

분절형 텅스텐 관통자의 초고속 관통특성에 관한 연구

조종현* · 이영신*† · 김재훈* · 배용운**

* 충남대학교 기계설계공학과, ** 국방과학연구소

Study of Hypervelocity Penetration Characteristics of Segmented Tungsten 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 December 13, 2012 ; Revised April 10, 2013 ; Accepted April 12, 2013)

Key Words: Segmented Penetrator(분절형 관통자), Length to Diameter Ratio(L/D; 기하형상비), Penetration(관통)

초록: 본 논문의 목적은 수직 또는 경사각에 대한 분절형 관통자의 관통특성을 규명하는 것이다. 분절형 관통자의 기하형상비(L/D)는 각 1.0, 0.5, 0.25 이다. 적용된 충격속도와 경사각도는 각 1.5, 2.0, 2.5 km/s 그리고 15°, 30°, 45° 이다. AUTODYN-3D code 가 분절형 관통자의 관통성능을 연구하기 위해 사용되었다. 결과는 강판에 대한 분절형 관통자의 관통성능이 해당 연속적 관통자보다 분명하게 높은 특성을 나타냈다. 2.0 km/s 의 충격 속도와 L/D 가 1 일 때, 분절형 관통자의 뛰어난 관통성능을 관찰 할 수 있다. 이 경우 분절형 관통자의 관통성능은 해당 연속적인 관통자보다 7 % 높았다. 이러한 경향은 표적체와 발사체 사이의 상호작용 때문이다. 상호작용의 정도는 표적체와 발사체의 상대속도와 입사각도, 분절형 관통자의 개수에 의존하고 있다. 따라서, 분절형 관통자의 관통 성능은 충격속도의 증가, 관통자의 개수 및 관통길이를 통해서 높일 수 있음이 확인되었다.

Abstract: This study aimed to investigate the penetration characteristics of a segmented penetrator with normal and inclined angles. The length to diameter ratio (L/D) of the segmented penetrator was varied as 1.0, 0.5, and 0.25. Moreover, impact velocities of 1.5, 2.0, and 2.5 km/s and inclination angles of 15°, 30°, and 45° were successively applied. The AUTODYN-3D code was used to simulate the penetration performance of the segmented penetrator. The results show that the penetration performance of the segmented penetrator with steel plates was obviously higher than that of the corresponding continuous penetrator with steel plates. The outstanding penetration performance of the segmented penetrator can be observed when the impact velocity was 2.0 km/s and L/D = 1. In this case, the penetration performance of the segmented penetrator was 7% higher than that of the corresponding continuous penetrator. This trend was attributable to the interaction between the reactive plate and the projectile. The extent of the interaction relies on the relative velocities of the plate and projectiles, inclination angle, and number of segmented penetrators. It was proven that the penetration performance of the segmented penetrator can be improved by increasing the impact velocity, number of segmented penetrators between segments, and penetrator length.

1. 서 론

최근 많은 연구자들에 의해서 두꺼운 표적체에 수직으로 충격하는 분절형 관통자의 향상된 관통성능이 입증되었다. 경사진 표적체 및 분절형

관통자의 기하형상비 등 다양한 매개변수에 따른 충격은 발사체 및 장갑 설계시 중대한 관심사 중 하나이지만, 현재 공개된 분절형 관통자와 관련된 문헌의 연구 대부분은 반무한 표적체에 대한 수직 입사 충격이 대부분이다.⁽¹⁻⁴⁾ 일반적으로 분절형 관통자의 관통은 큰 분산특성으로 전개되지만, L/D=1 인 분절형 관통자는 2.6 km/s 의 속도에서 L/D=30 인 단일형 관통자 대비 약 65 %의 관통성능 향상을 보여주었다.⁽⁵⁾ 분절형 관통자의 관통성

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

능을 연구하기 위해 Rosset 와 Sherrick 는 1.7 및 2.6 km/s 에서 균일압연장갑(RHA)에 대한 고정된 기하형상비의 분절형 관통자의 수치 시뮬레이션을 수행하였다.⁽⁶⁾ 그 결과, 관찰된 관통성능 저하는 이전 분절체의 후면에 충격하는 제 2 의 분절체에 기인하고, 이러한 영향은 저속도에서 더 심화되는 것으로 확인되었다.

Hauver 과 Melani⁽⁷⁾ 또한 연속적 분절체의 잔류 질량 및 속도가 표적체와의 상호작용 때문에 총 관통깊이에 점진적으로 기여도가 적어지는 것으로 나타났다. 따라서 분절형 관통자의 실제 관통 성능은 관통자의 분절된 개수에 의해 얻은 것보다 낫다.⁽⁸⁾

M.LEE 는 고정 또는 이동하는 경사판에 대한 분절형 관통자의 탄도성능을 연구하였다. 그는 단일형 관통자 대비 분절형 관통자가 2.2 km/s 의 충격속도에서 관통성능이 향상되었음을 관찰하였다. 이러한 특성을 발사체와 표적체 사이의 다양한 변수에 의한 상호작용 때문이라고 결론지었다.⁽⁹⁾

표적체에 일정한 간격을 둔 단일형 관통자와 분절형 관통자의 종말탄도성능이 실험적으로 확인되었다.^(10,11) 그 결과 중 하나는 분절형 관통자는 동일한 길이인 단일형 관통자의 관통성능을 능가할 수 없다는 것이다. 이는 분절형 관통자는 측방향 하중에 매우 민감하다는 사실 때문이다.

그 밖에 Jo 등은 충격자 형상 및 표적체의 재질 변화에 따른 관통이력을 연구하였으며 텅스텐 원형 관통자의 초고속 관통특성에 관한 연구에 따라 최적의 원형 관통자 기하형상비가 4~5 임을 규명하였다.⁽¹²⁾

본 논문은 경사각에 대한 표적체 및 다층 표적체에 대해 단일형 관통자와 분절형 관통자의 관통성능 비교를 위한 것이며 범용 프로그램인 AUTODYN 을 이용하여 텅스텐 재질의 관통자의 고속 관통해석을 수행하고 그 결과로 관통자 충격 거동 및 관통 후의 상태를 분석하였다.

2. 관통자의 관통 해석 방법 및 모델링

2.1 관통해석 변수 정의

관통자의 형상, 즉 단일형 관통자와 분절형 관통자의 관통성능 비교 및 충격 거동 예측을 위한 관통해석은 다양한 변수에 의해 반복적인 관통해석을 수행해야 한다. 수치해석을 수행하기에 앞서 Fig. 1 과 같이 고속 관통시 고려되는 관통자와 표적체 사이의 해석 변수를 언급할 수 있다. Fig. 1

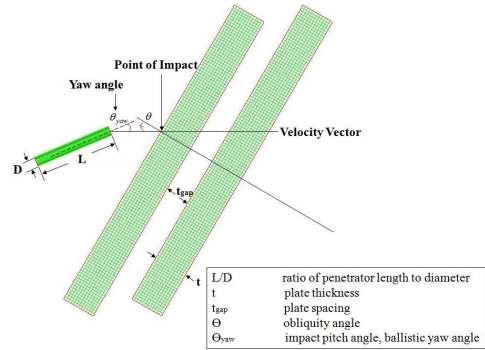


Fig. 1 Definition of strike and spatial orientation angles⁽¹³⁾

에서 L/D 는 발사체의 길이와 직경으로 표현된 관통자의 기하형상비를 나타내며, 그 밖에 요각 Θ_{yaw} , 충격입사각 Θ , 표적체 두께 t , 표적체 사이의 갭 t_{gap} 등 관통자의 관통성능에 영향을 미치는 구성 요소가 있다. 관통해석에 영향을 미치는 해석변수를 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 발사체 측면에서 관통자의 질량, 관통자의 재질, 관통자의 L/D , 관통자의 입사각 및 자세각, 초기 충격속도 등을 해석 변수로 정할 수 있고, 두 번째로 표적체 측면에서 표적체의 두께, 표적체의 재질 등을 해석 변수로 지정할 수 있다.

본 논문은 $L/D=4$ 인 단일형 관통자와 $L/D=1, 0.5, 0.25$ 인 분절형 관통자가 발사체로서 시뮬레이션에 적용되었고 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 입사각, 1.5, 2.0, 2.5 km/s 의 충격속도와 5 mm 두께의 다층 및 60 mm 두께의 표적체를 해석 변수로 지정하여 수치해석을 수행하였다. 해석 결과로 관통자의 최대 관통깊이(DOP: depth of penetration), 관통성능(P/L), 잔류속도, 잔류질량을 도출하였다.

2.2 관통해석방법

Fig. 2 와 같이 총 길이가 40 mm 인 분절되지 않은 $L/D=4$ 인 사각형상의 단일형 관통자와 초기질량이 72 g 으로 동일한 중량을 갖는 $L/D = 1, 0.5, 0.25$ 인 분절형 관통자가 연구에 적용된다. 분절형 관통자는 기하형상비에 따라 각 4, 8, 16 개로 분절된다. 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.^(13,14) 표적체에 추계학적 파괴기준을 사용하여 관통 시 발생하는 파편을 현실적으로 구현하였으며, Steel-4340 재료의 주 파괴응력값은 720 MPa 이다.^(15,16)

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

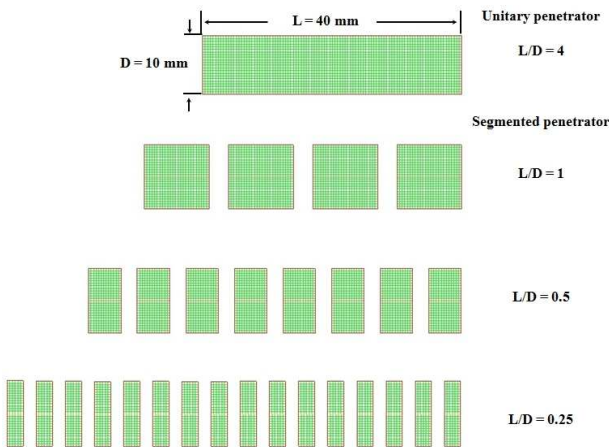


Fig. 2 Unitary penetrator and segmented penetrator

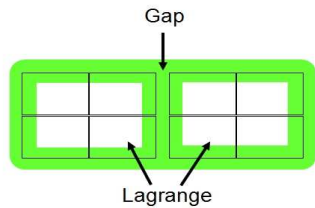


Fig. 3 The contact detection zone of a surface segment⁽¹⁴⁾

본 연구에서 수행된 충격거동은 AUTODYN-3D의 절점탈락기능(erosion)과 Lagrange, ALE, Shell, Beam 및 비정렬 격자체의 충격해석을 구현하기 위해 적용되는 접촉 알고리즘을 사용하였다. 이는 External Gap 으로 요소의 선형 및 각운동량을 보존하는 알고리즘이다. Fig. 3은 요소 사이의 Gap 크기를 보여주며 녹색으로 표시되어 있는 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 1/10에서 1/2의 범위에 있어야 한다.

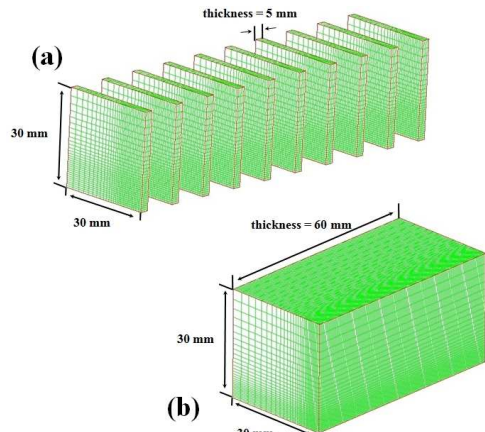


Fig. 4 The quarter model : (a) steel-4340 bumper plate, (b) 60 mm thickness steel-4340 plate

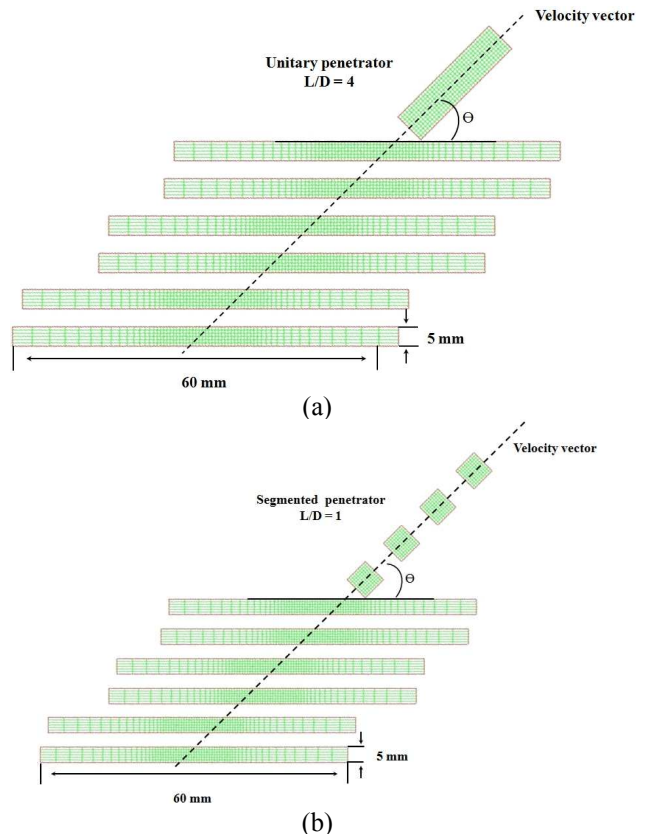


Fig. 5 The initial position of penetrator and plate target (a) with L/D = 4 unitary penetrator, (b) with L/D = 1 segmented penetrator

본 논문의 시뮬레이션은 150%의 절점탈락기능 값을 설정하였고 발사체와 표적체의 상호작용 Gap 크기는 0.042 mm 이다.

5 mm 두께의 다층 또는 경사각에 대한 표적체와 60 mm 두께의 표적체에 대한 단일형 관통자와 분절형 관통자의 충격 수치 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션의 목적은 다양한 초기조건에서 관통자와 표적체 사이의 상호작용에 대해 관통성

능을 비교하는 것이다. 이는 두꺼운 표적으로 수직 충격에 대한 분절형 관통자의 뛰어난 관통성을 고찰하고자 함이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b) 같이 1/4 모델로 관통자 직경의 0.5 배인 총 10 장의 다층 표적체와 관통자 직경의 6 배로 60 mm의 두꺼운 표적체가 적용되었다. 관통자 또한 1/4 모델이기 때문에 초기질량 18 g을 갖는다. 입사각에 따른 관통자와 표적체 사이의 상호작용을 고찰하기 위해 Fig. 5와 같이 1/2 모델로 입사각에 따른 시물레이션이 수행되었다. 관통자의 초기질량은 1/2 모델로 36 g이다. 단, 다층 및 60 mm의 두께의 표적체에는 L/D=4인 단일형 관통자와 각 L/D=1, 0.5, 0.25인 분절형 관통자가 모두 적용되었고 입사각에 따른 특성을 고찰하기 위한 시물레이션은 L/D=4인 단일형 관통자와 L/D=1인 분절형 관통자가 적용되었다.

3. 관통해석 결과 및 고찰

3.1 형상 및 충격속도에 따른 최대 관통 깊이

60 mm 두께의 표적체에 대한 L/D=4인 단일형 관통자와 L/D=1, 0.5, 0.25인 분절형 관통자의 최대 관통 깊이를 고찰하고자 1.5 km/s의 초기 충격속도로 관통해석이 수행되었다. 해석결과는 Fig. 6에 보여주지며 그림과 같이 각 L/D에 따른 최대 관통 깊이가 변화함을 알 수 있다.

L/D=0.5일 때 43.2 mm로 가장 높은 결과값이 도출되었으며, 이는 단일형 관통자의 관통깊이에 비해 5.1% 향상되었다. 관통성능은 1.08로 1.00의 단일형 관통자의 관통성능에 비해 0.08이 향상되었다. 전반적인 해석 결과는 Table 3에 보여진다. 반면 Fig. 7의 L/D=0.5와 L/D=0.25의 관통후 잔류 질량을 보면 3.4 g으로 동일하지만 관통깊이는 상대적으로 크게 감소하였다. 이는 Charters⁽¹⁷⁾의 2.2 km/s에서 L/D=5인 단일형 관통자 및 상응하는 분절형 관통자 관통연구와 동일한 결과이다.

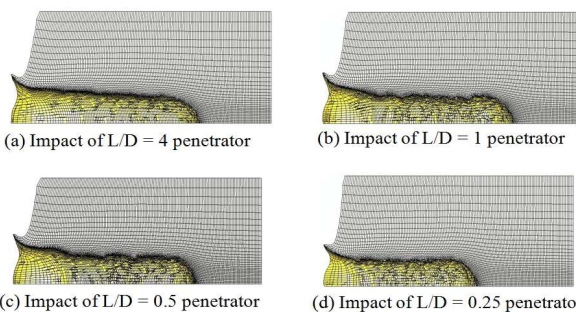


Fig. 6 Penetration depths under various penetrators with 60 mm target and 1.5 km/s impact velocity

Charters의 연구결과는 2.2 km/s의 충격속도에서 L/D=1인 분절형 관통자는 단일형 관통자 대비 약 10%의 향상된 관통성을 보였다. 반면 흥미로운 결과 중 하나는 분절형 관통자의 관통성능이 단일형 관통자와 비교했을 때 L/D=1이하의 기하형상비에서 크게 저하된다는 것이다. 이것은 분절형 관통자의 기하형상비가 1이하일 경우 단일형 관통자 대비 향상된 관통깊이 및 관통성능이 발생되지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구는 L/D=1를 갖는 분절형 관통자에 대하여 충격속도 증가에 따른 관통해석을 수행하였다. 해석결과는 Table 4에 보여진다. 전반적으로 초기 충격속도가 증가함에 따라 관통깊이와 관통성능이 증가하였다. L/D=1인 분절형 관통자는 2.0 km/s의 충격속도에서 약 7%의 관통깊이 성능향상을 보였다.

Fig. 8의 관통후 잔류질량을 비교해 보면 초기 충격속도 증가에 따라 상대적으로 다른 파괴메커니즘 결과를 보인다. 예를 들어 L/D=1인 분절형 관통자의 경우, 충격속도에 증가에 따라 각 5.1 g, 4.8 g, 3.9 g으로 L/D=4의 단일형 관통자에 대비 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 관통시 표적체에 생성되는 케비티 직경 및 형상에 의한 것이다.⁽⁸⁾ 단일형 관통자의 경우 관통깊이에 따라 완전한 케비티 형상을 생성하지만 분절형 관통자의 경우, 후 분절체에 의해 선 분절체의 후면에 충격압력을 가하게 되어 굴곡을 포함하는 케비티 형상을 생성하기 때문이다.

Table 3 The depths of penetration and P/L for the 60 mm target

Impact velocity = 1.5 km/s	DOP (mm)	P/L
Unitary penetrator (L/D = 4)	40.1	1.00
Segmented penetrator (L/D = 1)	41.8	1.04
Segmented penetrator (L/D = 0.5)	43.2	1.08
Segmented penetrator (L/D = 0.25)	34.8	0.87

Table 4 The depths of penetration and P/L for different initial velocities

Impact velocity (km/s)	Unitary penetrator (L/D = 4)		Segmented penetrator (L/D = 1)	
	DOP (mm)	P/L	DOP (mm)	P/L
1.5	40.1	1.00	41.8	1.04
2.0	54.5	1.36	58.1	1.45
2.5	59.2	1.48	60.2	1.50

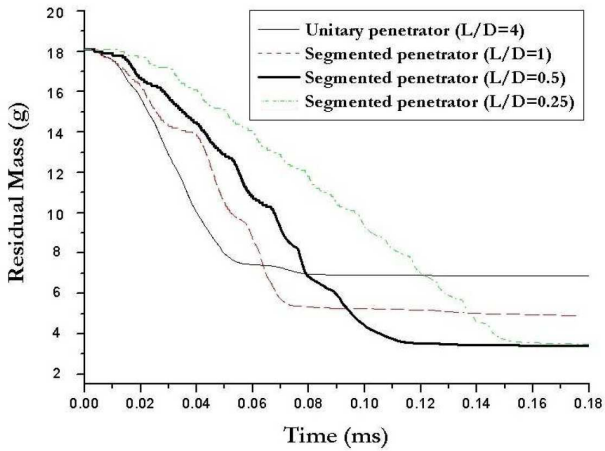
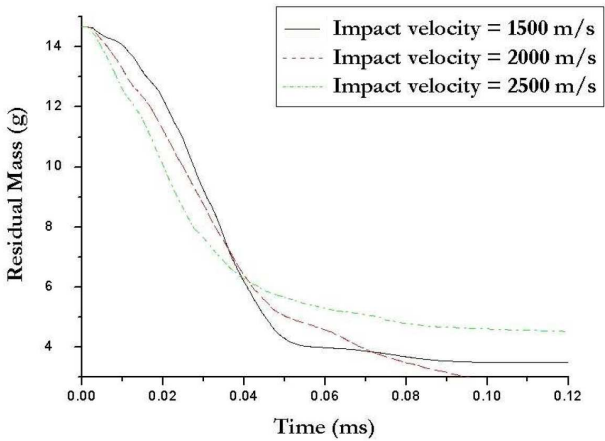
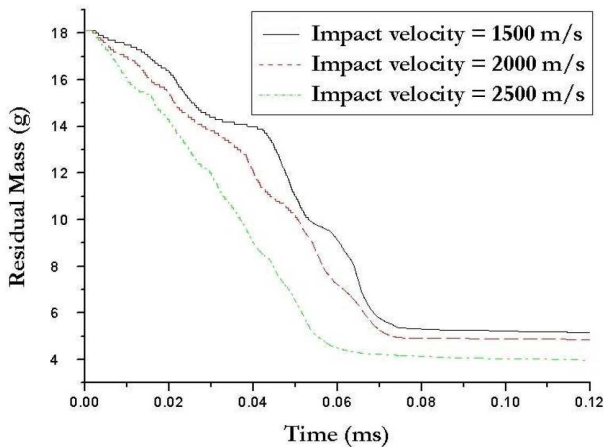


Fig. 7 Results of residual mass under various penetrators with 60 mm thickness plate target



(a) Residual mass of L/D = 4 unitary penetrator



(b) Residual mass of L/D = 1 segmented penetrator

Fig. 8 Results of residual velocity and mass for 60 mm thickness plate target with different initial velocities

3.2 다층 표적체에 따른 관통성능

관통자는 1.5 km/s 의 동일한 충격속도로 5 mm 의 두께를 가지는 다층 표적체에 대해 시뮬레이션 이 수행되었다. Fig. 9 와 같이 단일형 관통자와

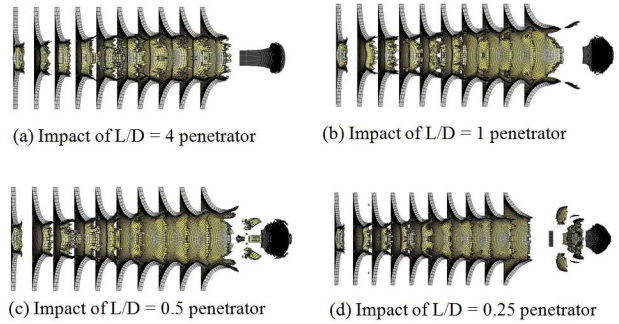
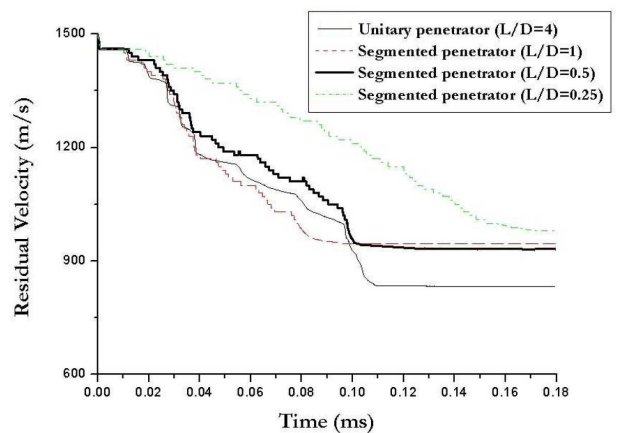
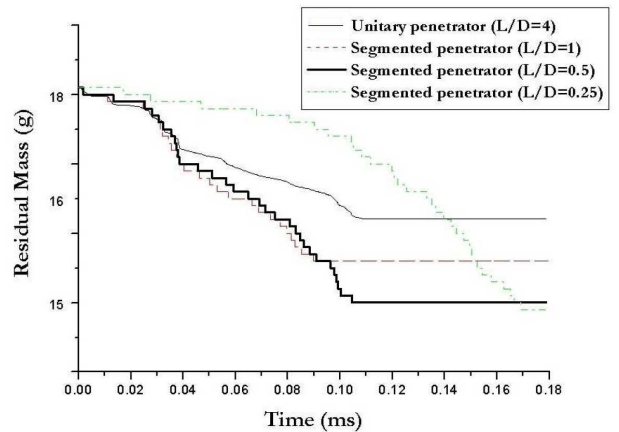


Fig. 9 Results of simulation under various penetrators in the bumper plate target at the velocity of 1.5 km/s



(a) Residual velocity



(b) Residual mass

Fig. 10 Results of residual velocity and mass under various penetrators with bumper plate target

다양한 L/D 를 갖는 분절형 관통자 모두 다층 표적체를 완전관통하였다. 따라서 잔류질량 및 잔류속도의 비교를 통해 관통성능을 고찰할 수 있다. Fig. 10 은 다층 표적체에 대한 완전관통후 잔류속도와 잔류질량을 비교한 선도이다. 전반적으로 관통거동에 의해 관통자의 질량이 감소한다. 이는 관통거동에 의해 관통자의 질량 일부가 파편으로 균열 및 파열되어 부서지기 때문이다. 다양한 L/D

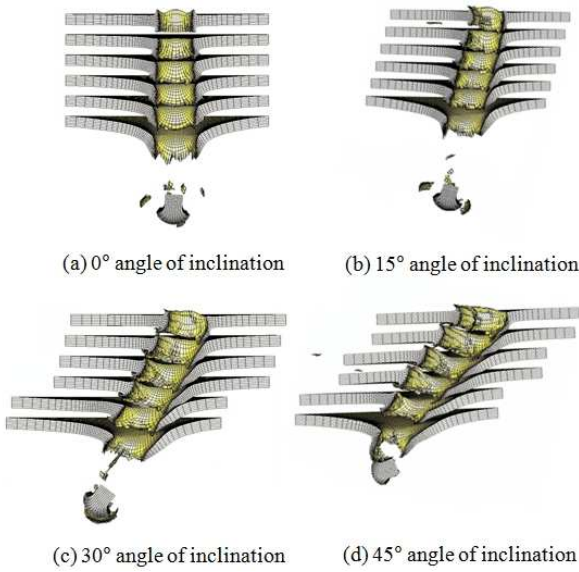


Fig. 11 Impact simulations for L/D = 4 unitary penetrator at 1.5 km/s

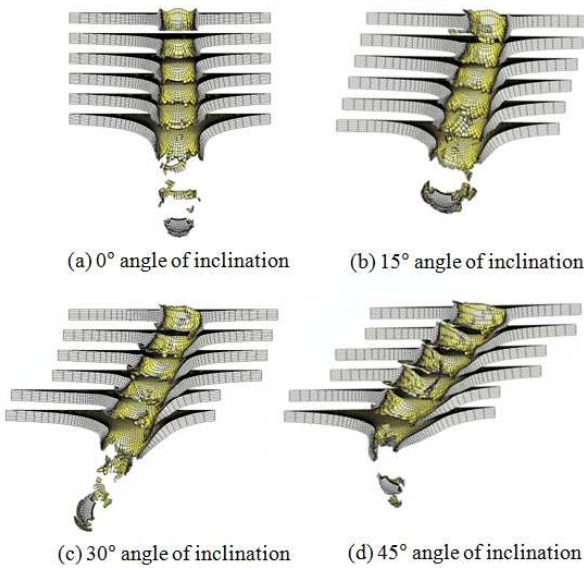


Fig. 12 Impact simulations for L/D = 1 segmented penetrator at 1.5 km/s

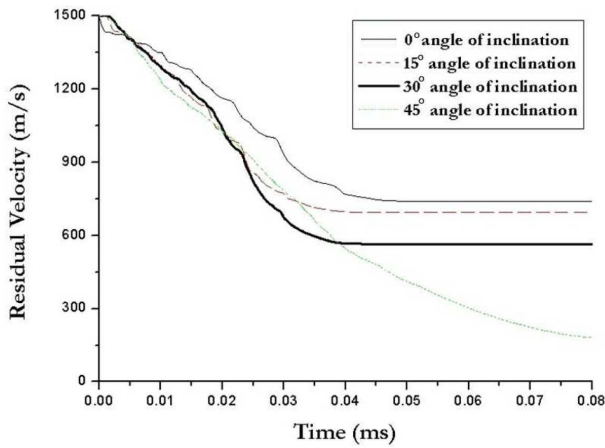
를 갖는 관통자에 따라 잔류질량은 대체로 동일한 결과를 보인다. 예를 들어 분절형 관통자의 경우 L/D가 1, 0.5, 0.25 일 때 각 15.6 g, 15.0 g, 14.8 g 으로 감소하였고, 단일형 관통자의 경우 16.2 g 으로 대략 동일한 잔류질량결과를 보인다. 하지만 관통자의 잔류속도는 상대적으로 다른 파괴메커니즘 결과를 보인다. 예를 들어 분절형 관통자의 경우 L/D가 1, 0.5, 0.25 일 때 각 945.0 m/s, 949.1 m/s, 980 m/s 인 반면, 단일형 관통자의 경우 833.6 m/s 로 가장 낮은 잔류속도를 갖는다. 이러한 잔류속도 증가는 속도의 제곱에 비례하는 관통자의 잔류운

동에너지를 고려한다면 상당히 영향을 미치는 인자이며, 이는 다음에 오는 n 차 관통여부와도 관계가 깊다.

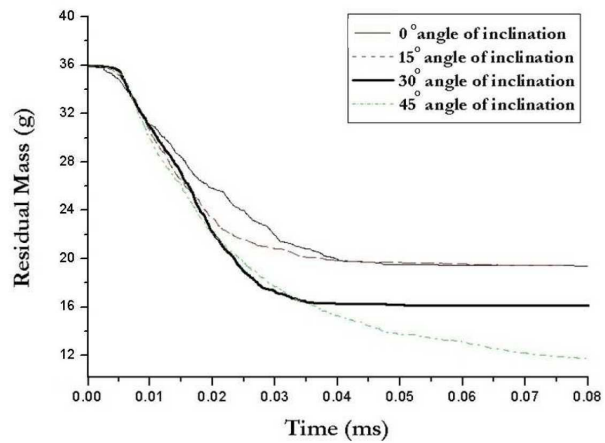
3.3 충격 입사각에 따른 관통성능

본 단락에서는 단일형 관통자와 분절형 관통자의 충격 입사각에 따른 관통해석이 수행되었다. 1.5 km/s 의 초기 충격속도와 0°, 15°, 30°, 45° 의 충격입사각이 L/D=4 인 단일형 관통자와 L/D=1 을 갖는 분절형 관통자에 적용되었다.

Fig. 11 과 Fig. 12 는 각 관통자의 관통해석 결과를 보여준다. 결과에서 보여지듯 관통자 모두 입사각의 증가에 따라 관통거동을 중 회전을 가지며 완전관통 후에는 편향됨을 알 수 있다. 이는 관통자의 관통거동 중 표적체와의 접촉계면에서 생성되는 상호작용에 의해 발생하는 것이다. 하지만 관통후 발생하는 관통자의 편향은 단일형 관통자보다 분절형 관통자에 더 크게 발생함을 알 수 있다. 예를 들어 45° 충격입사각의 경우 단일형 관통자는 약 106.1 m/s, 분절형 관통자의 경우 130.6 m/s 의 최대 편심 각속도가 발생하였다. Fig. 13 과 Fig. 14 는 관통 후 생성되는 단일형 관통자와 분절형 관통자의 잔류속도와 잔류질량 결과이다. 관통자는 전반적으로 입사각이 증가함에 따라 잔류질량이 미세하게 감소함을 보인다. 이는 관통거동 중 관통자와 표적체의 충돌영역의 증가로 인해 파편으로 파열되어 부서지는 질량이 증가하기 때문이다. 하지만 각 관통자에 따른 잔류질량은 상대적으로 다른 파괴메커니즘 결과를 보인다. 예를 들어 L/D=1 를 갖는 분절형 관통자일 경우 입사각이 15°, 30°, 45° 일 때 잔류질량은 각각 15.9 g, 15.1 g, 14.2 으로 감소하였고, L/D=4 를 갖는 단일형 관통자의 경우 입사각이 15°, 30°, 45° 일 때 잔류질량은 각각 20.3 g, 16.7 g, 12.7 g 으로 감소하였다. 입사각에 따른 해석결과는 동일한 질량인 단일형 관통자의 잔류질량이 상대적으로 크게 증가함을 보였다. 잔류속도는 앞서 다층 표적체에 대한 수직으로 관통해석을 수행한 것과 다른 상이한 결과를 도출하였다. 예를 들어 분절형 관통자일 경우 입사각이 15°, 30°, 45° 일 때 잔류속도는 각각 661 m/s, 485 m/s, 180 m/s 으로 감소하였고, 단일형 관통자의 경우 입사각이 15°, 30°, 45° 일 때 잔류속도는 각각 693 m/s, 564 m/s, 183 m/s 으로 감소하였다. 최대 약 80 m/s 의 잔류속도 격차를 보이며 전반적으로 단일형 관통자가 분절형 관통자보다 입사각에 따른 관통성능이 우수하다. 충격 입사각에 따른 분절형 관통자의 관통성능은 관통



(a) Residual velocity



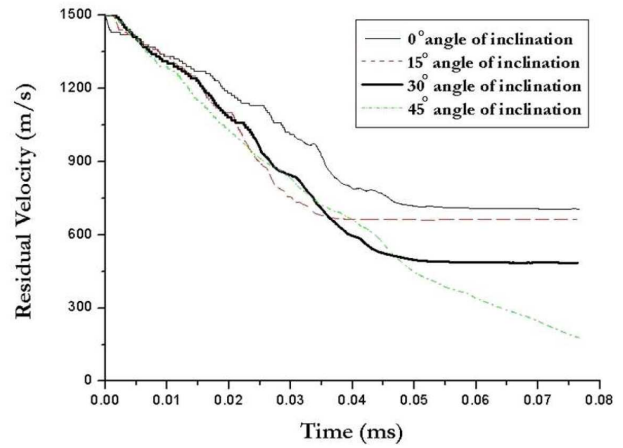
(b) Residual mass

Fig. 13 Results of residual velocity and mass under $L/D = 4$ unitary penetrator with different inclination angles

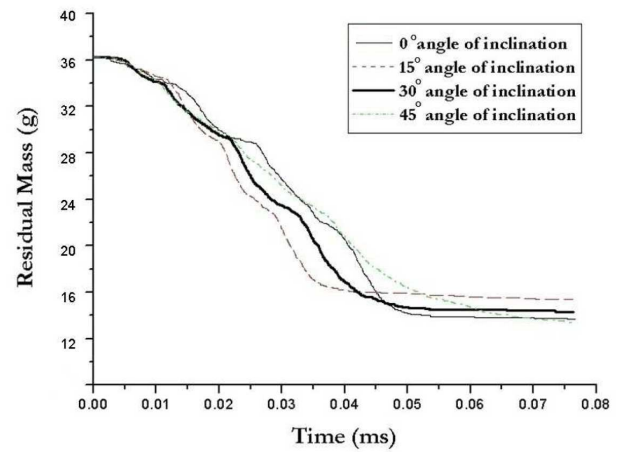
거동시 표적체와 관통자의 상호작용에 의해 단일형 관통자보다 저하된다. 이는 특히 관통자의 길이 축소로 인해, 분절형 관통자는 표적체와의 접촉계면에 따른 측방향 하중에 민감하게 반응한 것으로 인하여 크게 손상 되기 때문이다.

3.4 관통성능고찰

단일형 및 분절형 관통자에 대한 충격속도의 함수로서 다양한 표적체에 따른 관통결과는 관통깊이, 잔류질량, 잔류속도에 따라 비교 및 고찰되었다. 전반적으로 관통자 모두 관통깊이는 충격속도와 함께 증가한다. 하지만 주목해야 할 점은 특정 기하형상비의 분절형 관통자의 경우 단일형 관통자보다 수직 표적체에 대해 더 높은 관통성능을 보여준다는 것이다. 하지만 충격입사각에 따른 관통성능의 경우 분명 단일형 관통자가 분절형 관통자보다 관통성능이 우수하다. 이는 분절형 관통자가 상대적으로 단일형 관통자의 길이에 비해



(a) Residual velocity



(b) Residual mass

Fig. 14 Results of residual velocity and mass under $L/D = 1$ segmented penetrator with different inclination angles

상당히 축소되어 표적체와의 접촉계면에서 발생하는 측방향 하중에 매우 민감하기 때문이다. 분절형 관통자는 관통자의 감소된 길이와 그에 따른 분절체의 개수, 충격속도의 증가 등에 의해 관통성능을 높일 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 해석변수에 의한 단일형 관통자($L/D=4$)와 분절형 관통자($L/D=1, 0.5, 0.25$)의 관통성능 수치 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 해석 결과값이 실험적 데이터로 입증되지는 않지만, 현 수치 시뮬레이션의 중요한 목적은 단일형 관통자와 분절형 관통자 사이의 관통성능 비교이다. 본 연구에서 관통자와 표적체 사이의 상호작용 특성을 연구하였으며 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- (1) 초기 질량이 72 g 인 단일형 및 분절형 관통

자는 충격속도가 증가함에 따라 전반적으로 관통 깊이와 관통성능이 증가하였다.

(2) 특정 기하형상비(L/D=0.5)의 분절형 관통자는 단일형 관통자 보다 수직 표적체에 대해 더 높은 관통깊이를 보이며 관통성능이 향상되었다.

(3) 2.0 km/s 의 충격속도에서 분절형 관통자는 약 7%의 관통성능이 향상되었다.

(4) 단일형 관통자는 분절형 관통자보다 최대 80 m/s 의 잔류속도와 4.4 g 의 잔류질량 격차를 보이며 경사각에 따른 관통성능이 우수하다. 이는 분절형 관통자의 길이 축소로 인한 표적체와의 접촉계면에 따른 측방향 하중에 의해 손상되기 때문이다.

(5) 분절형 관통자의 관통 성능은 관통자의 감소된 길이와 그에 따른 분절체의 개수, 충격속도의 증가 등에 의해 향상된다.

참고문헌

- (1) Bjerke, T. W., Zukas, J. A. and Kimsey, K. D., 1992, "Penetration Performance of Disk Shaped Penetrators," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.12, No.2, pp.263~280.
- (2) Franzen, R. R., Walker, J. D., Orphal, D. L. and Anderson, C. E., 1994, "An Upper Limit for the Penetration Performance of Segmented Rods with Segment-L/D<1," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.15, No.5, pp.661~668.
- (3) Orphal, D. L., Anderson, C. E., Franzen, R. R. and Babcock, S. M., 1995, "Variation of Crater Geometry with Projectile L/D for L/D<1," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.17, No. 4-6, pp.595~604.
- (4) Normandia, M. J. and Lee, M., 1999, "Penetration Performance of Multiple Segmented-rods at 2.6 km/s," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.23, No.1, pp.675~686.
- (5) Herrmarm, W. and Wilbeck, J. S., 1987, "Review of Hypervelocity Penetration Theories," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.5, No.1-4, pp.307~322.
- (6) De Rosset, W. S. and Sherrick, T., 1996, "Segmented Rod Performance at Ordnance Velocity," ARL-MR-291 U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- (7) Hauver, E. and Melani, A., 1990, "Behavior of Segmented Rods During Penetration," BRL-TR-3129 Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- (8) Hohler, V. and Stilp, A., 1990, "Penetration Performance of Segmented Rods at Different Spacing: Comparison with Homogeneous Rods at 2.5-3.Skin/s," Proc. 12th Int. Symp. Ballistic, San Antonio.
- (9) 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.
- (10) Schwartz, W., 1990, "Reactive Armor," Proc. 10th Int. Seminar on Defense Science and Technology, pp.73~77.
- (11) Weihrauch, G. and Wollmann, E., 1993, "Segmented Penetrators," *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, Vol.18, No. 5, pp.270~274.
- (12) Jo, J. H., Lee, Y. S., Kim, J. H. and Bae, Y. W., 2012, "A Study on Hypervelocity Penetration Characteristics of Tungsten Cylindrical Penetrator," *Proceedings of the KSME 2012 Fall conference of the KSME*, pp.2131~2137.
- (13) Zukas J. A., 1990, *High Velocity Impact Dynamics*. New York: Wiley.
- (14) WWW1.ANSYS.COM, 2011, "ANSYS/AUTODYN-3D," 12.1 User's Manual, Material Models Chapter.
- (15) 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.
- (16) Jo, J. H., Lee, Y. S. and Jin, H. L., 2012, "Numerical Simulation of Steel/Kevlar Hybrid Composite Helmet subjected to Ballistic Impact," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.36, No.12, pp.1569~1575.
- (17) 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.