

# EFP 관통자 특성과 비행 안정성에 대한 연구

이 영 선<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

## Research on the Penetrator Characteristics and Flight Stability of Explosively Formed Penetrator

Youngsun Yi<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 17 February 2020 / Revised 26 May 2020 / Accepted 12 June 2020)

### Abstract

EFP composed of explosive, charge and liner generally penetrates standoff a target by Monroe effect. Its performance highly depends on penetrator characteristics and flight stability. Penetration ability can be dramatically reduced when the penetrator reaches the target with AOA, even if the penetrator has high kinetic energy and L/D ratio. Therefore, it is important to research not only penetrator characteristics and but also flight stability. In this work, the effect of liner shape on penetrator characteristics was examined using free flight test and numerical tools. It was found that tip velocity of penetrator was increased with decreasing liner thickness. It was also found that thicker liner had higher static margin leading to better flight status.

Key Words : Explosively Formed Penetrator(폭발성형관통자), Penetrator Characteristic(관통자 특성), FEM(유한요소해석), Free Flight Test(비행시험), Flight Stability(비행 안정성)

### 1. 서론

화약과 탄체 그리고 관통자를 형성하는 라이너로 구성되어 있는 EFP(Explosively formed penetrator)는 화약의 화학 에너지를 접시 모양의 라이너에 전달하여 형성된 관통자의 운동 에너지로 타겟을 관통하는 지향성 탄두의 한 종류이다(Fig. 1). 이러한 EFP는 Shaped

charge와 비슷한 구조를 가지고 있는데 사용 거리와 요구되는 관통력에 따라 사용되는 종류가 다르다. 일반적으로 Shaped charge는 관통자가 축 방향으로 길게 연신되고 관통자의 속도는 8~10 km/s로 발달되어 주로 근거리에서 있는 강도가 강한 물체를 관통하는데 사용되는 반면 EFP는 상대적으로 관통자의 연신되는 길이가 짧고 원거리에 위치한 타겟을 관통하는데 사용된다<sup>1)</sup>.

EFP의 관통 능력은 관통자의 운동 에너지와 관통자의 형상으로 판단할 수 있는데 관통자의 운동 에너지

\* Corresponding author, E-mail: piandexp@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

나 세장비(L/D)가 커질수록 타겟을 효율적으로 관통할 수 있다. 관통성능을 증대시키기 위해선 관통자 형성 특성에 영향을 주는 설계 요소들에 대한 이해가 필수적이다. 라이너, 화약 그리고 탄체와 같은 주요 파트에 대한 형상과 재료 변화에 따른 관통자 설계 연구는 오랫동안 활발히 진행되어 왔다<sup>[2,3]</sup>.

EFP는 일반적으로 원거리를 비행하기 때문에 비행 안정성 또한 관통 능력의 하나로 고려해야한다. 타겟을 관통하기에 충분한 운동 에너지와 세장비를 가진 EFP를 설계했다라도 형성된 관통자가 타겟에 경사각(Angle of attack)을 가지고 조우하거나 관통자가 분리된 채로 형성되면 관통성능이 줄어들기 때문이다. EFP의 관통력 향상의 일환으로 정적/동적 비행 안정성을 증대하기 위해 관통자 앞부분의 항력을 줄이는 유선형으로 설계하거나 관통자 뒷부분에 날개 형상을 설계하는 연구들이 진행되어 왔다. 1993년 Klaus Weimann는 화약부 높이와, 탄체 두께 변화, 기폭점 위치에 따른 관통자 특성을 연구하였다<sup>[4]</sup>. EFP 관통자는 길이가 길어지면 두꺼운 타겟 공격에 유리하지만 경사각을 갖게 될 가능성이 있기에 이를 고려한 설계가 필요하다는 연구를 발표하였다. 2019년 Klatt 등은 EFP의 비행시험결과와 풍동 시험 결과를 토대로 In-house 6 DoF simulator와 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics)인 Fluent를 활용하여 비행체적과 비행안정성을 비교한 결과를 발표하였다<sup>[5]</sup>. 2019년 Li 등은 EFP의 비행 안정성을 개선하기 위해 일반적인 형태의 구형이 아닌 다각형의 라이너를 제작하여 관통자 꼬리 부분 날개 형성에 관한 부분을 해석으로 모사하고 이를 설계 한 결과를 발표하였다<sup>[6]</sup>. 1993년 Malejko 등은 비행시험과 풍동 시험결과를 CFD code와 비교하여 EFP 비행 안정성에 대한 연구를 발표하였다<sup>[7]</sup>.

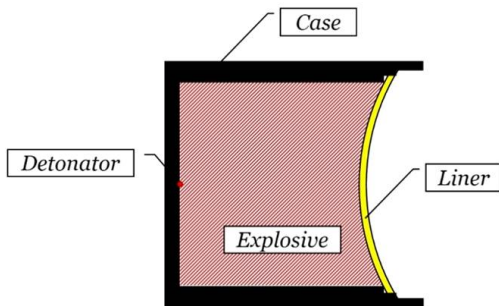


Fig. 1. Schematic diagram of a EFP

본 논문에서는 관통력 증대의 일환으로 비행 안정성을 확보한 단일 관통자 설계 연구를 위해 EFP 탄두를 설계하여 성능확인시험을 진행 하였고 라이너 형상에 따른 관통자의 특성을 시험을 통해 확인하였다. Explicit FEM code와 CFD code를 활용하여 각 모델에 대한 전산해석을 수행하였고 구조해석에서 얻은 결과와 성능확인 시험 결과를 비교하였다.

## 2. 시 험

### 2.1 EFP 설계 및 제작

총 다섯 종류의 EFP를 제작하였고 제작된 EFP의 소재는 모두 동일하다. 라이너는 열처리한 압출 OFHC (Oxygen-free high-conductivity copper)를 사용하였고 화약은 LX-14 그리고 탄체와 잠금링은 SCM 440을 사용하여 제작하였다. 화약 직경은 90 mm, 중량은 0.9 kg로 동일하게 설계하였고 탄체는 boat tail type으로 제작하여 화약 에너지가 축 방향으로 집중되게 설계하였다. 잠금링과 탄체는 나사산으로 체결되어 조립된다.

본 논문에서는 화약과 탄체, 잠금링의 설계는 동일하게 진행하고 라이너만 설계를 달리하여 실험을 진행하였다(Table 1). 제작된 라이너는 R 방향으로 다른 두께를 적용하였다. 라이너 위치별 두께 구간은 Fig. 3 단면 그림에서 확인 가능하듯이 중심부에서 외곽으로 갈수록 thickness1, 2, 3로 구분된다. 라이너 VT3035, VT3540, VT4045의 경우 thickness1, 2의 두께만 변화를 주고 thickness2에서 thickness3까지의 구간의 두께는 고정하였다. 모델명 뒤에 P가 붙은 VT3540P와 VT4045P는 VT3540과 VT4045와 비슷한 모델이다. VT3540과 VT3540P는 thickness1, 2가 모두 동일하고 thickness3에서 0.3 mm 차이난다. 두께 차이로 인하여 VT3540P 라이너 무게가 VT3540에 비해 6.7 g 무겁게 확인된다. VT4045와 VT4045P는 thickness3에서 0.3 mm 차이난고, 라이너 중량은 VT4045P가 VT4045에 비해 4.6 g 무겁다.

EFPP는 작은 설계 수치에도 관통자 특성이나 비행 특성이 달라질 수 있기에 본 연구에서는 주요 제작 파트인 라이너, 탄체, 잠금링, 화약의 제작 과정에서 발생하는 가공, 조립 공차를 확인하였다. 탄체의 경우 가공오차 1/10 이내, 라이너의 경우 가공오차 1/100 이내, 탄두 조립체의 경우 흔들림 공차가 1/10을 넘기지 않는 선에서 제작 하였다. 최종 조립된 탄체는 제작한

치구에 올려놓고 옆으로 회전시키면서 라이너 중심점에서 30 mm 떨어진 지점의 높낮이를 측정하였는데 이는 탄체의 흔들림 공차를 측정하기 위해서이다. 이때 각 탄체별 조립체의 흔들림 공차는 1/10을 넘기지 않았다.

Table 1. Liner weights, apex angles, and liner thicknesses of EFP models

Model	Liner weight (g)	Apex angle (°)	Liner thickness 1 (mm)	Liner thickness 2 (mm)	Liner thickness 3 (mm)
VT 3035	196.9	158.4	3.0	3.5	3.5
VT 3540	225.3	158.4	3.5	4.0	4.0
VT 3540P	232.0	158.4	3.5	4.0	4.3
VT 4045	260.4	158.4	4.0	4.5	4.5
VT 4045P	265.0	158.4	4.0	4.5 </td <td>4.8</td>	4.8



Fig. 2. A photograph of EFP

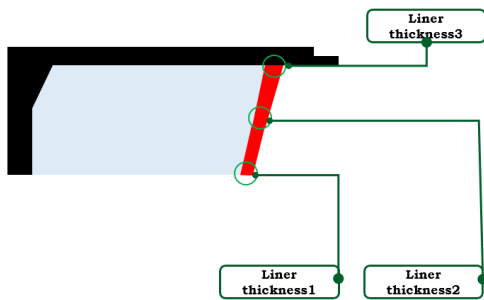


Fig. 3. Schematic diagram showing the cross-sectional view of the liner

## 2.2 성능확인시험

설계 조건에 따른 관통자 특성, 비행 거동 등을 확인하기 위해 성능확인시험을 진행 하였고 각 모델별로 시험은 재현성 확인을 위해 두 번씩 진행 하였다 (Fig. 4).

EFP 시험은 다음의 일련의 과정들로 진행 되었다. 탄두 거치 과정에서 관통자 비행 특성에 영향을 줄 부분을 최소화하기 위해 EFP 거치 후 탄체 위 레이저로 조준점을 확인하고 거치 상태를 조정하였다. 거치된 EFP는 기폭 된 이후 약 25 m 지점에 위치한 탄받이까지 비행하는데 이 사이에 FXR과 초고속카메라를 설치하여 비행 이미지를 획득 하였다. FXR은 기폭점에서 1 m 위치에 초고속카메라는 18.5 m 지점에 보조 조명과 함께 설치하였다.

FXR 이미지는 VT3540과 VT4045에 대해서만 한발씩 촬영하였다. 한 모델당 동일 시험에서 총 두 장의 X-ray를 촬영했는데 이는 관통자의 속도를 확인하기 위해서이다. VT3540의 경우 기폭 후 381, 639  $\mu$ s에서 VT4045의 경우 414, 695  $\mu$ s에서 촬영하였다.

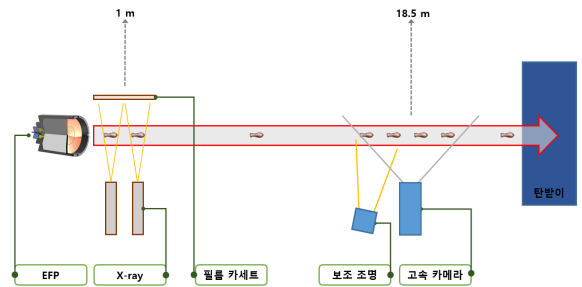


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup

Table 2. Penetrator features and flight behavior of EFP models

Model	Penetrator feature	Flight behavior
VT3035	multi-penetrator (break-up)	unstable (tumbling)
VT3540	single-penetrator	unstable (tumbling)
VT4045	single-penetrator	stable
VT3540P	single-penetrator	stable
VT4045P	single-penetrator	stable

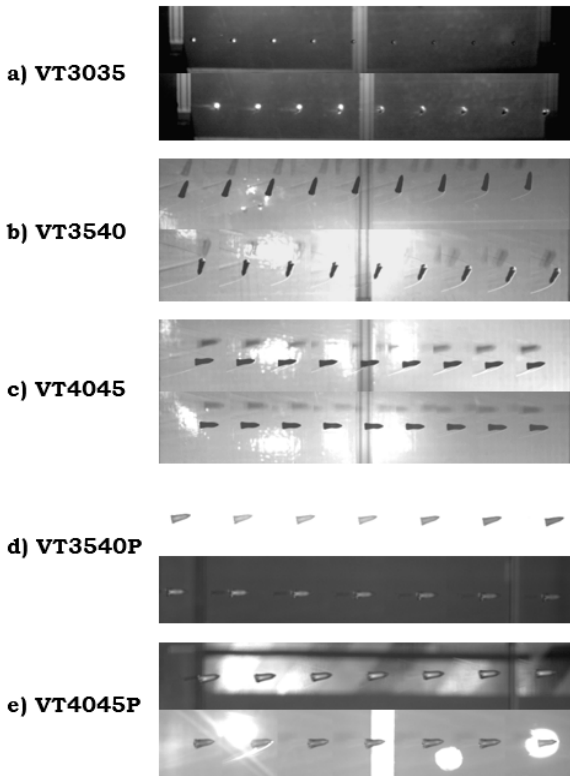


Fig. 5. Photographs of EFP models showing flight trajectories(acquired using a high-speed camera)

Fig. 5에서 기폭점에서 15~20 m 사이의 모델별 관통자 비행 궤적을 확인할 수 있다. VT3035와 VT3540을 제외하고 전반적으로 양호한 비행상태를 확인할 수 있다. VT3035의 경우 두 번의 시험 모두 관통자가 분리되어 각각의 분리된 관통자들이 텀블링하며 이동하였다. VT3540의 경우 단일한 관통자가 형성 되었지만 두 번의 시험 모두 관통자가 비행하면서 텀블링 하는 것을 확인할 수 있다. VT4045, VT3540P, VT4045P의 경우 모든 시험에서 단일 관통자가 형성되었고 관통자의 비행 상태도 양호하였다(Table 2).

### 3. 전산해석

EFP 관통자 특성을 확인하기 위해 Autocad와 Hypermesh를 사용하여 약 54만개의 육면체 격자를 생성 하였고 Explicit 기반으로 한 상용코드 LS-Dyna를

활용하여 3D 전체 모델로 전산해석을 수행하였다(Fig. 6). 전산해석 기법은 요소의 변형을 빠른 시간 내에 정확하게 모사할 수 있는 Lagrangian method를 사용하였다<sup>[8]</sup>. 원활한 해석 수행을 위해 화약 에너지가 라이너에 전달된 기폭 후 50  $\mu\text{s}$  지점에서 탄체와 화약을 제거하였고 관통자의 속도 구배가 거의 없는 기폭 후 300  $\mu\text{s}$  지점까지 관통자의 거동을 계산하였다.

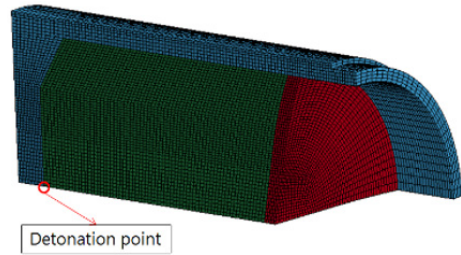


Fig. 6. A 3D model of EFP for numerical simulation

전산해석에 적용한 물성 데이터는 최종 가공 전 소재로 준정적/동적 물성 테스트를 수행하여 획득하였고, 변형률 속도  $10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  영역 내 상온, 고온에서 획득한 물성 결과를 고압/고속 영역에서의 재료의 거동모사가 가능한 Johnson-Cook 모델(Eqn. 1)에 적용, 항복응력 A, 가공경화 계수 B, 가공경화 지수 n, 변형률 속도 계수 C 그리고 온도 연화 지수인 m을 구하여 해석 수행 하였다<sup>[9]</sup>. 각 파트별 적용 물성 모델과 주요 소재인 라이너의 물성, EOS 계수 값에 대한 정보는 Table 3, 4에서 확인할 수 있다.

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - T^{*m}] \quad (1)$$

Table 3. Materials, material properties, and types of EOS and strength model used for the simulation

Part	Material	Density (g/cc)	Yield strength (MPa)	EOS	Strength model
Liner	OFHC	8.9	62.1	Shock	Johnson-Cook
Case	SCM 440	7.8	546	Shock	Johnson-Cook
Explosive	LX-14	1.8	-	JWL	-

Table 4. Parameters for EOS and strength model

Equation of state (Shock) <sup>[11]</sup>			Strength model (Johnson-Cook)				
G	C1	S1	A	B	n	C	m
2.02	3.94	1.489	62.12	480	0.63	0.085	0.28

고속카메라는 관통자의 단면을 촬영하기에 관통자가 피치나 롤 방향의 회전이 있다면 획득한 수치의 정확도를 담보할 수 없다. 본 실험에서 VT3035와 VT3540의 경우 불안정한 비행 상태를 보인다. 따라서 이 두 모델의 고속카메라에서 획득한 정량적인 관통자 특성은 결과 표에 정리하지 않았다.

Table 5에서 VT3540은 FXR에서 획득한 시험결과를 확인할 수 있다. 이 모델의 경우 FXR에서 촬영된 관통자는 비행 상태가 안정된 모습을 보이고 있다. FXR 촬영 시점은 기폭 후 381  $\mu$ s, 639  $\mu$ s 이고 이 때 촬영된 두 장의 이미지는 동일한 비행 상태를 보인다. 관통자가 초고속 카메라에서 불안정한 비행 거동을 보이는 것으로 보아 마지막 X-ray 촬영 시점인 639  $\mu$ s 이후부터 불안정한 상태가 시작된 것으로 보인다. 이러한 관통자의 불안정한 거동은 관통자가 충분히 확보하지 못한 정적비행안정성 때문일 것이라 판단된다. 관통자 비행 거동에 영향을 주는 다른 많은 요소들이 있을 것이다. 그 중에 가장 먼저 의심할 수 있는 부분은 EFP 제작과 조립 과정에서 개입된 여러 비대칭성 때문이다. 앞서 EFP 제작 부분에서 기술하였듯이 논문에서 제작된 모델은 모두 가공 오차와 제작 공차를 관리하여 설계 제작된 모델이다. 혹시라도 공차에서 발견되지 못한 다른 비대칭성이 있더라도 초기 폭발과 가까운 시점인 FXR 이미지에서 이러한 영향이 드러났어야 할 것으로 판단된다. 따라서 VT3540의 관통자는 정적비행안정성을 충분히 확보하지 못한 것으로 판단된다.

Table 7에 나와 있는 VT3540P는 앞서 설명한 VT3540과 비슷하지만 라이너 가장자리를 더 두껍게 설계한 모델이다. 시험 결과 VT3540보다 안정한 비행 결과를 보이는데 이는 VT3540P의 관통자 날개 부분의 직경이 더 크게 성형되면서 VT3540에 비해 더 충분한 비행안정성을 확보한 것으로 보인다. VT3540 관통자 날개의 직경은 29.7 mm(FXR 측정 값), VT3540P의 관통자 날개 직경은 33.2, 42 mm로 측정되었다.(초

고속 카메라 이미지 값) 전산해석에서도 VT3540P의 관통자 날개 직경이 VT3540보다 약 3 mm 크게 확인되었다.

Table 6에 제시되어 있는 VT4045는 비행 거동이 안정적이고 FXR와 초고속 카메라의 결과값에 큰 차이가 없다. 이를 통해 VT4045의 관통자의 경우 충분한 정적비행안정성을 확보하고 있다고 판단된다. VT4045와 VT4045P도 전반적인 라이너 설계가 하고 외곽부위의 두께차만 존재한다. 앞서 비교한 VT3540, VT3540P와 비슷하게 관통자 날개 직경값이 VT4045P가 VT4045에 비해 크게 측정 되었다.

Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 VT3035P에서 VT4045P로 갈수록 즉, 라이너 가장자리 두께가 두꺼워지고 라이너 중량이 늘어날수록 관통자의 속도가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 라이너에 제공되는 에너지는 동일하지만 라이너 무게로 인해 관통자 속도에 차이가 발생하는 것으로 보인다.

Table 5. Comparison of experimental and simulation results for VT3540

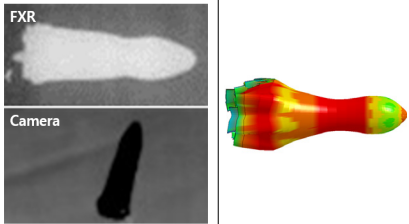
	Experimental results			Simulation results
	FXR	Cam1	Cam2	
Penetrator feature				
Tip velocity (km/s)	2.3	-	-	2.4
Penetrator length (mm)	89.1	-	-	88
diameter of head (mm)	22.4	-	-	19
diameter of skirt (mm)	29.7	-	-	34
L/D (mm/mm)	4.0	-	-	4.6

Table 6. Comparison of experimental and simulation results for VT4045

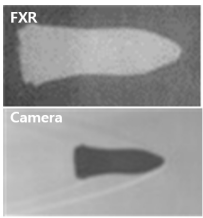

	Experimental results			Simulation results
	FXR	Cam1	Cam2	
Penetrator feature				
Tip velocity (km/s)	2.1	2.1	2.1	2.3
Penetrator length (mm)	82.6	79.6	82.7	77
diameter of head (mm)	25.4	23.9	25.6	21
diameter of skirt (mm)	33.0	30.6	32.3	34
L/D (mm/mm)	3.3	3.3	3.2	3.6

Table 7. Comparison of experimental and simulation results for VT3540P


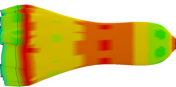


	Experimental results		Simulation results
	Cam1	Cam2	
Penetrator feature			
Tip velocity (km/s)	2.3	2.3	2.4
Penetrator length (mm)	71.8	77.1	84
diameter of head (mm)	21.5	24.4	20
diameter of skirt (mm)	33.2	42.0	37
L/D (mm/mm)	3.3	3.2	4.2

Table 8. Comparison of experimental and simulation results for VT4045P

	Experimental results		Simulation results
	Cam1	Cam2	
Penetrator feature			
Tip velocity (km/s)	2.0	2.1	2.24
Penetrator length (mm)	83.8	83.5	80
diameter of head (mm)	26.5	26.5	21
diameter of skirt (mm)	38.4	40.0	37
L/D (mm/mm)	3.2	3.2	3.8

시험에서 획득한 관통자 정보와 해석을 통해 모사한 관통자 정보를 비교한 결과 관통자 속도가 실제 측정된 값 대비 4~9 % 크게 세장비는 10~30 % 크게 계산된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8). 전산해석과 시험 결과 값에 차이가 발생하는 주요한 이유는 다음과 같이 두 가지로 판단된다. 첫 번째 이유로는 이미지의 불분명한 경계에서 발생하는 측정 오차 값으로 차이가 발생할 거라 판단된다. 두 번째로 전산해석과 실제 모델의 형상, 물성 값 차이 때문에 발생하는 것으로 보인다. 탄체에 나사 형식으로 체결된 잠금링을 전산해석으로 폭발 시 거동을 정확하게 모사하는데 어려움이 있다. 그리고 전산해석에 적용된 물성 모델의 재료 변형 모사의 한계로 차이가 발생된 것으로 판단된다. 관통자 거동에 주요한 영향을 주는 라이너는  $10^4 \text{ s}^{-1} \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$  영역까지 strain rate이 도달하는 걸로 예상된다. 본 연구에 적용된 라이너 소재의 물성 모델은 Johnson-Cook 모델로 strain rate이  $10^3 \text{ s}^{-1}$ 을 넘어가면 plastic strain을 실제 시험 결과보다 적게 예측하는 경향을 보인다.  $10^3 \text{ s}^{-1}$  이후를 잘 모사하는 modified Johnson-Cook 모델을 사용하면 이런 부분 개선될 것으로 판단된다<sup>[10]</sup>.

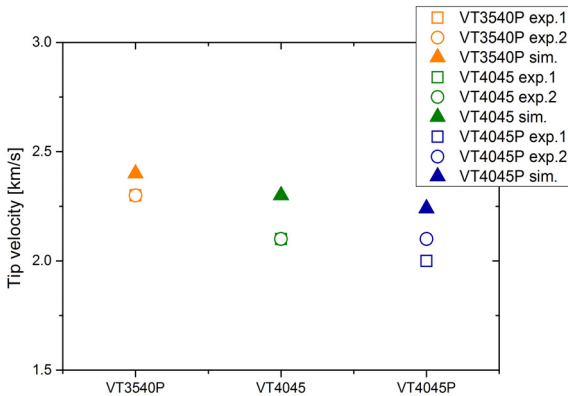


Fig. 7. Experimental and simulation results of tip velocities for 3 different liner models

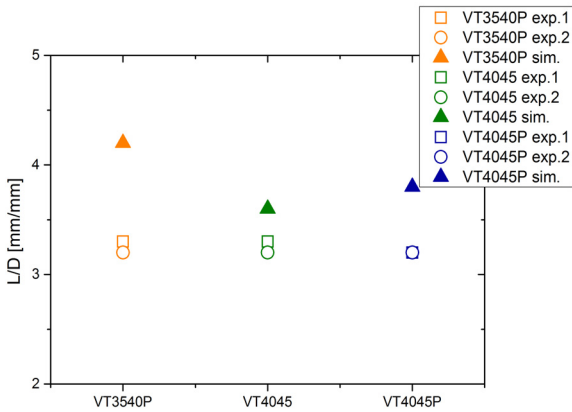


Fig. 8. Experimental and simulation results of L/D ratios for 3 different liner models

관통력  $P$ 는 타겟의 밀도  $\rho_t$ , 관통자의 밀도  $\rho_j$ 와 관통자의 길이  $l$ 에 관한 함수로 다음과 같이 간단히 표현 가능하다(Eqn. 2)<sup>[1]</sup>.

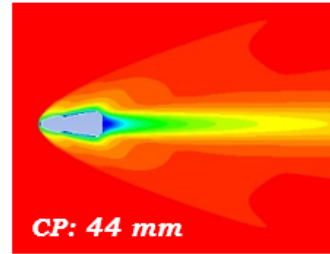
$$P = l \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (2)$$

타겟과 관통자의 밀도가 변하지 않다고 가정했을 때, 관통자의 길이가 길어질수록 관통력은 증가한다. 하지만, 관통자의 비행 상태가 안정적이지 않다면 즉, 관통자가 경사각을 가지고 타겟과 조우한다면 관통자의 관통 성능은 수직으로 부딪힐 때보다 줄어든다. VT3540은 단일 관통자로 세장비가 크고 속도가 빠르

나 전체 비행 거동을 살펴보면 경사각을 가지고 비행한다. 개선된 결과를 얻기 위해 비슷한 VT3540P 모델을 설계하였고 더 나은 비행 거동을 확인 할 수 있었다. 이는 VT3540P가 VT3540보다 더 충분한 정적비행 안정성을 확보하고 있는 것으로 보인다.

본 논문에서는 비행안정성에 대한 판단의 일환으로 모델별로 CP값을 확인하여 이를 비교하였다. 모델별 CP값은 시험에서 획득한 관통자의 형상 정보를 단순화 하여 2D 모델링 후 격자 작업 진행 하였고 Implicit code인 Fluent로 2D 유동해석을 수행하였다. 유동은 fully turbulent flow로 가정하며 viscous model은 Spalart and Allmaras(1992)를 사용하여 계산하였다(Fig. 9).

a) VT3540



b) VT3540P

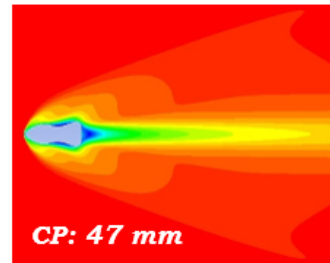


Fig. 9. Velocity contours on symmetry plane of VT3540 and VT3540P

유동 해석 결과 VT3540에 비해 VT3540P의 CP점이 3 mm 뒤에 위치하였다. 관통자 날개 직경 사이즈가 커지면서 CP점의 위치가 뒤로 이동한 것으로 보인다. CP점 위치는 정적비행안정성의 판단이 되는 값으로 CP점이 뒤에 위치할수록 동일한 조건에서 더 큰 비행 안정성을 갖는다. 비행안정성의 판단이 되는 정적비행 안정성은 CP와 CG의 차로 정확한 계산이 가능한데 본 연구에서는 관통자 회수 시험을 진행하지 않았기

때문에 CP값에 대한 연구만 수행하였다. 정확한 비교를 위해서 추후 CG값에 대한 확인이 필요할 것으로 보인다.

EFP는 기폭 됨과 동시에 빠르게 화약에 의해 팽창, 변형되면서 관통자가 형성되고 비행에 간섭이 발생한다<sup>[7]</sup>. 관통자에 외력이나 모멘트에 의해 간섭이 발생했다더라도 비행안정성을 충분히 확보한 단일한 구조의 관통자가 형성된다면 표적까지 안정되게 도달할 수 있다. 따라서 EFP를 설계하고 관통자의 성능을 예측하는데 관통자 형상 확인과 비행안정성에 대한 고려가 설계단계에서 이뤄진다면 EFP 성능향상에 도움이 될 것이라 판단된다.

#### 4. 결론

관통자 특성과 비행 안정성에 대한 연구를 진행하기 위해 두께별 라이너를 제작하여 관통자의 형상, 속도 그리고 비행 상태를 비행 시험과 전산 해석을 통해 확인하였다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 라이너의 두께가 감소할수록 관통자의 속도가 줄어드는 것을 전산해석과 시험 결과를 통해 확인하였다. FEM 해석 결과 실제 시험 대비 관통자 속도는 4~9 %, 관통자 세장비는 10~30 % 크게 계산되었지만 전반적으로 시험 결과와 해석 결과의 경향이 일치함을 확인하였다.
- 2) 관통자의 비행 상태는 관통자의 비행 안정성 상태에 밀접한 영향이 있음을 시험과 해석을 통해 확인하였다. VT3540 경우 폭발 직후 FXR 촬영 이미지에선 안정적인 비행 거동을 보이나 15 m 떨어진 시점에선 불안정한 상태를 보인다. 이는 조립된 탄체나 각 파트에서 발생하는 비대칭성 때문이 아닌 형성된 관통자가 충분히 확보하지 못한 비행안정성 때문으로 보인다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 관통자 날개 직경을 키우는 방향으로 VT3540P의 설계를 진행하였고 시험 결과 개선된 비행 거동을 확인하였다.

본 결과들은 EFP의 관통성능 증대를 위한 관통자 특징, 비행 안정성 연구에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

#### References

- [1] W. Walters and J. Zukas, "Fundamentals of Shaped Charges," John Wiley & Sons, Inc. Canada, pp. 1-12, 1989.
- [2] H. Kim, Y. Yi and L. Park, "Analysis of Forming Characteristics of Ta EFP According to Material Model," DYMAT, 2015.
- [3] Y. Yi, H. Kim and L. Park, "Analysis of Forming Characteristics of EFP According to the Liner Shape," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2016.
- [4] K. Weimann, "Research and Development in the Area of Explosively Formed Projectiles Charge Technology," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 18, No. 5, pp. 294-298, 1993.
- [5] D. Klatt, Michael Proff and Robert Hruschka, "Investigation of the Flight Behavior of a Flare-Stabilized Projectile using 6DoF Simulations Coupled with CFD," International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. ahead-of-print, No. ahead-of-print, 2019.
- [6] W. Li et al., "Simulation Study on EFP with Stable Tail Fins Formed by Polygonal Shaped Charge Liner," 31st International Symposium on Ballistics, pp. 1899-1908, 2019.
- [7] G. Malejko and W. Kuhnle, "Aerodynamic Predictions for Explosively Formed Penetrators with Thick Fins using an Inviscid CFD Code," 32nd AIAA, 1994.
- [8] J. Hallquist, "LS-DYNA Theory Manual," 2006.
- [9] G. Johnson and W. Cook, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," 7th International Symposium on Ballistics, pp. 541-547, 1983.
- [10] H. Couque and R. Boulanger, "EFP Simulations with Johnson-Cook Models," 23rd International Symposium on Ballistics, pp. 255-262, 2007.
- [11] J. Anderson Jr., "Introduction to FLIGHT," McGraw-Hill, USA, pp. 586-645, 2012.
- [12] J. Anderson Jr., "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials," 1996.