동에너지 뿐만 아니라 관통후 관통자의 건전성을 위협하는 악영향을 미친다.

원형관통자는 기하형상비가 4 이상에서 관통성능이 향상되었으며 관통자의 기하형상비로 선택할

Table 4 Results of warhead diameter for same penetrator number

L/D	D _R [mm]	D _W [mm]	N _R
2	13.503	67.515	28
3	11.796	58.980	
4	10.717	53.585	
5	9.949	49.745	
6	9.362	46.810	

수 있다. 관통자의 열이 4 개일 경우 식 (2)에 의해 계산된 총 개수는 28 개이다. 28 개일 경우 기하형상비에 따른 각 관통자의 직경(D_R)과 탄두 직경(D_W)은 Table 4 에 보여진다. 동일한 관통자의 개수일 경우, L/D 에 따라 요구되는 탄두 직경이 다를 수 있고 따라서 관통자 자탄을 탑재한 탄두 설계시 위의 사항을 고려해야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 고속 관통자의 관통거동을 수치 해석으로 구현하여 관통거동에 의해 생성되는 잔류질량, 잔류속도, 잔류운동에너지를 도출하였으며 원형 관통자의 관통성능을 해석하였다.

- (1) 초기 질량이 72g 인 관통자에서 L/D 의 값이 증가함에 따라 전반적으로 잔류질량, 잔류속도, 잔류운동에너지는 크게 증가하였다.
- (2) L/D ≤ 4 에서의 초기 충격속도 증가는 잔류 질량을 감소시킨다.
- (3) L/D 에 따른 잔류 운동에너지의 격차는 최대 약 6 배의 차이가 발생하였으며 표적체의 두께 증가는 그 격차를 더욱더 증가시킨다.
- (4) 충격 경사각의 증가는 잔류질량 및 잔류속도의 감소를 야기한다. 이는 관통거동 중 관통자와 표적체의 충돌영역의 증가로 인해 파편으로 균열 및 파열되어 부서지는 질량이 증가하고 따라서 잔류속도가 감소하기 때문이다. 각 특정 경사각에 따른 잔류결과는 수직 관통해석과 동일하게 L/D 의 값이 증가함에 따라 증가하였다.
- (5) 관통자의 후미 측면에서 발생한 최대 압력은 0.49 GPa 으로 L/D =2 에서 발생하였다. L/D ≤ 4 에서 충돌 시 관통자의 건전성에 영향을 미치는 최대 압력을 동반한 진동 충격을 유발시킨다.

참고문헌

(1) 1963, "The Resistance of Various Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments," Ballistic Analysis Laboratory, Johns-Hopkins University, Baltimore, MD, BAL, THOR TR No. 51, Confidential.

- (2) Wollmann, E., Hoog, K., Koerber, G. and Wellige, B., 1996, "Performance of Ballistic Terminal Performance at Incidence," Institut Franco-Allemand De Recherches De Daint-Louis, Deutsh-Franzoisches Forschung Instut Saint Louis, ISL, RI 10/96.
- (3) Kim, Y.H., 2010, "Ballistic Missile Defense System : Its Current Status and South Korea's Policy Choice," *The Korean Journal of International Relations*, Vol. 50, No. 5, pp. 151~164.
- (4) Park, J.S., Kang, H.G., Park, D.Y. and Yun, T.G., 2012, "Near Miss Warhead Developments Status for International Ballistic Missile Defense," *Proceedings of 2012 conference of the KIMST*, pp. 1766~1769.
- (5) Lloyd, R.M., 1998, "Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA Book, Vol. 179.
- (6) Lloyd, R.M., 2001, "Physics of Direct Hit and Near Miss Warhead Technology," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA Book, Vol. 194.
- (7) Paulus, G., 2004, "Geschoss mit Erhohter Lateralwirkung (PELE). Eine Theorie der Lateralwirkung Beim Durchschlag Einer Dunnen Platte," ISL—Report R 115/2004.
- (8) Zukas, J.A., 1990, editor. *High Velocity Impact Dynamics*. New York: Wiley.
- (9) WWW1.ANSYS.COM, 2011, "ANSYS/AUTODYN-3D," 12.1 User's Manual, Material Models Chapter.
- (10) Kang, P., Im, C.K., Youn, S.K., Lim, J.H. and Hwang, D.S., 2012, "A Study on the Damage of Satellite caused by Hypervelocity Impact with Orbital Debris," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 40, No. 7, pp. 555~563.
- (11) Jiang J.-w., Zhang, M., Men, J.-b. and Wang S.-y., 2011, "Study on Fragmentation of PELE against Thin Targets," *Journal of Beijing Institute of Technology*, Vol.20, No, pp. 168~172.
- (12) Jo, J.H. and Lee, Y.S., 2012, "Numerical Simulation of Failure Mechanism of PELE Perforating Thin Target Plates," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.36, No.12, pp. 501~508.
- (13) Jo, J.H., Lee, Y.S. and Jin, H.L., 2012, "Numerical Simulation of Steel/Kevlar Hydrid Composite Helmet Subjected to Ballistic Impact," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.36, No.12, pp. 722~729.
- (14) Lee, M., 2001, "A Numerical Comparison of the Ballistic Performance of Unitary and Segmented-Rods Against Stationary and Moving Oblique Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.26, No. 1-10, pp. 399~407.
- (15) Charters, A.C., Menna, T.L. and Piekutowski, A.J., 1990, "Penetration Dynamics of Rods from Direct Ballistic Tests of Advanced Armor Components at 2-3 km/s," *International Journal of Impact Engineering* Vol.10, pp. 93~106.
- (16) Recht, R.F. and Ipson, T.W., 1963, "Ballistic Perforation Dynamics," *Trans of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol.30, No 3, pp. 384~390.
- (17) Paulus, G., 2004, "Geschoss Mit Erhohter Lateralwirkung (PELE). Eine Theorie der Lateralwirkung Beim Durchschlag Einer Dunnen Platte," ISL—Report R 115/2004.
- (18) Zukas, J.A., 1990, editor. *High Velocity Impact Dynamics*. New York: Wiley.