

다층 강재 방호판의 초고속 충격 파괴거동해석

조종현* · 이영신*† · 김재훈* · 배용운**

* 충남대학교 기계설계공학과, ** 국방과학연구소

Analysis of Hypervelocity Impact Fracture Behavior of Multiple Bumper Steel Plates

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 December 27, 2012 ; Revised March 14, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

Key Words: Penetrator (관통자), L/D (기하형상비)

초록: 새로운 탄두 기술은 탄도 미사일 적재로부터 높은 파괴성능을 얻기 위해 설계 및 개발 되어왔다. 주로 발사체 또는 관통자를 포함하는 중앙 탄두 코어의 설계와 관련된 많은 연구가 있다. 분명히, 소형 폭탄 또는 자탄 적재 유형 구성은 많은 충격을 요구하기 때문에 하나의 발사체로부터 살상에 매우 취약하다. 이러한 요구사항을 바탕으로 최적의 직격요격체 구성은 모든 자탄을 직격할 수 있는 최소 질량과 상대 속도를 가져야 한다. 관통자 형상과 크기의 설계는 직접적으로 탄두의 공간과 중량에 관련되어 있다. 관통자의 형상, 크기, L/D, 재료 그리고 폭발팩의 구간 내부에 삽입되는 방식은 성공적인 관통자 설계 완성에 중요하다. AUTODYN-3D code 가 관통자의 관통특성을 연구하기 위해 사용되었다. 수치해석의 목적은 초고속도, 관통자의 L/D 및 형상과 같은 다양한 초기 조건 아래 초고속 충격에 의해 생성되는 관통자의 관통특성을 확인하는 것이다.

Abstract: New warheads are designed and developed to be highly lethal when used as part of ballistic missile payloads. There are many trades associated with the design of a central warhead core, mainly dealing with the projectiles or penetrators. Obviously, a payload-type configuration is very susceptible to kills from one projectile because of the high impacts required for bomblet or submunition payloads. Based on these requirements, the optimum kill vehicle configuration will have the smallest mass and relative velocity that will kill all the submunitions. The designs of the penetrator shape and size are directly related to the space and weight of the warhead. The shape, size, L/D, penetrator material, and manner in which they are inserted inside the surrounding explosive segments are critical in achieving successful penetrator design. 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 the penetrator produced by hypervelocity impacts under different initial conditions such as initial velocity, shape, and L/D of the penetrator.

1. 서 론

탄도미사일 요격용으로 부각되는 탄두 개념은 관통자 자탄 모듈을 탑재한 탄두이다. 탄두는 다수의 관통자를 포함하며 주변의 폭발팩에 의해 관통자가 분산되는 방식으로 탄도탄 표적과 요격 유

도탄의 상대속도를 이용하는 탄이다. 탄두에 탑재되는 관통자는 탄도미사일을 100 % 파괴할 수 있는 직격요격체로서 직격 관통성능을 확보해야한다. 관통자의 형상, 크기, L/D, 재료 등과 표적체와의 접촉조건들이 관통성능에 영향을 주며 이는 탄두의 파괴성능을 분석하는 인자가 된다.^(1,2)

탄두는 관통자의 형상에 의해 생성되는 분산형태에 따라 다양한 방법으로 설계되어진다. 이러한 개념의 관통자는 탄두 중량을 모두 사용하는 질량-초점(mass-focusing) 관통자라 한다.^(3,4) 관통자는 원

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

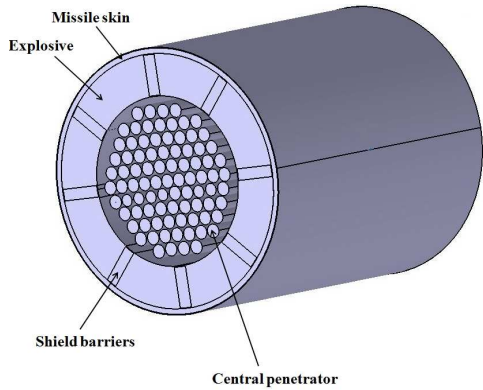


Fig. 1 Description of aimable penetrator warhead^(5,6)

형, 육각형, 사격형, 십자형 등 다양한 형상으로 설계될 수 있다. 일반적으로 중앙에 탑재되는 다발의 관통자는 분할 폭발팩으로 둘러싸여 있으며, 이 설계는 각 폭발팩에 의해 모든 관통자의 질량이 타 적성미사일에 표적지향성으로 분산되게 한다. 본 탄두의 개념은 Fig. 1에 나타나있다.^(5,6)

본 논문은 범용 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 다양한 형상의 텅스텐 관통자의 고속 관통 해석을 수행하고 그 결과로 관통자의 충격 거동 및 관통 후의 상태를 분석하였다. 이는 탄두에 삽입되는 자탄 관통자를 선정하기 위한 것이며 자탄 관통자 모듈을 탑재한 탄두의 개념 및 설계에 필요한 기초연구이다.

2. 관통자 선정 방법론

본 논문은 다층 강재 방호판에 대해 더 우수한 관통성을 갖는 관통자를 선정 및 수치해석을 통한 관통성능을 검증하는 것이다. 탄두에 삽입되는 다양한 형상의 관통자 중 최적 선정을 위해서는 탄두에 삽입되는 관통자의 형상, 기하형상비, 총 개수가 중요한 인자가 된다. 일반적으로 탄두에 탑재되는 관통자는 3, 4 단으로 탑재되기 때문에 탄두에 더 효율적으로 탑재되는 관통자를 선정해야 할 것이다. 또한 서로 다른 형상의 관통자는 다양한 조건에서의 관통자 관통 성능 해석이 수행되어 그 관통성능을 입증해야 한다.⁽⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 탄두에 삽입되는 관통자를 선정하기 위해 동일 체적의 탄두 내에 형상별 관통자의 개수를 도출해 보며 형상별 관통자는 다층판에 대한 고속 관통 수치해석을 수행한다. 그 결과로서 관통자의 잔류질량, 잔류속도를 고찰하여 관통 성능을 확인한다.

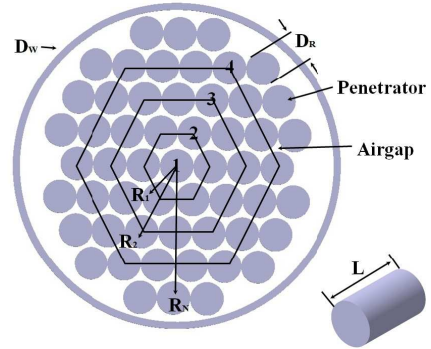


Fig. 2 The consist of cylindrical penetrators packaged⁽⁵⁾

2.1 다양한 형상의 관통자 설계법

관통자의 설계는 Fig. 2와 같은 관통자의 구성 배열과 관통자의 질량 및 총 개수 등 요구사항에 따라 결정할 수 있다. 관통자의 형태, 크기, L/D , 재료와 탄두내부에 삽입되는 방식은 성공적인 관통자의 최적설계에 필요한 주요 요인이다. 탄두내부에 삽입되는 원형 관통자의 기본 설계는 Fig. 2와 같이 일정한 탄두 직경(D_w)으로 배열에 따라 구성될 수 있다. 공극(Airgap)은 각 관통자의 여섯 측면에 존재하며 더 효율적인 삽입방식에 따라 그 비중을 줄일 수 있을 것이다. 열의 함수로 탄두에 삽입되는 관통자의 총 수를 추정할 수 있으며 이러한 유도는 각 열의 둘레를 기준으로 관통자의 직경으로 나눔으로써 가능하다.

첫 번째 열의 관통자 수는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$N_R(1) = 2\pi R_1 / D_R \quad (1)$$

여기서 R_1 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 열까지 관통자의 총 수에 대한 방정식은 다음과 같다.

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

하나의 관통자 질량은 다음식과 같다.

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

여기서 L 은 관통자의 길이이고 ρR 은 재료 밀도

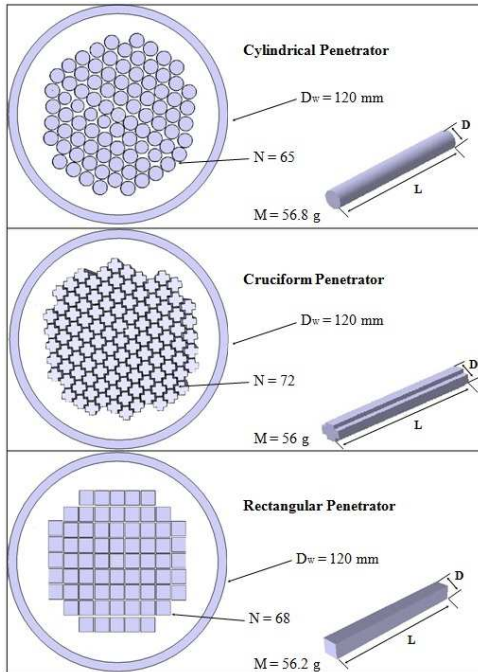


Fig. 3 Different penetrators numbers according to the ratio of L/D in the same warhead

이다. 따라서 관통자의 총 코어 질량(W_T)은 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 질량과 수를 계산할 수 있다.

Fig. 3 은 동일 체적의 탄두 내에 같은 질량에 따른 형상별 관통자의 총 개수를 보여준다. 예를 들어 원형 관통자의 경우 단면적이 78.53 mm^2 이며 길이는 40 mm , 밀도는 18.1 g/cm^3 으로 질량이 56.8 g 으로 도출된다. 총 수의 경우 원형 관통자 주변 사이의 공극을 고려하여 계산하여 구한 값이다. 사각형과 십자형 관통자의 경우 참고문헌[6]의 형상별 관통자 방정식에 근거하여 계산되었다. 십자형 관통자가 72 개로 동일 탄두 내에 탑재되는 개수가 가장 많다. 관통자 주변의 공극을 최소화 할수록 동일체적 내에 많은 수의 관통자를 삽입할 수 있음을 확인하였다.

3. 관통 해석 방법 및 모델링

3.1 관통해석 변수 정의

다층판에 대한 형상별 관통자의 거동 예측을 위한 관통해석은 다양한 변수에 의해 반복적인 관통 해석을 수행해야 한다. 수치해석을 수행하기에

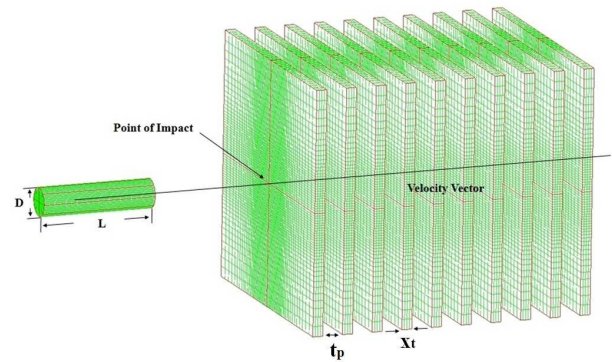


Fig. 4 The FEM model of penetrator and the bumper plate target

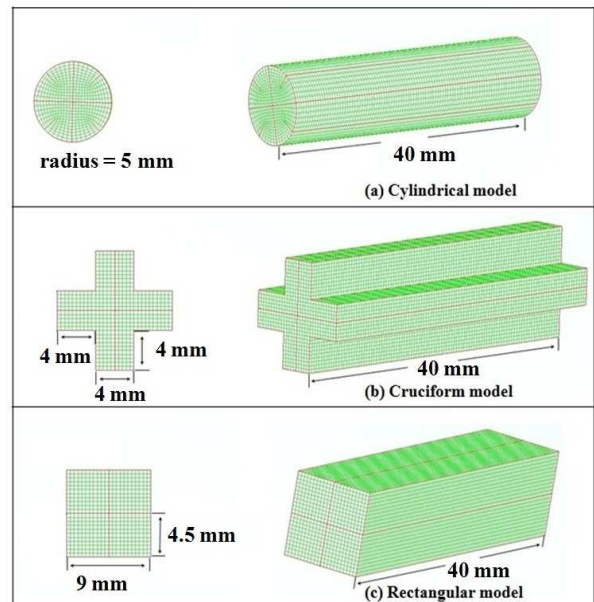


Fig. 5 Dimensions of different penetrator models

앞서 Fig. 4 와 같이 해석변수를 정의할 수 있다.

L 은 개별 관통자의 길이이며 D 는 개별 관통자의 직경(D_R)을 나타내며 관통자의 기하형상비(L/D)를 말한다. t 는 표적체의 두께이며 t_{gap} 은 표적체 사이의 갭을 나타내고 있다.

본 연구에서 표적체의 해석변수로는 표적체의 두께 2.5 mm , 5 mm 와 표적체 사이의 t_{gap} 5 mm , 10 mm , 15 mm 가 적용되었고 발사체의 해석 변수로는 초기속도 1500 m/s , 2000 m/s , 2500 m/s 이다.

이와 같은 해석변수는 다층판 관통해석에 영향을 미치는 인자이며 본 연구에 적용되었다. Fig. 5 는 약 57 g 으로 동일 질량의 형상별 관통자 치수이며 3 가지 종류의 관통자가 관통해석에 적용되었다. 또한 수행된 모든 시뮬레이션은 1/4 의 대칭조건을 적용하여 수치해석이 수행되었다. 3 가지 형상의 관통자 모두 기하형상비(L/D)는 4 로서 모델링

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]	18.1	7.83
Bulk Modulus[GPa]	310	167.4
Shear Modulus[GPa]	160	81.8
Principal Tensile Failure Stress[GPa]	-	0.72

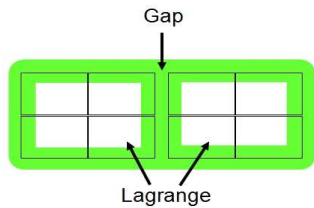


Fig. 6 The contact detection zone of a surface segment⁽⁹⁾

되었다. 이는 이영신⁽⁸⁾에 의해 수행된 텅스텐 원형 관통자의 초고속 관통특성에 관한 연구에 따라 최적의 관통자 기하형상비가 4~5 임을 입증하였기 때문이다.

3.2 관통해석방법

Table 1 과 Table 2 는 시뮬레이션 전반에 걸쳐 적용된 관통자와 표적체의 구성모델과 재료 물성치를 나타낸다. 관통자는 텅스텐 재료가 사용이 되었고 표적체는 Steel-4340 이며 참고문헌에서 인용되었다.⁽⁹⁾ 표적체에 추계학적 파괴기준을 사용하여 관통시 발생하는 파편을 현실적으로 구현하였고 Steel-4340 재료의 주파괴응력값은 720 MPa 이다.^(10,11)

본 연구에서 수행된 관통거동은 AUTODYN-3D 의 절점탈락기능(erosion)을 사용하여 구현되었다. 절점탈락기능이란 하나의 요소가 충격에 의해 변형이 발생할 때 그 변형률이 변형 한계에 도달하면 삭제되어 해석을 계속 진행할 수 있도록 하는

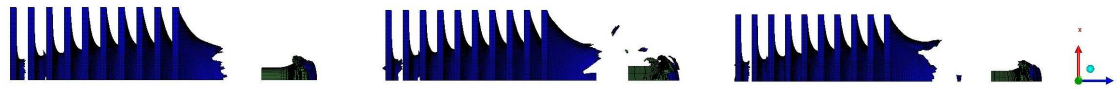
기능이다. 또한 본 연구는 Lagrange, ALE, Shell, Beam 및 비정렬 격자체의 충격해석을 구현하기 위해 적용되는 접촉 알고리즘을 사용하였다. 구체적으로 External Gap 으로 요소의 선형 및 각운동량을 보존하는 알고리즘이다. Fig. 6 은 요소 사이의 Gap 크기를 보여주며 녹색으로 표시되어있는 부분이 요소표면구간의 접촉감지영역으로 각 요소의 Gap 이다. 이러한 모든 접촉감지영역의 노드는 관통의 깊이에 비례하여 가해지는 힘에 의해 격퇴되는 원리로 충격해석을 수행하였다. Gap 의 크기는 요소간의 상호작용에 관련된 부분으로 가장 작은 요소면의 1/10 에서 1/2 의 범위에 있어야 한다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 150 %의 절점탈락기능 값을 설정하였고 관통자의 표적체의 상호작용 Gap 크기는 0.044 mm 이다.

4. 형상별 관통해석 결과 및 고찰

다양한 해석변수로 고속관통해석이 수행되었으며 3 가지 종류의 관통자 해석결과는 Fig. 7~10 과 같다. Fig. 10 과 같이 초고속도 1500 m/s 를 갖는 3 가지 형상의 관통자 모두는 두께 5 mm 를 갖는 표적체 10 장을 관통하지 못하고 잔류속도 0 m/s 이 된다. Fig. 7~9 는 2.5 mm 두께를 갖는 표적체의 5 mm, 10 mm, 15 mm t_{gap} 에 따른 해석결과를 보여주며 관통자는 10 장의 표적체를 완전관통하였다.

4.1 표적체 두께에 따른 해석 결과

관통자는 1500 m/s 의 동일한 충격속도로 2.5 mm 와 5 mm 의 표적체 두께에 형상별 관통자로 시뮬레이션이 수행되었다. Fig. 11~12 는 형상별 관통자의 잔류속도와 잔류질량을 보여준다. 십자형 관통자를 제외하고 전반적으로 표적체 두께가 2.5 mm 에서 5 mm 로 증가함에 따라 관통자의 잔류속도와 잔류질량 값이 큰 격차를 갖는 것을 볼 수 있다. 예를 들어 원형 관통자의 경우 표적체 두께에 따른 잔류속도와 잔류질량 격차는 531 m/s, 2.4 g 이고 사각형 관통자는 468 m/s, 2.5 g 이다. 반면 십자형 관통자인 경우 잔류속도는 30 m/s 이고 잔류질량은 2 g 이다. 표적체 두께의 증가는 관통자의 잔류질량과 잔류속도를 감소시키는 동일한 경향이 보이지만 동일한 질량의 관통자를 감안한다면 십자형 관통자가 표적체 두께증가에 대한 관통성능이 더 우수하다고 볼 수 있다. 또한 0.12 ms 일 때 5 mm 두께의 표적체에 대한 잔류속도가



(a) Cylindrical penetrator

(b) Cruciform penetrator

(c) Rectangular penetrator

Fig. 7 Results of penetration simulation under various penetrators ($t=2.5$ mm, $t_{\text{gap}}=5$ mm, $V=1500$ m/s)



(a) Cylindrical penetrator

(b) Cruciform penetrator

(c) Rectangular penetrator

Fig. 8 Results of penetration simulation under various penetrators ($t=2.5$ mm, $t_{\text{gap}}=10$ mm, $V=1500$ m/s)

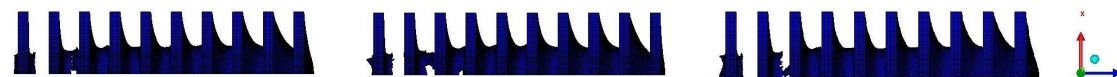


(a) Cylindrical penetrator

(b) Cruciform penetrator

(c) Rectangular penetrator

Fig. 9 Results of penetration simulation under various penetrators ($t=2.5$ mm, $t_{\text{gap}}=15$ mm, $V=1500$ m/s)

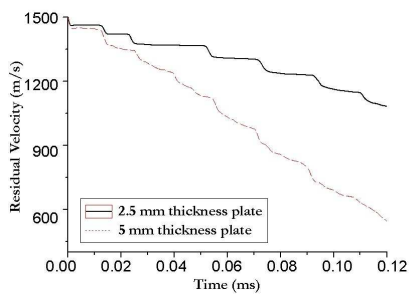


(a) Cylindrical penetrator

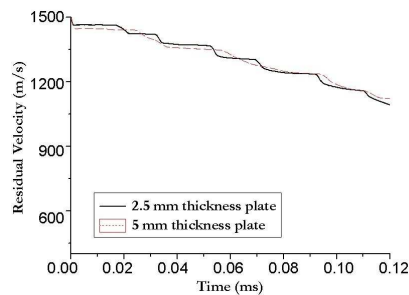
(b) Cruciform penetrator

(c) Rectangular penetrator

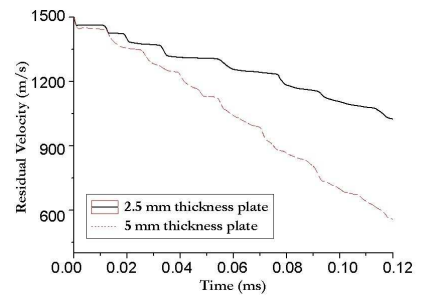
Fig. 10 Results of penetration simulation under various penetrators ($t=5$ mm, $t_{\text{gap}}=10$ mm, $V=1500$ m/s)



(a) Cylindrical penetrator

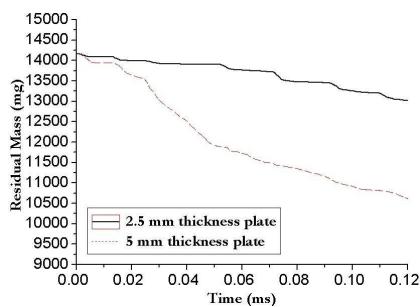


(b) Cruciform penetrator

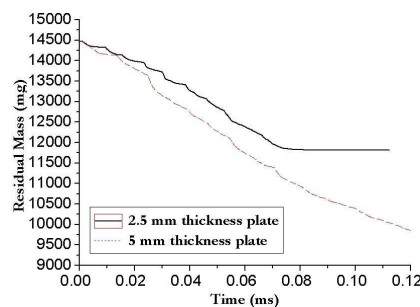


(c) Rectangular penetrator

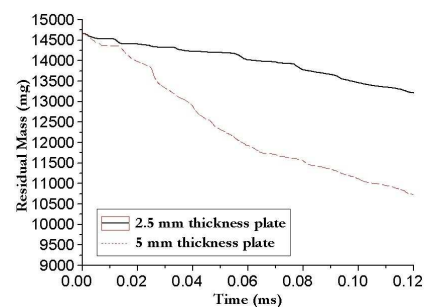
Fig. 11 Results of residual velocity under various penetrators with different thickness of plate target



(a) Cylindrical penetrator



(b) Cruciform penetrator



(c) Rectangular penetrator

Fig. 12 Results of residual mass under various penetrators with different thickness of plate target

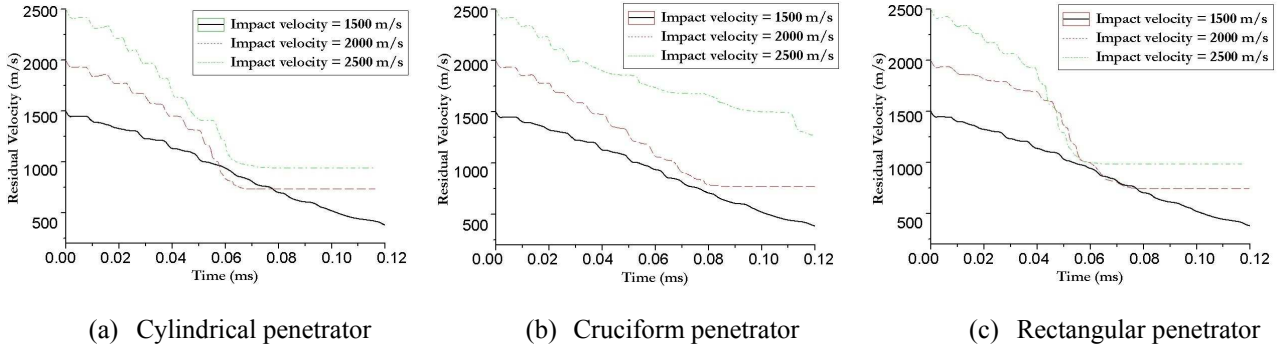


Fig. 13 Results of residual velocity under various penetrators with different initial velocities

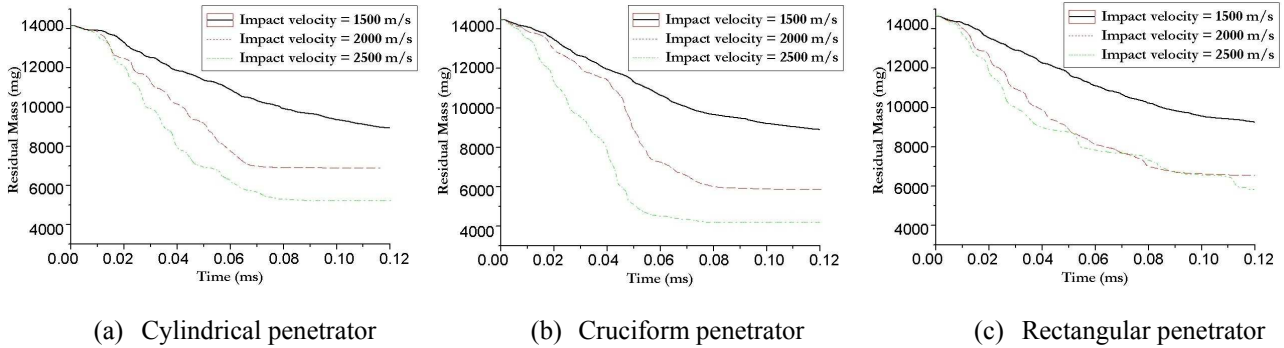


Fig. 14 Results of residual mass under various penetrators with different initial velocities

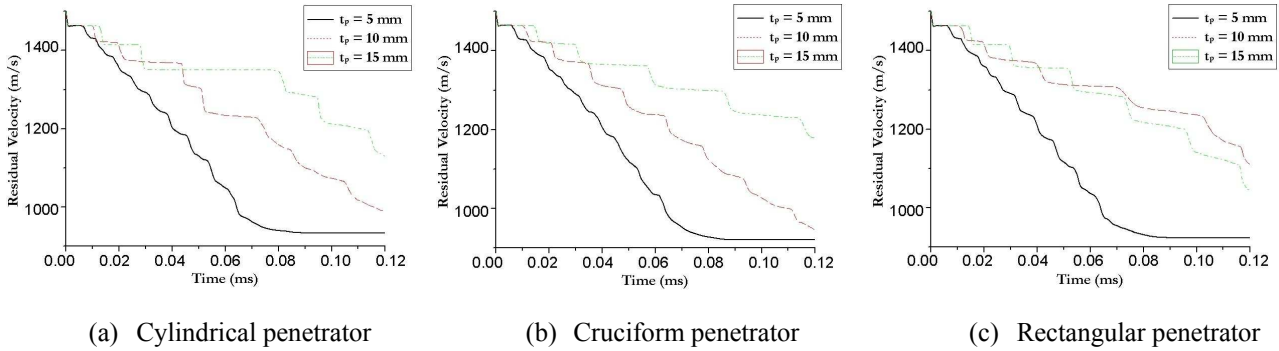


Fig. 15 Results of residual velocity under various penetrators with different t_{gap} size

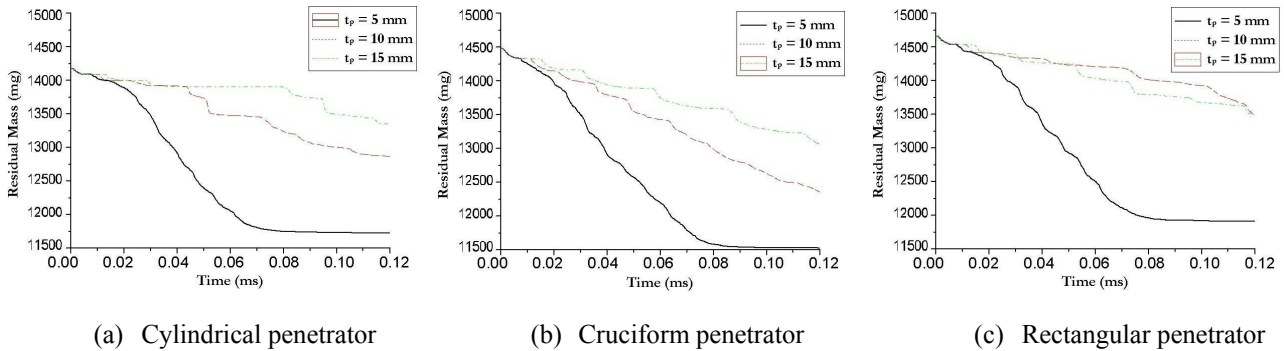


Fig. 16 Results of residual mass under various penetrators with different t_{gap} size

1092 m/s 으로 상대적으로 크게 유지되었다. 이는 1차 관통 후 다음에 오는 2, 3차 관통여부와도 관계가 깊으며 관통자의 운동에너지에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

4.2 초기 충격속도에 따른 해석결과

관통자가 1500, 2000, 2500 m/s의 초기 충격속도를 가질 때 관통자 형상에 따른 수치해석이 수행되었으며 그 결과로 잔류속도 및 잔류질량이 Fig. 13~14에 각각의 선도로 나타내었다. 초기질량이 14.1 g(1/4 기준)인 형상별 관통자는 관통후 질량이 감소한다. 이는 관통거동에 의해 관통자의 질량 일부가 파편으로 균열 및 파열되어 부서지기 때문이다. 하지만 관통자의 형상에 따라 잔류질량은 상대적으로 다른 파괴메커니즘 결과를 보인다. 예를 들어 사각형 관통자는 충격속도 1500 m/s 일 때 잔류질량은 8.9 g 이고, 충격속도 2000 m/s 일 때는 5.8 g, 충격속도 2500 m/s 일 때는 4.2 g 으로 감소하였다. 십자형 관통자의 경우 속도 1500m/s 일 때는 9.2 g 감소하였고 2000 m/s 일 때는 6.5 g, 2500 m/s 일 때는 5.8 g 으로 감소하였다. 원형과 사각형 관통자와 비교함에 따라 십자형 관통자가 미소하게 잔류질량이 높을 것을 알 수 있다. 관통자 형상에 따른 잔류속도는 그 격차가 상대적으로 크게 잔류하는 것을 관찰할 수 있다. 예를 들어 원형 관통자일 경우 충격속도 1500 m/s 일 때 잔류속도는 942.5 m/s 로 감소하였고, 충격속도 2000 m/s 일 때는 737.4 m/s, 충격속도 2500 m/s 일 때는 384.1 m/s 으로 감소한다. 반면 십자형 관통자의 경우 충격속도 1500 m/s 일 때 잔류속도는 1272 m/s 로 감소하였고, 충격속도 2000 m/s 일 때는 769.2 m/s, 충격속도 2500 m/s 일 때는 393.0 m/s 으로 감소한다. 십자형 관통자인 경우 관통후 초기 충격속도의 감소가 상대적으로 크게 작음을 보였다. 속도의 제곱에 비례하는 운동에너지를 고려한다면 이러한 결과는 관통형상에 따라 관통자의 관통성능이 향상되었음을 볼 수 있다.

4.3 표적체 사이의 겹에 따른 해석결과

형상별 관통자가 1500 m/s의 동일한 충격속도와 2.5 mm의 두께를 갖는 표적체 사이의 t_{gap} 에 따른 시뮬레이션이 또한 수행되었다. 본 해석에서는 실제 표적체 사이의 t_{gap} 에 존재하는 공기의 영향은 무시하였으며 각 t_{gap} 의 차이에 따른 표적체와 관통자의 간섭영향을 주된 해석결과로 고찰하였다. 형상별 관통자는 전반적으로 t_{gap} 이 증가함에 따라 잔류질량과 잔류속도가 증가함을 보인다. 이는 관

통거동 중 표적체 사이의 간섭영향이 줄어들기 때문이다. 표적체 사이의 간섭영향은 관통자가 1차 관통 후 다음에 오는 2, 3차 관통에 더 큰 운동에너지를 요구하게 만들기 때문이다.

표적체 사이의 겹에 따른 해석결과는 관통자의 형상에 따라 유사한 파괴메커니즘을 보인다(Fig. 15~16). 예를 들어 원형 관통자일 경우 t_{gap} 이 5 mm 일 때 잔류속도는 934.5 m/s 로 감소하였고, t_{gap} 이 10 mm 일 때 989.7 m/s, t_{gap} 이 15 mm 일 때 1131.5 m/s 으로 감소한다. 사각형 관통자일 경우는 t_{gap} 이 5 mm 일 때 잔류속도는 921.6 m/s 로 감소하였고, t_{gap} 이 10 mm 일 때 951.7 m/s, t_{gap} 이 15 mm 일 때 1185.4 m/s 으로 감소한다. 십자형 관통자 또한 유사하게 t_{gap} 이 5 mm 일 때 잔류속도는 923.7 m/s 로 감소하였고, t_{gap} 이 10 mm 일 때 1046.2 m/s, t_{gap} 이 15 mm 일 때 1113 m/s 으로 감소한다. 형상별 관통자의 잔류질량 또한 유사하게 잔류하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 잔류속도와 잔류질량이 감소하는 비율이 관통자 형상에 따라 상이함을 관찰 할 수 있다. 십자형 관통자의 경우 총 10장의 표적체를 관통할 때 일정한 비율의 단계로 감소함을 볼 수 있다. 이는 관통거동 중 관통자의 형상에 의해 표적체에 전달되는 충격에너지가 일정하게 전달하기 때문이다. 반면 원형과 사각형 관통자의 경우 잔류질량과 잔류속도가 감소하는 비율이 일정하지 않으며 심지어 사각형의 경우 5 mm 이상의 t_{gap} 경우 감소하는 비율이 앞서 기술한 값과 일반적이지 않다.

4.4 형상별 관통자의 관통성능 고찰

1단의 동일 체적의 탄두 내($D_w = 120$ mm)에 같은 질량의 형상별 관통자의 개수를 고려한다면 십자형 관통자가 72 개로 원형이나 사각형 관통자에 비해 약 4~7 개정도 많다. 탄두의 탄두 직경을 더 늘리거나 1단이 아닌 3~4단의 탄두체제를 채택한다면 그 수는 더욱 증가할 것이다. 십자형 관통자는 원형 및 사각형 관통자의 관통성능과 비교하면 그 성능이 비슷하거나 오히려 표적체 두께 증가와 초기 충격속도 증가함에 따라 그 관통성능이 향상됨을 볼 수 있다. 예로 표적체 두께에 따른 해석 결과는 십자형 관통자가 0.12 ms 일 때 5 mm 두께의 표적체에 대한 잔류속도가 1092 m/s 으로 원형 및 사각형 관통자에 비해 상대적으로 크게 유지된다. 초기 충격속도에 따른 해석결과 또한 십자형 관통자가 초기속도 1500 m/s, 2000 m/s, 2500 m/s 을 가질 때 사각형 및 원형 관통자에 비해 각 329.5m/s, 31.8 m/s, 8.9 m/s 로 더 높은 잔류속도를

보유한다. 이는 속도의 제곱에 비례하는 운동에너지를 고려한다면 관통자의 관통 성능이 더 우수하다고 볼 수 있다. 또한 이러한 관통성능은 1 차 관통 후 다음에 오는 n 차 관통여부에 부합되는 성능이다.

따라서 관통자 자탄을 탑재한 탄두 설계시 앞서 기술한 사항을 고려하여 십자형 관통자의 선정을 고려해야한다.

5. 결 론

본 연구에서는 형상별 관통자의 관통거동을 수치해석으로 구현하여 관통거동에 의해 생성되는 잔류질량, 잔류속도를 도출하였으며 형상별 관통자의 관통성능을 해석 및 고찰하였다.

(1) 동일 체적의 탄두 내에 같은 질량에 따른 형상별 관통자의 개수를 고려한다면 관통자 주변의 Airgap 비중이 적은 십자형 관통자가 원형 및 사각형 관통자에 비해 더 많은 총 수를 가지며 따라서 관통자 자탄을 탑재한 탄두 설계시 십자형 관통자가 가장 적합하다.

(2) 표적체 두께의 증가는 형상별 관통자의 잔류질량과 잔류속도의 격차를 증가시킨다. 특히 십자형 관통자의 경우 5 mm 두께의 표적체에 대한 잔류속도가 1092 m/s 로 원형 및 사각형 관통자에 비해 약 400 m/s 의 잔류속도를 더 보유하고 있다.

(3) 초기 질량이 57 g 인 형상별 관통자는 초기 충격속도가 증가함에 따라 전반적으로 잔류질량, 잔류속도가 감소하였다. 십자형의 경우 초기속도 1500 m/s, 2000 m/s, 2500 m/s 를 가질 때 타 관통자에 비해 약 300 m/s 의 잔류속도를 더 유지하였다.

(4) 표적체 사이의 t_{gap} 에 따른 형상별 관통자의 해석결과는 전반적으로 유사함을 보이며 t_{gap} 이 증가함에 따라 잔류질량과 잔류속도가 증가함을 보인다. 이는 관통거동 중 표적체 사이의 간섭영향이 줄어들기 때문이다. 반면 십자형 관통자의 경우 총 10 장의 표적체를 완전관통거동 중 타 관통자에 비해 잔류질량 및 잔류속도가 일정한 비율의 단계로 감소함을 보인다. 이는 관통자의 형상에 따라 표적체에 전달되는 충격에너지가 다르기 때문이다.

후 기

본 논문은 한국연구재단 2012 년도 일반 연구

자지원 지역대학 우수과학자 지원사업(과제번호 : 2012-0004596)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) "The Resistance of Various Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments," Ballistic Analysis Laboratory, Johns-Hopkins University, Baltimore, MD, BAL, April 1963, THOR TR No. 51, Confidential.
- (2) Wollmann, E., Hoog, K., Koerber, G., 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, R1 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) Jo, J.H., Lee, Y.S., Kim, J.H. and Bae, Y.W., "A Study on Hypervelocity Penetration Characteristics of Tungsten Cylindrical Penetrator," *Proceedings of the KSME 2012 Fall conference of the KSME*, pp. 2131~2137.
- (9) WWW1.ANSYS.COM, "ANSYS/AUTODYN-3D," 12.1 User's Manual, Material Models Chapter (2011).
- (10) 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. 1577~1583.
- (11) 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. 1569~1575.