

최근의 운동에너지형 초고속 탄자 계발

이 민 형*

〈 목 차 〉

I. 서 론	나. Several Kinetic Projectiles
II. 본 론	III. 결 론
가. Hydrodynamics Impact Formulations	

I. 서 론

초고속 충돌(impact) 및 침투(penetration)에 관한 연구는 지난 약 30여 년간 지속되어 왔다. 과거에 이 분야는 미사일에 관한 기술, 우주 파편물로부터의 우주선 보호 또는 초고압에서의 물질의 반응 등에서 중요한 공헌을 하였으며, 최근에는 초고속 탄두(projectile) 및 armor plate의 계발에 공헌을 하고 있는 실정이다. 고성능의 탄두 계발시 고려하여야 할 사항으로는 탄두의 길이, 충돌속도 및 단면모양 등과 함께 계발된 탄두의 발사(launch)가능성 및 비행시의 안정성 등이 있다. 또한 최소한의 운동에너지로 최대의 효과를 거둘 수 있는지가 평가되어야 하는데 최대의 효과는 침투력의 증가 및 치사성(lethality)의 존재를 말한다.

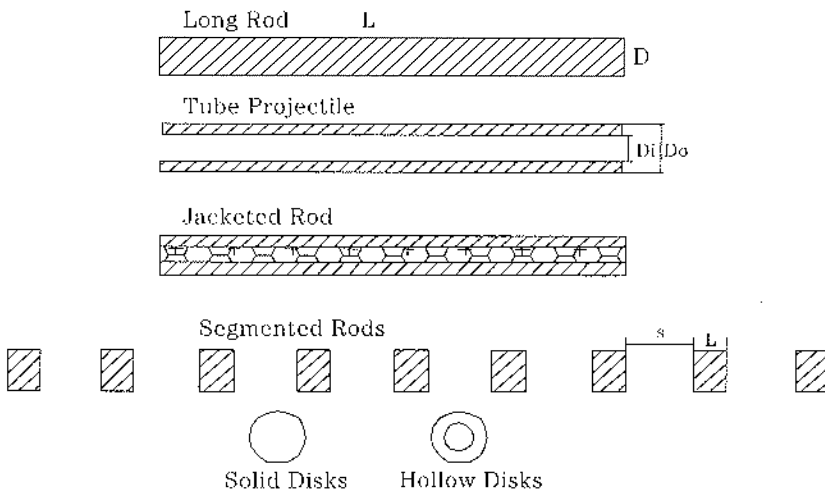
본고에서는 저자가 미국 텍사스 주에 위치한 육군연구소 근무시 직접 또는 다른 부서에서 다루었던 연구내용 중에서 특히 여러 형태로 새로이 고안된 탄두들의 침투력 성능을 비교 평가하는 내용을 소개하고자 한다. 성능평가지에는 주로 이상적

* 세종대학교 기계항공우주공학부 조교수

상태인 수직 정면충돌을 다루게 된다. 하지만 실제에는 비행시의 불안정성 또는 타겟이 각도를 가지기 때문에 yaw 각을 가지며 충돌하게 되는데 이러한 충돌현상에 대한 연구가 또한 진행되고 있다. 여기서 다루는 각 탄두들의 성능평가 내용으로는 크게 탄두의 충돌에 의해 고체 타겟에 생기는 침투깊이(penetration)와 구멍의 크기(hole diameter)이다. 문제의 접근방법으로는 이론, 수치계산 및 실험 등이 있는데 실험은 실제로 상당한 비용이 요구되기 때문에 다양한 실험을 수행하기에 어려움이 있다. 또한 연구가들에 의해 기본적인 형태의 이론들이 제시되고 있으나 state-of-art wavecode를 사용한 수치계산이 보다 활발히 다루어지고 있는 실정이다. 하지만 각각의 접근방법들이 장단점을 가지고 있고 경우에 따라선 한가지 방법만이 가능하기도 하기 때문에 서로 보완적인 위치에 있다고 볼 수 있다.

본고에서 다루고자 하는 탄두는 주로 텅스텐으로 만들어 졌으며 타겟은 반무한의 RHA(rolled homogeneous armor) steel, 그리고 충돌 속도범위는 1.5 km/s~3 km/s 이다. 이러한 속도에서 충돌 시 일어나는 현상으로는 충격파의 생성, 전파, compression, 소성 변형, crack 및 fragmentation 등이 있으며 더욱 고속에서의 충돌에서는 vaporization과 또한 상변화 등이 있다. 이러한 고속충돌에서는 탄두와 타겟의 충돌지역에서 생기는 초고압에 의하여 유체와 같은 성질을 가지며 나머지 부분은 고체의 성질을 가진다. 즉 고체의 강도보다 큰 압력이 형성 이 된다. 여기서 다루고자 하는 탄두들의 모양을 <그림 1>에 나타내었다. 형태에

<그림 1> 다양한 형태로 고안된 발사체



따라 크게 homogeneous와 non-homogeneous 탄두로 구분할 수 있는데, 순수한 Long rod와 Tube는 homogeneous 탄두에 속한다. Non-homogeneous 탄두에는 단면적이 원형인 Jacketed Rod, Segmented Rods와 Seg-tel 등이 있으며 또한 단면적인 임의의 형태인 타원형, triform과 십자형 등이 있다. 그러면 이러한 탄두들의 충돌 및 침투특성을 다루어 보자.

II. 본 론

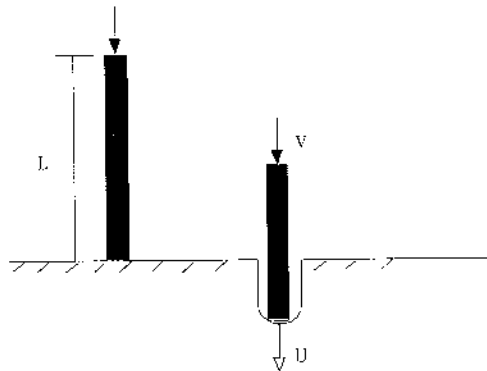
가. Hydrodynamics Impact Formulations

새로이 고안된 탄두들의 침투성능을 평가하기 전에 침투해석에 필요한 고속 충돌이론을 먼저 간단히 다루어 보자. 길이 L , 밀도 p_p 인 유체가 속도 V 로 정지해 있는 유체 (p_t)에 충돌할 경우를 고려해보자. <그림 2> 총 침투깊이(P)는 침투시간(t)을 고려함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\therefore \frac{P}{L} = \left(\frac{U}{V-U} \right) = \sqrt{\frac{P_p}{P_t}} \quad (1)$$

즉, 침투효율(P/L , 탄두 단위길이 당 침투깊이)는 두 충돌물체의 밀도만의 함수임을 알 수 있다. 만약 steel이 steel을 침투할 경우 최대로 침투할 수 있는 깊이는 탄두의 길이 만큼이 된다. 고속의 충돌에서는 동적 압력이 고체의 강도보다 매우 크기 때문에 고체의 강도가 무시한 베르누리 방정식이 사용되었다 [1].

<그림 2> 유체 - 유체의 충돌현상



고속에서만이 아니라 임의의 속도에서의 충돌 문제를 다루기 위하여 Tate [2] 와 Alekseevskii [3]가 고체의 강도를 고려한 일차원의 모델을 각각 독립적으로 제시하였는데, 이 이론은 긴 로드 (long rod)의 반무한의 고체 타겟 충돌문제 해석에 지속적으로 사용되고 있다. 고체의 탄두가 고체의 타겟에 충돌 시 충돌면에서의 압력은 변형된 베르누리 방정식을 사용하면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{2} p_r (V-U)^2 + Y_p = \frac{1}{2} p_t U^2 + R_t \quad (2)$$

여기서 Y_p 는 탄두의 동적 강도 (dynamic yield strength)이며, R_t 는 일차원 형태(수직 방향)의 침투에 대한 타겟 저항력인데 수평적 저항을 고려하기 위하여 타겟의 저항력보다 몇 배 큰 값이 사용된다. 이론에 근거를 둔 식이 여러 연구가들에 의해 유도되었는데, 예를 들면, Staphy and Bless [4]가 제시한 식은 다음과 같다.

$$R_t = -\frac{2}{3} Y_p n \left(\frac{Y}{2G} \right) + \frac{2}{3} Y \quad (3)$$

식 (2)는 동압력 뿐만 아니라 고체의 강도를 고려한 형태로서 저속의 충돌에서도 사용되는 보다 일반화된 형태이다. 식 (2)를 정리하여 순간 고체 침투 속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U = \frac{1}{1-\mu^2} \left[V - \mu \sqrt{V^2 + A} \right] \quad (4)$$

$$\text{where, } \mu = \sqrt{\frac{p_t}{p_r}}, A = \frac{2(R_t - Y_p)(1-\mu^2)}{p_t} \quad (5)$$

초고속 충돌에서는 충돌면에서의 동압이 고체의 강도에 비해 매우 크기 때문에 강도는 무시가능하며 이런 경우 식 (1)은 식 (2)의 특별한 경우에 해당한다.

나. Several Kinetic Projectiles

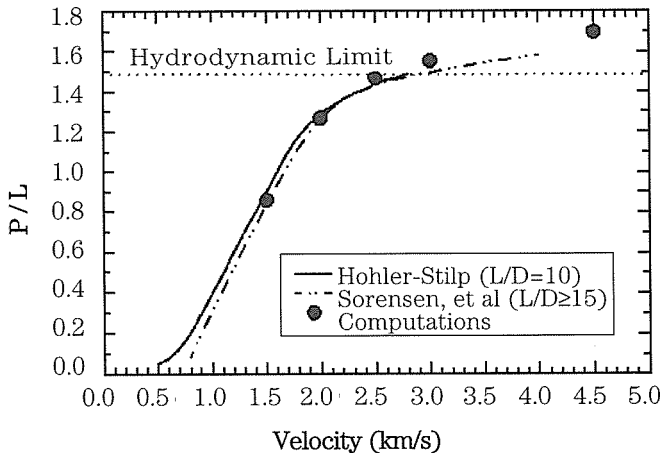
1. Long-Rods

(1) 침투 깊이(P)

오랫동안 연구되어진 대표적인 침투용 탄두로는 큰 운동에너지를 이용한 원형단면의 long-rod가 있다. 모양이 단순하면서도 많은 장점이 있는 이유로 새로운 탄두의 성능을 검사할 때 비교자료로 사용되고 있을 뿐만 아니라 고속충돌 시에만 나타나는 특별한 현상을 다룰 때 자주 사용되는 기본 형태이다. 특히 최근에는 길이가 아주 긴 ($L/D > 30$) 탄두의 개발을 고려하고 있다. 여기서 D 는 rod의 지름에 해당한다. 하지만 비행시의 안정성 등 여러 문제가 현실적으로 존재한다.

텅스텐 합금($p_p=17400\text{kg/m}^3$)의 긴 rod가 단단한 철($p_t=7800\text{kg/m}^3$)에 충돌하는 경우 침투깊이를 rod의 길이(L)로 무차원화하여 충돌속도의 함수로 <그림 3>에 나타내었다 [5]. 직선은 $L/D=10$ 인 rod에 해당하고, 점선은 $L/D > 15$ 인 rod에 해당한다. <그림 3>으로부터 여러 가지를 알 수 있는데, 먼저 정상상태의 hydrodynamic limit(최대 깊이, 참조 식 (1))는 $\sqrt{p_p/p_t}=1.49$ 이다. 또한 짧은 rod의 침투효율이, P/L , 긴 rod보다 좋은 것을 알 수 있는데 이것은 잘 알려져 있는 현상으로 연구가들에게 많은 아이디어를 제공하고 있다. 이 내용은 뒤에서 자세히 다루고자 한다. 특이한 현상으로는 충돌속도가 3.0 km/s 이상이 되면 침투깊이가 hydrodynamic limit 보다 커진다는 것인데, 이것을 다음과 같은 두 가지 방향

<그림 3> 텅스텐 탄두의 스틸 침투력

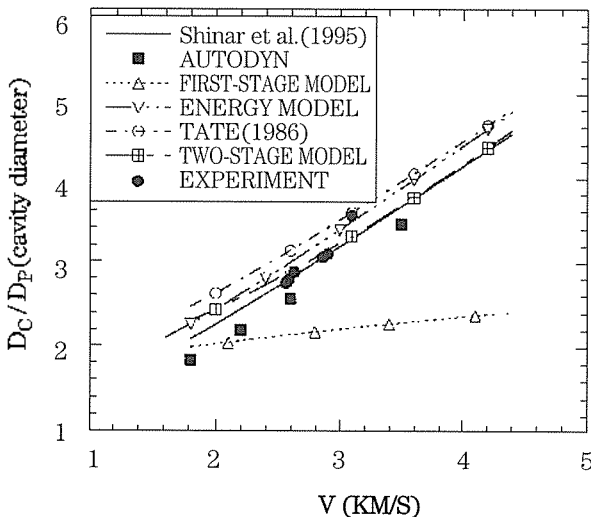


으로 설명이 되고 있다. 첫째 방법은 식 (2)가 타당하다고 보는 관점이며 반면에 R_i 를 속도의 함수로 가정하여 다음과 같이 설명한다 [5]. R_i 가 T_p 로 접근할 때 P/L 은 hydrodynamic limit로 접근하며 P/L 이 이 한계를 넘기 위해서는 R_i 가 Y_p 보다 작아야 한다. 그러므로 고체의 저항력 R_i 는 그 물질의 고유성질이 아니라 충돌속도의 함수이거나 또는 충돌에 의한 물질의 변형률의 함수라고 설명한다. 둘째 방법은 변형된 베르누리 방정식 (식 (2))에 어떤 오류가 존재하는 것으로 보는데 그 이유는 R_i 를 그 물질의 고유 물성치라고 보기 때문이다. 하지만 식 (2)는 이러한 한계점을 내포하고서도 긴 로드의 침투력 해석의 훌륭한 방향을 제시하고 있으며 또한 많은 연구가들에 의해 지속적으로 사용되고 있다.

(2) 구멍의 크기 (D_c)

타겟에 생기는 구멍의 지름은 로드의 내부침투 성능에 중요한 영향을 미치고 또한 탄두의 성능 평가의 지수가 되는 관계로 많은 연구가 이루어져 왔다. 여러 가지의 실험에 의한 경험식 뿐만 아니라 간단한 이론이 제시되었다. 운동량 평형이론에 기초를 둔 이론이 Szendrei [6]에 의해 그리고 에너지 보존에 기초를 둔 이론이 Tate에 의해 각각 만들어졌다. Shinar [7]등은 공동의 형성과정을 두 가지 과정의 합으로 가정하여 간단한 식을 제시하였다. 또한 Bjerke [8]등은 실험으로 측정된 구멍의 크기

〈그림 4〉 텅스텐 탄두에 의한 스틸에 생기는 구멍의 크기



를 이차원 식으로 만들었다. 최근에 Lee [9] 등이 에너지보존과 운동량보존에 기초를 둔 이론을 제시하였다. 로드의 반경으로 표준화된 최종 구멍의 반경식들이 Lee [9]에 알려져 있다. 그리고 각 이론의 내용은 각각의 논문을 참조하기 바란다. 이식들을 비교하여 구멍의 반경을 속도의 함수로 <그림 4>에 나타내었는데 예측된 값들이 상당히 일치함을 알 수 있다. 충돌속도가 증가함에 따라 구멍의 크기는 증가하는데 2.6km/s에서 구멍의 크기가 로드반경의 약 3배로 커짐을 알 수 있다.

2. 튜브형 탄두(Tubular Projectiles)

최근에 긴 튜브형(내부가 공동) 탄두에 대한 연구가 이루어지고 있는데 [9, 10]. 연구배경으로는 이 형태가 다음과 같은 점을 내포하고 있을 것으로 간주되었기 때문이다. 첫째로는 길이, 외부 반경, 그리고 밀도가 같으면 속이 차있는 로드보다 질량이 작기 때문에 작은 추진력으로도 발사가 가능하거나 또는 고속(큰 운동에너지를 가짐)으로 비행시킬 수 있다. 둘째로는 타겟 내부 침투시 타겟의 파편을 튜브 내의 공동으로 배출이 가능하기 때문에 진입 저항이 로드보다 작을 것으로 생각되어 작은 운동에너지로도 침투력을 증가시킬 수 있다[11]. 그러면 튜브형 탄두의 침투력 및 타겟에 생기는 구멍의 크기를 비교하여 실제로 본 탄두의 성능상의 개선이 있는지를 알아보자.

먼저 튜브형 탄두에 의해 생기는 구멍의 크기는 Lee [9]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{a_c}{r_p} \sqrt{\frac{1/2 p_p V^2 (V-U) \lambda^2 (R_t - Y_p)}{R_t U R_t}} \quad (6)$$

여기서, $\lambda(D_t/D_p)$ 는 튜브의 지름비이다. 만약 λ 가 0 이면(로드에 해당한다), 식 (6)은 로드에도 적용이 되므로 더욱 일반화된 형태이다. 튜브의 침투속도 U_{tube} 가 알려지면 구멍의 크기는 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다. 하지만 식 (4)는 로드의 진입속도 (U_{rod})이므로 새로운 식이 요구된다. 여기서는 로드와 튜브 각각의 침투 효율을 비교함으로써 튜브의 침투속도를 다음과 같이 구할 수 있다고 가정한다.

$$\frac{(P/L)_{tube}}{(P/L)_{rod}} = \frac{(U/(V-U))_{tube}}{(U/(V-U))_{rod}} = \eta \quad (7)$$

$$\therefore U_{tube} = \frac{\eta V U_{rod}}{V - (1-\eta)U_{rod}} \quad (8)$$

그러면 같은 길이, 밀도 및 질량을 가진, 하지만 지름비를 달리하는 튜브들을 비교하여 보자. 질량을 같이하는 튜브들의 유효 지름은 다음과 같이 구하여진다.

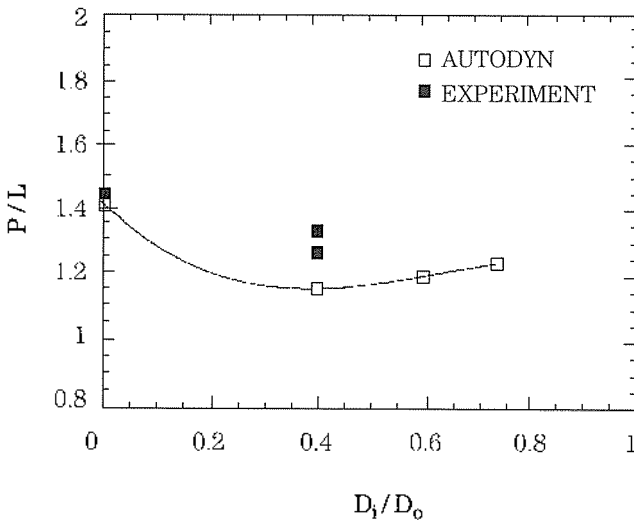
$$D_{eff} = D_o \sqrt{1 - \left(\frac{D_i}{D_o}\right)^2} \quad (9)$$

여기서 길이를 78mm로 고정할 때 여기서 고려되어진 지름비를 <표 1>에 나타내었으며 또한 이들의 침투효율을 <그림 5>에 나타내었다.

<표 1> 튜브형 비행체의 지름비

D_i/D_o	0	0.4	0.5	0.6	0.74
$D_i(mm)$	0	4.25	4.50	5.85	8.58
$D_o(mm)$	7.8	8.51	9.01	9.75	11.60

<그림 5> 튜브형 비행체의 침투효율



비교 목적으로 같은 질량을 가진 로드와 비교하여도 표시하였는데 그림으로부터 다음과 같은 결과를 추론할 수 있다. 첫째, 침투 효율면에서 튜브는 rod보다 나쁘다. 내부 반경이 커질수록 효율이 나빠지는데 약 $\lambda=0.4$ 에서 로드성능의

70%($\eta=0.7$)에 해당하며 내부 반경이 더욱 커지면 다시 rod의 효율로 접근함을 알 수 있다. 즉, 로드와 같은 질량과 길이를 가진 튜브는 침투력에서 장점이 없음을 보여준다. 다음으로 튜브의 침투에 의해 타겟에 생기는 구멍의 크기를 조사하여 보자.

지름비 $\lambda=0.5$ 인 경우, η 는 약 3/4에 해당하는데 이 값을 사용하여 식 (8)으로부터 튜브의 침투속도를 구하면 다음과 같다.

$$U_{tube} = \frac{3V U_{rod}}{4V - U_{rod}} \quad (10)$$

이 경우, 속도에 따른 구멍의 크기를 탄두의 유효지름으로 표준화하여 구한다. 결과만을 소개하면 튜브형 탄두에 의해 만들어진 구멍의 지름이 rod에 의한 것보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 즉, 튜브형 탄두는 침투효율이 감소하는 반면에 조금 큰 구멍을 생성함을 알 수 있다. 여러 가지 발사할 수 있는 기술적인 면을 고려하지 않고, 또한 구멍의 크기보다 침투효율이 중요한 경우에는 튜브형 탄두가 좋은 디자인 형태가 아님을 본 연구결과는 제시하고 있다. 하지만 여러 가지 점을 고려하지 않은 단적인 비교였으며 보다 자세한 연구가 필요하다.

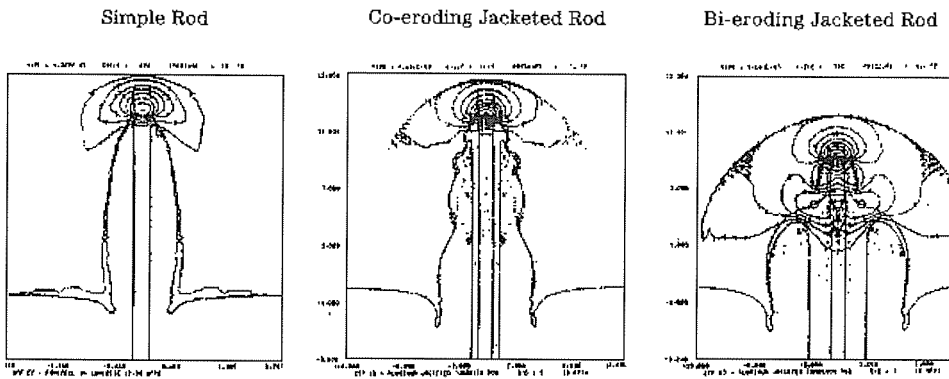
3. Jacketed Projectiles

서론에서 언급하였듯이 상당히 긴 탄두의 계발을 추진중인데 이러한 형태 또한 문제점이 있다. 긴 로드를 비행시킬 경우 딱딱한 정도(stiffness)가 낮아지므로 발사시 또는 비행 중에 Fracture와 같은 심각한 문제를 내포하고 있다. 따라서 이러한 점을 개선하기 위하여 고안된 형태가 내부 core에는 밀도가 높은 물질로 외부에는 밀도가 낮은 물질로 이루어진 Jacketed Rods 이다(그림 1 참조). 최초로 고안될 당시 이 형태가 다음과 같은 장점을 가진 것으로 간주되었다. 첫째, 밀도가 높은 재료로만 이루어진 순수 로드와 비교하여 같은 길이와 질량을 가지면 반경이 커지는데 이 경우 L/D 가 낮아진다는 장점이 있다. 둘째로는 같은 길이와 반경을 가진다면 총 질량이 작아진다. 이러한 장점을 내포하는 Jacketed Rods의 최대 기대치는 밀도가 높은 물질로만 즉 텅스텐 합금으로 이루어진 탄두와 대등한 침투효율을 가지는 것이다.

Jacketed Rods의 침투시 내부 코어에 대한 외부 자켓의 두께비에 따라 다른 두 가지의 침투 현상이 일어나는데 그것들은 "Co-erosion" 과 "Bi-erosion" 이라고

명한다. 단순 로드의 침투 및 윗 두 가지의 침투 현상을 <그림 6>에 나타내었다. "Co-erosion"의 경우 외부 자켓의 두께가 작아서 타겟과의 충돌지역이 하나만 생기는 경우이다. 즉 정체점이 하나이다. 반면에 "Bi-erosion"의 경우 외부 자켓의 두께가 커서 타겟과의 충돌지역이 두 개가 생기는 경우이다. 즉 core부분과 외부 자켓에 각각의 충돌지역이 형성된다. 이 경우 외부 자켓은 밀도가 낮은 재질이라서 침투 속도가 늦어지기 때문에 침투효율의 감소가 일어난다. "Co-erosion"에서 "Bi-erosion"으로 바뀌는 경계점에 (onset condition) 대한 해석이 Lee [12]에 의해 제시되었다.

<그림 6> Jacketed Rods의 두 가지 침투형태



4. Segmented Rods

최근에는 또한 <그림 1>에서와 같이 긴 로드를 여러 개의 원반형태로 나누어 타겟에 충돌하는 탄두(Segmented rods)에 상당한 관심이 몰리고 있다. 이 형태의 연구배경으로는 긴 로드보다 짧은 ($L/D \approx 1$) 탄두가 침투효율이 높음을 여러 실험 결과에서 나타나고 있다. 여기서 L 는 길이이며 D 는 지름이다. 질량, 반경 그리고 충돌속도(고속)가 같은 경우, 예를 들면 $L/D=10$ 인 로드를 10개의 $L/D=1$ 원반 형태로 만들어 일정한 공간(spacing)을 두고 발사하면 다중원반탄두가 2배 이상의 타겟 침투효율을 낸다. 원반형 탄두의 중요한 결과를 먼저 열거해 보면 고속에서 그리고 낮은 종횡비에서 최대의 효과를 내고 있다. 본 탄두는 효율의 향상을 볼 수 있는 반면에 이러한 다중 탄두를 실제로 발사하는데 필요한 기술적인 문제가 현실적으로 존재하는 것도 사실임을 묵과할 수 없다. 그러면 Segmented Rods에 관

한 여러 연구방향과 그 결과를 검토하여 보자.

(1) 원반 (Single & Multiple Solid Disks)

먼저 얇은 단일 원형탄두의 침투효율을 알아보자. 91% 텅스텐 합금의 원반형 탄두($L/D=1/2, 1/4, 1/8, 1/6$ 또는 $1/32, D=25.4$ mm)가 반무한의 RHA steel 타겟에 충돌할 경우의 실험치를 <표 2> [13]에 나타내었다. 작은 종횡비 (L/D , aspect ratio)를 가진 원반은 비행 중 안정성이 낮은 관계로 실험 시 정면 충돌 현상을 재현하기에 어려움이 있음을 또한 주의하여야 한다. 실험 결과에 의하면 2 km/s의 충돌속도에서는 $L/D=1/8$ 의 원반이 가장 큰 침투효율($P/L \approx 4.7$)을 보이고 있다. 이 침투효율은 긴 rod의 침투효율 (그림 3 참조)과 비교하여 약 3.5 배에 해당한다. 하지만 구멍의 크기는 긴 rod에 비해 작아짐을 알 수 있다. 즉, 원반형 탄두는 작은 구멍을 만드는 댓가로 침투효율이 향상된다.

<표 2> 텅스텐 원형의 RHA 침투효율

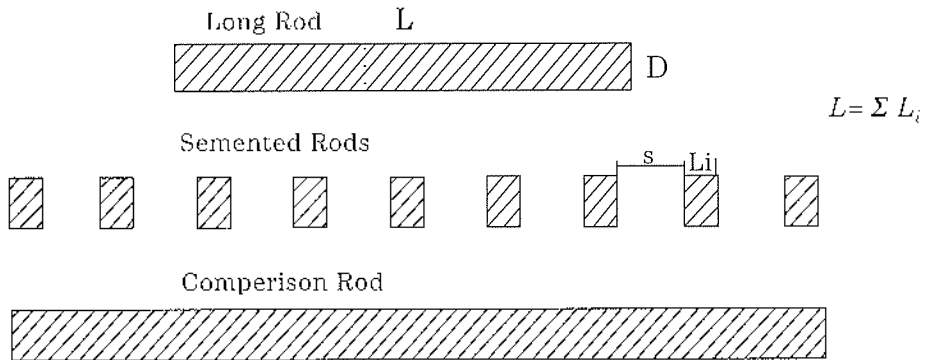
L/D	Velocity (m/s)	Yaw (deg)	P (mm)	P/E (mm/MJ)	PL	D_c (mm)
1/2	2042	4.3	33.0	105.2	2.5	66.0
1/4	2100	4.0	19.3	157.4	3.0	49.8
1/4	2044	1.2	19.6	168.7	3.1	51.8
1/4	2015	3.8	18.1	160.3	2.8	55.9
1/8	1931	3.0	13.1	254.6	4.1	37.3
1/8	2040	7.4	16.4	285.6	5.2	39.4
1/8	2036	2.3	18.5	323.4	5.8	41.9
1/8	1996	2.0	13.1	238.3	4.1	41.4
1/6	2004	10.4	6.9	249.0	4.3	29.5
1/32	1958	12.6	2.3	176.5	2.9	27.9

그러면 단일 원반형 탄두가 가지는 증가한 침투효율이 일정한 공간을 두고 충돌하는 다중원반에서도 계속 나타나는지에 관한 연구가 보다 실제적인 문제이다. 가장 기본적인 연구내용은 다중원반 침투효율의 최대치와 최소치를 알고자 하는 것

이다. 즉 다중 원반의 침투효율을 "parent rod" 와 "comparison rod" 의 효율과 비교하는 것이다 (그림 7). 여기서 "parent rod" 는 다중원반들 사이의 공간을 없앤 하지만 같은 질량을 가진 긴 로드이며, "comparison rod" 는 다중원반들 사이의 공간을 포함한 총 길이로 이루어진 하나의 긴 로드로 이루어졌다. Fransen [14]의 결과는 다음과 같다.

$$\left(\frac{P}{L}\right)_{\text{parent-rod}} < \left(\frac{P}{L}\right)_{\text{segmented-rod}} < \left(\frac{P}{L}\right)_{\text{comparison-rod}} \quad (11)$$

〈그림 7〉 Segemented Rods의 형태



그러면 parent rod와 비교하여 실제로 얼마나 향상된 효율을 보이느냐에 대한 연구가 수행되는데 첫 번째의 질문은 n 개의 원반을 일정공간을 두고 충돌할 경우 침투효율이 단일 원반 침투효율의 n 배가 될 것인가 하느냐이다. 결과는 매우 부정적이며 그 이유로는 제작과 발사상의 문제를 제외하더라도 원반들 사이의 공간 [14], 일직선 정렬 (alignment), 작은 구멍의 지름 [15], 그리고 타겟 구멍 벽에 남아있는 원반의 잔류물 [16] 등이 있으며, 또한 이들의 복합적 원인들에 기인할 수 있다. Hohler and Stilp [15]은 $L/D=1$ 의 다중원반을 2.5km/s에서 실험하였는데 침투효율은 단일효율의 n 배의 90% 이다. 이러한 효율감소의 원인을 다음과 같이 그들은 설명하고 있다. 일직선 정렬의 문제로 후속원반의 일부가 타겟의 정확한 내부 중앙에 충돌하지 못하고 옆 벽면에 충돌하기 때문에 침투력의 감소가 나타났다. 이 실험에서는 정확한 alignment를 조절하기 어려운 관계로 원반의 잔류물

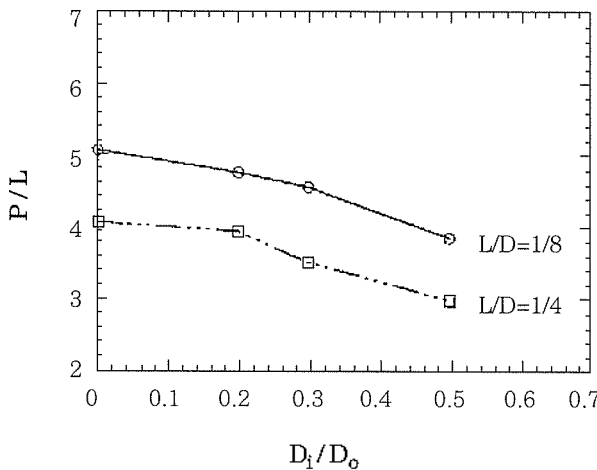
에 의한 침투효율 감소 현상을 규명하기 힘들다. 가장 이상적인 조건에서 완전한 alignment와 공간 임의 조절, 이 현상을 규명하기 위한 수치계산이 최근에 수행되었다 [17]. 하지만 결과 역시 침투효율의 감소를 보였다. 원인으로서는 타겟 구멍 벽에 남아있는 원반의 잔류물로 규명하고 있는데 내부 잔류물을 제거한 별개의 수치계산을 실행하여 검증할 수 있었다.

(2) 와셔 (Hollow Disks)

앞에서 언급하였듯이 다중원반의 경우 잔류물이 후속원반 침투에 저항적인 역할을 하여 침투효율이 감소됨을 알아보았는데 그러면 이러한 잔류물을 최소화시켜 침투효율을 높이기 위하여 내부가 공동인 다중 와셔형 원반의 진입역학 연구가 최근에 이루어지고 있다 [18]. 즉 내부가 비어있으므로 침투 후 타겟 바닥에 잔류물이 최소화시킬 수 있다는 아이디어이다. 또한 작은 질량으로 높은 침투효과를 내고자한다.

먼저 단일 와셔의 침투성능을 알아보자. 지름비 (D_i/D_o)를 달리하는 $L/D=1/4$ 과 $1/8$ 의 공동원반이 RHA steel 타겟에 충돌시의 침투효율을 <그림 8>에 나타내었다. 원반의 효율도 나타내었다. 대표적인 결과로는 와셔의 침투성능이 원반보다 나쁘다는 것이다. 예를 들면, $D_i/D_o=0.5$ 인 경우 질량이 원반형의 75%에 해당하나 침투효율에서도 약 75%에 해당한다. 단일 성능은 아무런 개선을 보이지 않으나

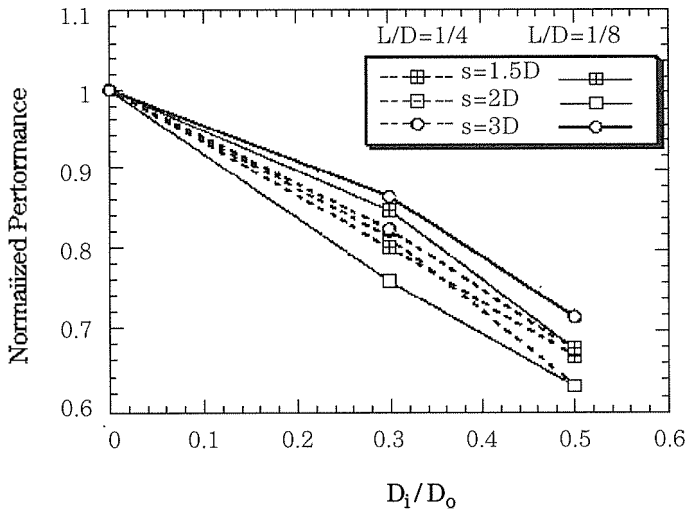
<그림 8> 단일원반 및 와셔의 침투효율



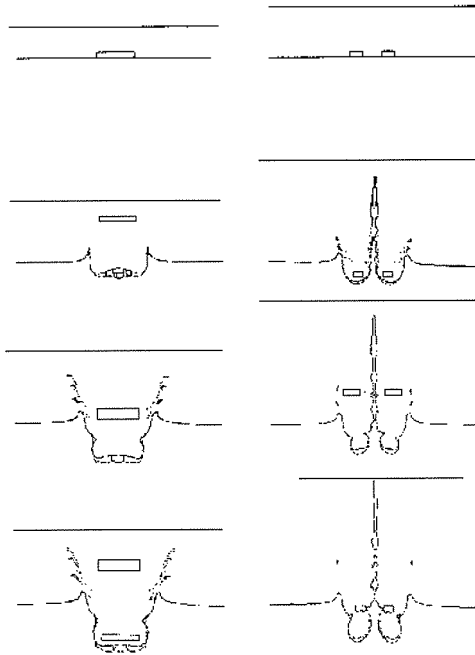
실제 필요한 자료는 다중와셔 침투효율이다. 앞서서도 설명하였듯이 잔류물이 적은 관계로 성능이 개선될 여지가 많다고 여겨졌다.

그러면 다중와셔의 침투효율은 얼마나 향상되었는지 알아보자. <그림 9>에 지름비에 따른 다중와셔의 효율을 원반형의 효율로 무차원화하여 나타내었다. 예상치 못한 결과로 다중와셔 경우에도 원반과 비교하여 침투효율이 향상되지 못한다는 것이다. 예를 들면, $D_1/D_0=0.5$ 인 경우 질량이 원반형의 75%에 해당하나 침투효율에서는 약 70%에 불과하다. 다시 말하면 연구 시작시 착안되었던 작은 질량과 작은 잔류물 등의 장점들도 불구하고 아무런 성능적 향상을 보이지 못하고 있다. 그러면 왜 아무런 향상이 없는지를 알아보기 위하여 다중와셔의 충돌과정을 <그림 10>에 나타내었다. 와셔의 경우 특이한 현상이 관측되고 있다. 즉 와셔의 공동으로 타겟의 파편이 분출되어 세 번째와 그 뒤로 계속 비행하는 와셔들이 이 파편물과의 충돌에 의하여 운동에너지를 손실하고 있다. 이러한 현상은 긴 튜브형 탄두에서도 관찰되어졌다. 이러한 충돌 현상에 대한 실험적 검증이 필요하나, 실험에서는 이상적인 정면 충돌 현상을 재현하기에 어려움이 있기도 하다. 즉 완전한 평행선 비행조건을 만족시키지 못한다.

<그림 9> 와셔의 지름비에 따른 다중와셔의 침투효율



〈그림 10〉 다중원반 및 다중와셔의 지속적인 침투현상



Ⅲ. 결 론

본 고에서는 여러 가지 형태로 교안된 탄두들의 침투 현상 및 침투 성능을 알아보았다. 이러한 내용들은 이전부터 연구되어졌으며 또한 현재 진행중인 분야이다. 기본적으로 긴 로드와 간단한 형태인 관계로 오래전부터 연구되어졌으며 이 형태로부터 조금씩 다른 모양의 탄두가 교안이 되었다. 먼저 결과를 요약하면 다음과 같다.

긴 로드와 비교하여 튜브형 탄두는 침투력 향상이 없다. 하지만 사용 용도에 따라 유용하게 사용될 수 있는 분야가 있으리라 여겨진다. Jacketed Rods는 적당한 두께의 저밀도 물질을 사용함으로써 탄두가 길어지면서 야기되는 Fracture 와 같은 문제를 극복할 수 있다. 긴 로드를 여러 개의 원반으로 나누어 발사하는 Segmented Rods는 로드와 비교하여 같은 운동에너지이지만 침투력의 향상을 가져온다. 침투력의 최대치를 얻기 위하여 더욱 연구가 필요한 분야이다. 하지만 실제로 이러한 탄두를 발사할 수 있는 기술상의 문제도 존재한다.

운동에너지형 고속탄두는 고속으로 인한 큰 운동에너지를 이용해 불체를 침투 및 관통하는데 사용된다. 하지만 이러한 충돌해석의 연구는 단지 발사체 개발 분야 뿐만 아니라 실제로 볼 수 있는 고속 및 저속 충돌문제, 파편물의 우주선 충돌, 그리고 충격파를 이용한 재료처리 기술 등에 응용이 된다.

References

- [1] Birkhoff, G. and Zarantonello, F.H., 1948, *Jets, Wakes, and Cavities*, Academic Press, New York, pp. 45-48.
- [2] Tate, T., 1986, "Long-Rods Penetration Models-Part II. Extensions to the Hydrodynamic Armor Penetration," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 28, No. 9, pp. 599-612.
- [3] Alekseevskii, V. P., 1966, "Penetration of a Rod into a Target at High Velocity," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 2, No. 2, pp. 99-106.
- [4] Satapathy, S. and Bless, S. 1996, "Quasi-Static Penetration Tests of PMMA: Analysis of Strength and Crack Morphology," *Journal of Mechanics of Materials*.
- [5] Anderson, C.E., Littlefield, D. and Walker, J.D., 1993, "Long-Rod Penetration, Target Resistance, and Hypervelocity Impact," *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 14, pp. 1-12.
- [6] Szendrei, T., 1983, "Analytical Model for Crater Formation by Jet Impact and Its Application on Penetration Curves and Profiles," 7th International Symposium on Ballistics, Hague.
- [7] Shinar, G.I., Barnea, N., Ravid, M. and Hirsch, E., 1995, "An Analytical Model for the Cratering of Metallic Targets by Hypervelocity Long Rods," 15th International Symposium on Ballistics, Israel.
- [8] Bjerke, T.W., Silsby, G.F., Scheffler, D.R. and Mudd, R.M., "Yawed Long-Rod Armor Penetration," *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 281-292.

- [9] Lee, M., and Bless, S., 1998 "Cavity Models for Solid and Hollow Projectiles", in press. *Int. J. of Impact Engineering*.
- [10] Franzen, R.R. and Schneidewind, P.N., 1991, "Observations Concerning the Penetration Mechanics of Tubular Hypervelocity Penetrators," *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 289-303.
- [11] Lee, M. and Subramanian, R. 1996, "Projectile Flow of Tube Penetration in a Tunnel," IAT. R 0095, Institute for Advanced Technology, Austin, TX. May.
- [12] Lee, M. 1997, "Model of the Penetration of Jacketed Projectiles," Structures Under Extreme Loading Conditions, ASME PVP-Vol. 351, pp 229-234.
- [13] Bjerke, T.W., Zukas, J.A. and Kimsey, K.D., 1992, "Penetration Performance of Disk Shaped Panatrators," *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 263-280.
- [14] Fransen, R.R., Waler, J.D., Orphal, D.L. and Anderson, C.E., 1994, "An Upper Limit for the Panatration Performance of Segmented Rods with Segment- $L/D \leq 1$," *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 661-668.
- [15] Hohler, V. and Stilp, A., 1990, "Penetration Performance of Segmented Rods at Different Spacing: Comparison with Homogeneous Rods at 2.5-3.5km/s," Proceedings of the 12th International Ballistic Symposium, San Antonio, USA
- [16] Hauver, E. and Melani, A., 1990, "Behavior of Segmented Rods During Penetration," BRL-TR-3129, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. July.
- [17] Normandia, M. J. and Lee, M. 1997, "Penetration Performance of Multiple Segmented Rods at 2.6 km/s," IAT. R 0115, February.
- [18] Lee, M., 1997 "Panetration Performance of the Train of Solid and Hollow Disks," Recent Advances in Solids/Structures and Applications of Metallic Materials, PVP Vol. 369, pp. 65-71.