

성형작약탄 라이너 용입체 형상에 따른 제트특성 분석

최준홍^{*,1)} · 구만회¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 지상기술연구원

Characteristics of Shaped Charge Jets by the Shape of the Inhibitor Inserted into the Liner

Joonhong Choi^{*,1)} · Manhoi Koo¹⁾

¹⁾ Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 23 April 2024 / Revised 9 July 2024 / Accepted 15 July 2024)

Abstract

The performance of a shaped charge bomb depends on the explosive performance, liner precision machining and manufacturing quality. The key performance is how uniformly the liner transforms into a jet. In order to reduce the performance of the shaped charge bomb from a protection point of view, this study investigated the characteristics of the jet formation and progression by inserting inhibitors of different shapes into the liner using flash X-ray experimental analysis techniques. The larger the volume filled inside the liner, the lower the rate of high-speed jet generation, which was well confirmed by experiments. Due to the effect of the inhibitor, it takes a considerable amount of time delay to form a jet after explosion compared to a normal shot, and quantity and mass of jet particles that can contribute to penetration are decreased, and the penetration power is also greatly reduced due to the scattering of segmented jets.

Key Words : Shaped Charge Jet(성형작약탄 제트), Liner(라이너), Inhibitor(용입체), Penetration Reduction(관통감소), Flash X-ray(섬광 X선)

기 호 설 명

CD : Charge diameter
FXR : Flash X-ray system
HE : High explosive

SC : Screen
WD : Warhead diameter

1. 서 론

전투차량의 승무원을 각종 위협으로부터 보호하기 위해서는 위협체 특성을 잘 분석하고 그에 대한 적절

* Corresponding author, E-mail: choi1773@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

한 방호수단을 준비하는 것이 필요하다^[1]. 장갑을 설계하는 사람의 목표는 가능한 적은 중량으로 위협체를 효과적으로 방호하는 것이다. 이를 위해서는 위협체의 관통기구를 명확하게 이해하고 적합한 장갑설계를 하여야 한다^[2]. 성형작약탄은 화약의 화학에너지를 사용하여 장갑을 관통하는 위협탄 종류이다^[3]. Fig. 1은 성형작약탄의 통상 모델을 보여준다. 탄 설계자는 표적에 대한 관통력을 최대화하기 위해 다양한 효과를 고려하는데, 그 예로 고성능 폭약 활용, 라이너 형상/재료 최적화, 그리고 정밀가공/조립 등의 방법을 사용한다^[4-8]. 성형작약탄 위협을 방호하기 위한 대표적 장갑으로 수동장갑(Passive armor), 반응장갑(Reactive armor)이 있는데 실사용에 적용하기 위해서는 중량의 최적화가 요구된다^[9-12]. 성형작약탄 제트가 고밀도이므로 장갑재료 또한 고밀도 재료가 유리하나, 이런 경우 중량 증대로 전투차량의 생존성 향상에 부정적인 요소로 작용한다^[13]. 그 대안으로 화약을 사용한 반응장갑이 효과적인 방호수단으로 사용되고 있다^[10,14]. 최근에는 비행하는 성형작약탄 탑재 위협체(예: 대전차 유도무기)를 충돌 전 탐지하고 대응탄을 발사하여 물리적으로 파괴하거나 손상을 주어 방호하는 능동방호 기술이 사용되는 추세이다^[15].

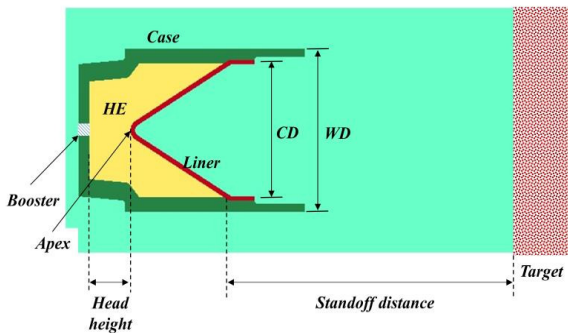


Fig. 1. General configuration of a shaped charge

이와는 다르게 성형작약탄 내부의 빈공간에 외부물질을 용입시켜 폭발 시 관통력을 감소시키는 방법이 제안되었다^[16,17]. 성형작약탄 라이너는 아주 정밀한 대칭성(정밀가공 동심도 유지, 소재 균질성, 무결함 등)이 유지되어야 최적의 제트를 생성한다. 그러나 이런 대칭성이 유지되지 않으면 정상적인 제트가 생성되지 않고 제트가 휘어지거나 일찍 파단되어 요구되는 관통 성능을 발휘하지 못한다. 라이너 대칭성을 훼손시

키는 방안으로 딱딱한 돌기, 핀, 기타 다양한 구조 형상을 라이너에 접촉하거나 라이너를 일부 관통 혹은 홈집을 내면 관통력이 현저히 떨어진다^[18]. 최근 연구에서 라이너에 용입하는 기능성 재료로 고무를 선정하여 해석에 필요한 물성 분석 방안을 제시하고 재료가 라이너에 용입되어 제트가 형성되는 과정을 모델링, 그리고 2D 해석을 통하여 보여주었다^[19].

본 논문에서는 성형작약탄 내부에 외부물질이 용입되었을 때 용입체의 형상에 따른 제트의 생성, 형상변화, 입자화, 그리고 시간에 따른 분산 효과를 설파 X선 촬영으로 분석하였다. 관통력 실험결과와 비교 분석하여 성형작약탄 방호에 중요한 메커니즘을 가시화하여 이해의 폭을 향상시켰다.

2. 실험방법

2.1 성형작약탄과 용입체 형상

실험에 사용된 성형작약탄은 40 mm 급 소형 자탄이다. Fig. 2는 실험탄의 형상을 보여준다. 라이너의 형상은 단순 원뿔형이고 구리재료이며 첨두각은 60°이다.

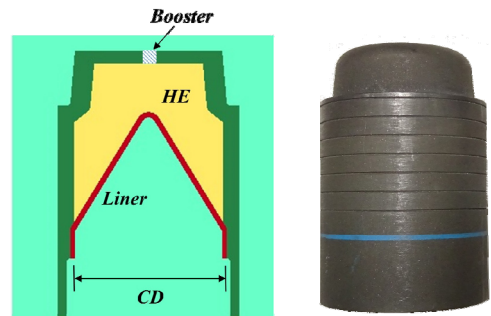


Fig. 2. Shaped charge bomb configuration

Fig. 3은 성형작약탄에 용입체가 들어가는 개념과 형상을 보여주며, (e)는 실제 실리콘으로 제작된 용입체를 보여준다. (a)는 용입체가 없는 원래 상태의 탄(정상탄) 형상이며, (b)는 라이너 공간의 절반이 침투부에 채워졌을 경우이고, (c)는 라이너 공간 전체가 채워졌을 경우, 그리고 (d)는 라이너 공간의 절반이 아래 바닥쪽으로 채워졌을 때의 형상 개념도이다. 용입체로 사용된 실리콘 고무는 상온경화 실리콘(Silastic RTV-4130-J)으로 밀도는 1.29 g/cm³, 경도(쇼어 A) 56, 그리고 인장강도는 5.5 MPa이다.

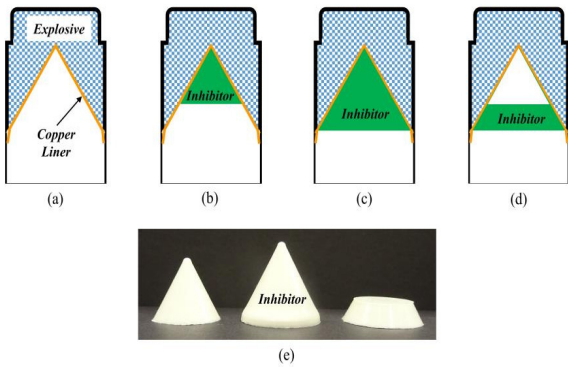


Fig. 3. Conceptual diagram of silicone rubber inhibitor filling the copper liner, (a) Bare-charge, (b) Top-half volume fill, (c) Full volume fill, (d) Bottom-half volume fill, (e) Real inhibitor shape made of silicone rubber

2.2 섬광 X선 실험

Fig. 4는 섬광 X선 실험장치의 개략도를 보여준다. 성형작약탄 폭발 후 형성되어 자유 비행하는 제트의 시간차 촬영을 위해 두 개의 X선 튜브 헤드 가 사용되었다. 제트가 통과할 때 X선이 방사되어 후면에 배치된 필름에 제트의 형상이 감광되어 기록된다. 시간을 달리하여 두 개의 X선이 방사되므로 필름 스크린에 각 시간에서 제트의 자취가 중복되어 나타난다.

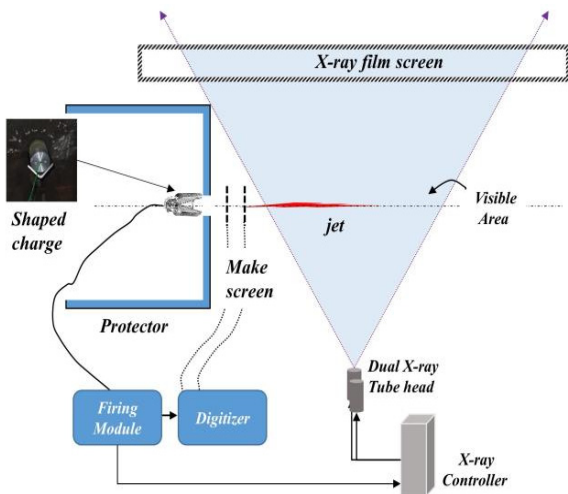


Fig. 4. Experimental schematic diagram for obtaining a radiograph of the free flying phenomenon of the shaped charge jet

파편방호치구(Protector)에 32 mm 구경의 구멍을 내어 제트는 빠져나오게 하고 파편은 내부에서 빠져나오지 않도록 한다. 초기 제트 속도 측정을 위해 성형작약탄 침두로부터 122 mm 거리에 첫 번째 접촉스크린(Make-screen)을 놓고 216 mm 지점에 두 번째 스크린을 위치시킨다. Fig. 4에 나타나듯이 파편방호치구, X선 튜브헤드, 필름 스크린의 기하학적 배치로 인하여 필름에 기록되는 영역이 제한적임을 알 수 있다. 성형작약탄 라이너 침두에서 223 mm 이후의 제트가 X선 필름 스크린에 기록된다.

3. 실험결과 분석

3.1 X선 영상 분석

성형작약탄 기폭에는 RP-87 EBW(Exploding Bridged Wire) 기폭관이 사용되었는데 폭파모듈로부터 고압의 전기필스가 인가되고 10 μ s 정도에 EBW가 작동하는 것으로 매뉴얼에 나타난다^[20]. Fig. 5에 제트 속도와 두 채널의 X선이 방사된 시간정보가 기록되었다. 발파신호가 인가된 시간이 0 μ s이고, 9 μ s에 폭발되었고, 형성된 제트 선단은 26.6 μ s에 첫 번째 스크린에, 그리고 두 번째 스크린에는 41.8 μ s에 도달한 것으로 나타난다. 그리고 X선은 세팅한 시간에 정확하게 100 μ s와 120 μ s에 방사된 것이 확인된다. 이런 정보를 통하여 제트가 형성되어 스크린에 도달하는 시간, 구간 속도, X선 조사 시 진행한 거리 정보 등을 분석한다.

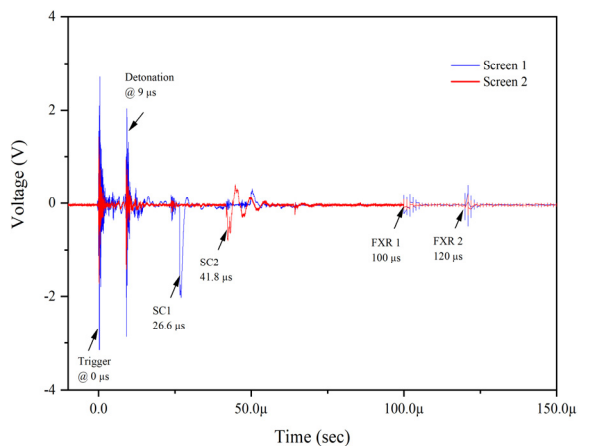


Fig. 5. Make-screen signal data of bare shaped charge experiment measured with a digitizer

Fig. 6은 Fig. 3에 보여준 성형작약탄 형상으로 실험하여 얻은 X선 사진을 보여준다. Table 1은 각 실험에서 획득한 Fig. 5 형태의 정보와 Fig. 6의 X선 영상을 종합하여 분석한 데이터를 정리한 것이다. Fig. 6(a)는 용입체가 없는 정상탄의 91 μs 와 111 μs 에서 촬영된 제트 모습을 보여준다. 스크린 위치에서 구한 제트 선단속도는 6.32 km/s이고 제트가 더 진행한 223 mm 이후 구간인 X선 촬영 사진에서는 6.28 km/s로 나타났다. 스크린 구간 평균시간(25.2 μs)과 X선 필름 구간 평균시간(101.0 μs) 사이의 속도측정 시점이 75.8 μs 차이가 나지만 속도 차이는 불과 0.04 km/s로 나타

나 제트 선단속도가 거의 감소하지 않고 직진성도 유지되고 있음을 보여준다.

Fig. 6(b)는 성형작약탄 라이너 공간의 절반인 침두부가 용입체로 채워진 탄에서 발생하는 제트 모습을 보여준다. Fig. 6(a)의 정상탄 제트에 비해 제트 생성이 지연되고 여러 개의 큰 파편과 작은 입자들이 불규칙하게 진행하는 것을 볼 수 있다. 정상탄에 비하여 전체적으로 입자들의 속도가 감소 되었으며 스크린에서 측정된 속도는 3.24 km/s, X선 영상에서 분석된 속도는 2.44 km/s로 정상탄에 비해 현격한 속도 감소를 보여준다.

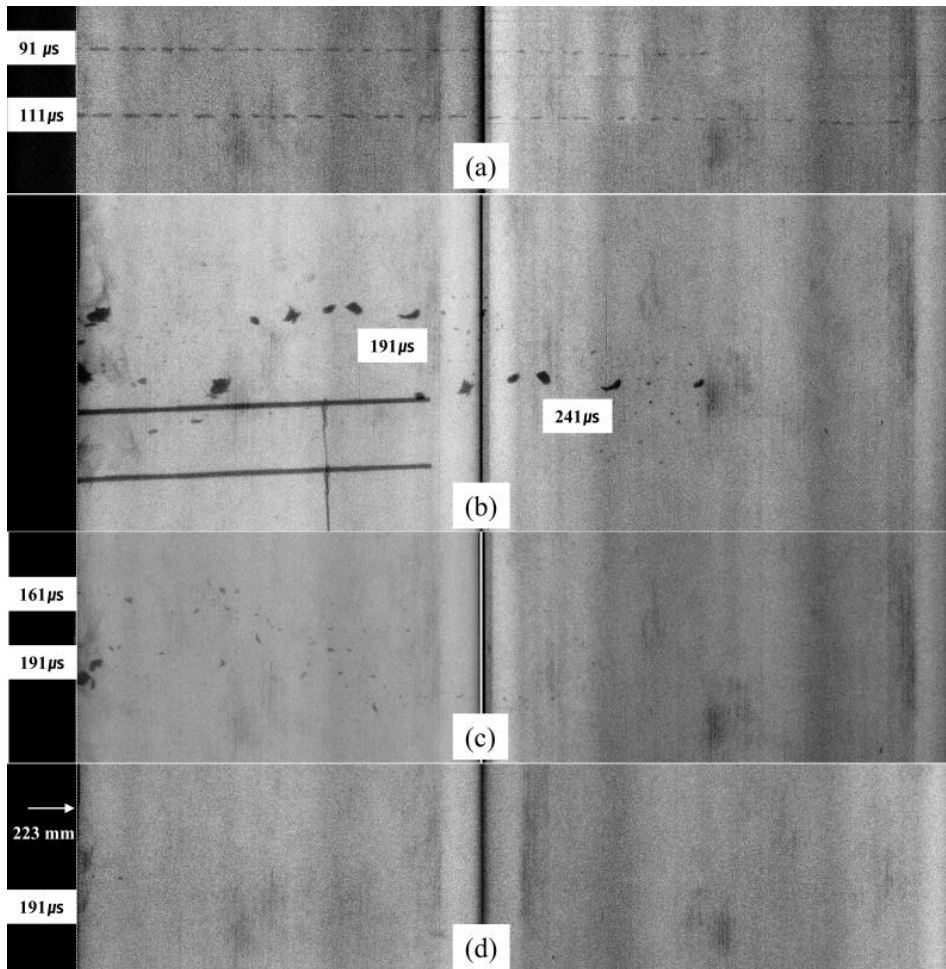


Fig. 6. Flash X-ray image of jet behavior for each liner filled inhibitor, (a) Bare-charge, (b) Top-half volume filled liner, (c) Bottom-half volume filled liner, (d) Full volume filled liner

Table 1. Jet velocity variations for a liner inhibited shaped charge(The time measured is the arrival time after detonation)

Charge Inhibitor Type	Jet screen contact time (μs)		Jet velocity (km/s)		FXR shot time (μs)	Remark
	SC1	SC2	SC1-SC2	FXRs or Detonation-FXR*		
Bare-charge	17.6	32.8	6.32	6.28	91/111	Fig. 6(a)
Top-half	22.1	50.8	3.24	2.44	191/241	Fig. 6(b)
Bottom-half	14.0	47.3	2.88	2.69	161/191	Fig. 6(c)
Bottom-half	14.3	50.2	2.59	2.08	191	-
Full	19.2	51.0	2.92	1.90*	191	Fig. 6(d)
Full	17.7	57.6	2.40	1.68	141/171	Cloud

Fig. 6(c)는 성형작약탄 라이너 공간의 절반인 아래 바닥쪽이 용입체로 채웠을 경우 161 μs , 191 μs 시점에서 촬영된 제트의 모습을 보여준다. 사진에서 분절된 작은 제트 입자들이 매우 불규칙하게 산란되어 두 시간(161 μs , 191 μs) 대에 촬영된 동일입자들을 서로 매칭하기가 쉽지 않다. 입자들의 반경 방향으로 분산이 정상탄에 비해 현저하게 많이 되었으며 제트 선단 속도는 스크린에서 2.88 km/s, X선 영상에서 2.69 km/s로 관찰되었다.

Fig. 6(d)는 라이너 공간 전체를 용입체로 채웠을 경우 폭발 후 제트 촬영 모습이다. 191 μs 에 촬영되었음에도 불구하고 몇 개의 작은 입자와 미세 구름같은 입자만 흐릿하게 보인다. X선 이미지가 한 시점(191 μs)에만 있기에 폭발시점과 X선 조사시간 사이 이동한 제트 선단 거리로 제트 속도를 분석하였는데 1.90 km/s로 나타났다.

Fig. 6과 Table 1을 살펴보면 용입체가 없는 정상탄의 경우 생성된 제트는 속도구배에 의해 제트가 정상적으로 분절되나 흩어지지 않고 직진성이 있으며 선단의 속도는 거의 감소하지 않는 것으로 나타난다. 그러나 용입체가 라이너 공간에 들어가서 라이너를 접촉할 때, 제트 생성이 지연되고 불규칙할 뿐 아니라 정상탄에 비해 절반 정도의 선단속도를 보여주기도 한다. 용입체가 성형작약탄 라이너 내부 공간을 채우는 양이 많아질수록 제트 생성에 심각하게 영향을 주어 정상탄에 비해 선단속도가 감소하고 직진성이 사라져 분절된 제트가 흩어지는 현상이 발생하였다.

3.2 분절 제트 거동 특성

성형작약탄 제트의 관통능력은 형성되는 제트의 선단속도나 형상에 크게 의존한다⁹⁾. Fig. 6에서 보여주듯이 성형작약탄 라이너에 이물질이 용입되었을 때, 제트 형성이 방해되고 수십 마이크로초 이내에 쉽게 분절되며 직진성을 잃고 분산되는 것을 관찰하였다. Fig. 7은 Fig. 6에서 관찰된 분절된 제트 입자들의 라이너 침투부터의 거리와 속도 관계를 나타내었다. 각 입자의 속도는 X선 촬영 구간의 평균 속도이며 용입체로 인하여 제트 생성이 방해되어 동일한 거리를 지

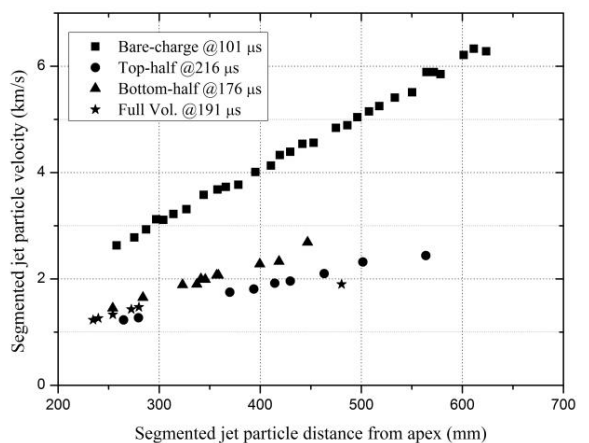


Fig. 7. Particle velocity and travel distance of segmented jets generated according to inhibitor shape

난다 하더라도 도달 시간이나 속도가 정상탄에 비해 상당히 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 용입체에 의해 분절된 제트 입자들의 편향 정도를 판단하기 위한 개념도이다. 제트 편향각은 라이너 침투에서 제트의 축방향 진행거리와 반경 방향으로 진행거리가 이루는 각으로 정의하였다.

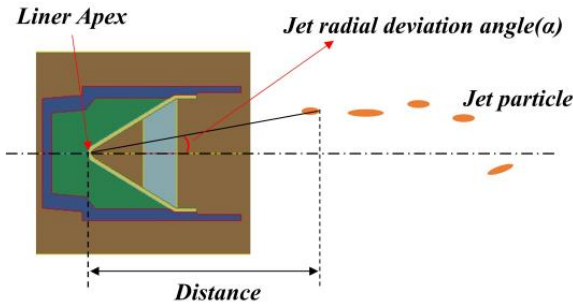


Fig. 8. Segmented jet deviation diagram from the liner apex direction

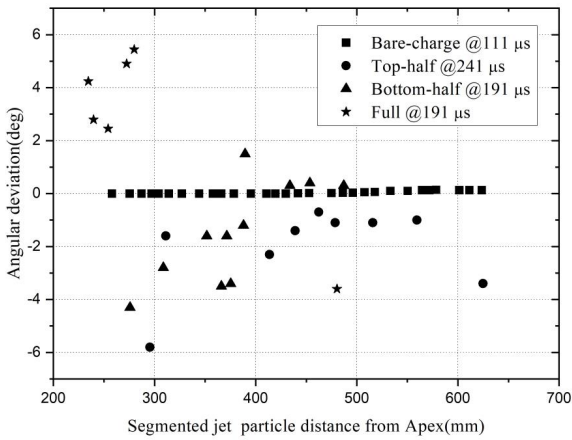


Fig. 9. Deviation angle and travel distance of the segmented jet depending on the inhibitor conditions

Fig. 9와 Fig. 10은 Fig. 6의 X선 영상에 나타난 각 입자들의 속도, 라이너 침투로부터 거리에 대한 편향 각 분포를 보여준다. 편향각을 $\Delta\alpha(\alpha_{max}-\alpha_{min})$ 로 정의할 때 정상탄(■)의 경우 제트는 축방향을 거의 벗어나지 않고 직진성을 유지하고 있다($\Delta\alpha \approx 0.1^\circ$). 반면에 용입체를 포함한 성형작약탄 제트의 분산은 매우 크게 나타나고 있다. 라이너 공간의 절반인 침투부를 채웠

을 경우(●), 편향각은 5.1° , 라이너 공간의 절반인 아래 바닥쪽을 채웠을 경우(▲) 5.8° 그리고 라이너 공간 전체를 채웠을 경우(★) 약 9.0° 로 나타났으며 라이너 침투와 비교적 가까운 거리에서부터 제트가 크게 흩어지는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 3 km/s 이상의 속도를 가진 제트 입자들은 편향되지 않고 직진성을 유지하고 있음을 보여준다. 편향된 제트 입자들은 대부분 3 km/s 이하의 속도를 보여주는데 이는 연강판을 관통하기에는 충분한 속도가 아님을 보여준다^[21].

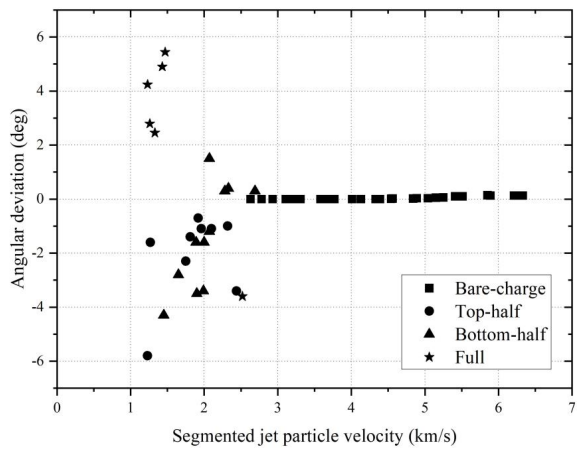


Fig. 10. Deviation angle and velocity of the segmented jet depending on the inhibitor conditions

4. 토 의

Fig. 11은 정상탄(ref.)을 기준으로 용입체가 포함된 성형작약탄 실험 결과 중 관통력과 제트 선단속도와 의 관계를 보여준다. 정상탄의 관통력, 제트 선단속도를 100으로 하였을 경우, 용입체가 포함된 탄 제트 선단의 속도는 절반 이하로 감소하고 관통 성능은 20% 이하로 감소하였다^[18].

정상탄의 경우 제트가 생성되어 스크린을 통과할 때 속도가 6.32 km/s(100%)로 측정되었으나 용입체를 포함한 탄의 경우 2.40 ~ 3.24 km/s로 측정되었다. 이는 이물질이 성형작약탄 라이너에 용입되면, 제트가 지연되어 생성되며, 생성된 제트의 속도도 심각하게 감소됨을 보여준다. 용입체가 라이너의 침투 절반을 채운 경우, 제트 선단의 속도는 정상탄의 50% 정도

로 감소하였지만 관통력은 정상탄의 20 % 정도로 감소하였다. 라이너의 바닥쪽 절반을 채운 경우와 라이너를 가득 채운 경우, 제트 선단의 속도는 45 % 이하로 감소하였지만 관통력은 정상탄의 10 % 이하로 나타났다. 이전 논문에서 이와 같은 세팅에서 연강판을 관통하기 위한 최소 제트 속도는 2.70 km/s로 확인되었다^[18]. 본 연구에서 용입체가 들어간 탄의 제트속도가 2.40 ~ 3.24 km/s로 측정되었는데, 이는 연강판을 관통하기 위한 최소속도를 겨우 넘거나 부족한 수준으로 앞의 연구결과를 잘 이해할 수 있는 좋은 데이터로 판단된다.

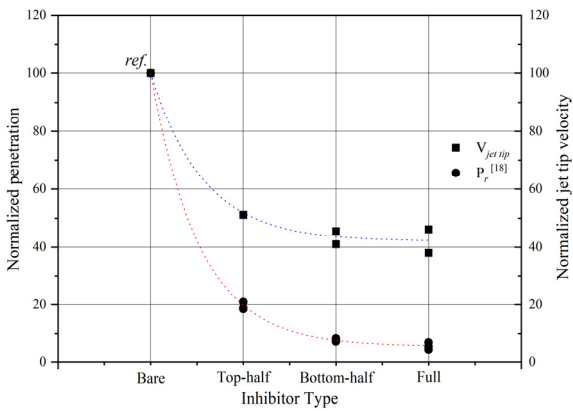


Fig. 11. Relationship of penetration performance and jet tip velocity for the shaped charge with various types of inhibitor

일반적으로 성형작약탄의 정밀가공, 정밀 조립은 성능에 큰 영향을 준다. 고폭화약과 라이너의 균질성, 조립 동심도 등은 최적 제트 생성에 중요한 요소이다. 그러므로 라이너 안에 용입체를 넣은 것은 탄의 대칭성을 훼손시키는 역할을 한다. 이런 개념은 성형작약탄 방호를 위한 장갑 개념 아이디어에 좋은 단초를 제공할 것이다.

5. 결론

본 연구에서 작은 성형작약탄 라이너에 용입체를 넣어 폭발 실험을 수행할 때, 섬광 X선 실험장치를 활용하여 제트의 형성과 진행과정을 촬영 분석하였다. 성형작약탄에서 제트의 정상적인 생성을 억제하기 위

해 용입체가 고안되었고 이를 통하여 관통을 억제하는 방호메카니즘을 확인하였는데 이것을 제트형성억제(JFI : Jet-Formation Inhibition) 메카니즘이라 정의한다. 확인된 제트형성억제 메카니즘의 결과는 다음으로 요약된다.

- 성형작약탄의 라이너 안에 삽입된 용입체의 형상과 채워지는 부피에 따라 정상적인 제트 형성에 큰 영향을 미친다.
- 용입체가 포함된 탄에 의해 생성된 제트는 정상탄에서 생성된 제트에 비해 상대적으로 낮은 선단 속도(~ 40 %)을 보여주며 쉽게 불균일한 입자로 분절되며 큰 편향각을 갖는다($5.1^\circ \sim 9.0^\circ$).
- 용입체가 포함된 탄으로부터 생성된 제트의 속도는 2.40 ~ 3.24 km/s로 관찰되는데 이는 연강판을 관통할수 있는 최소관통속도(2.70 km/s)에 근접한 것으로 관찰된다. 이는 실험결과가 이론적 결과와 부합하며 용입체가 포함된 탄에서 발생한 제트가 충분한 관통력을 갖지 못하는 것을 설명해 준다.

섬광 X선 장치를 활용한 성형작약탄 실험에서 제트 형성을 방해하여 장갑관통을 억제하는 메커니즘을 시각화하고 분석하였다. 이런 결과는 성형작약탄을 방호하는 메커니즘을 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.

References

[1] V. Madhu, T. Balakrishna Shat, "Armour protection and affordable protection for futuristic combat vehicles," Defense Science Journal, Vol. 61, pp. 394-402, 2011.

[2] Z. Rosenberg, Y. Ashuach, Y. Yeshurun, E. Dekel, "On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets," Internal Journal of Impact Engineering, Vol. 36, pp. 588-596, 2009.

- [3] W. P. Walters, J. A. Zukas, "Fundamentals of shaped charges," John Wiley & Sons, New York, pp. 1-10, 1989.
- [4] B. K. So, "A study on the improvement of penetration capability of shaped charge by controlling the jet mass parameters," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 18, pp. 566-573, 2015.
- [5] W. P. Walters, D. R. Scheffler, "A method to increase the tip velocity of a shaped charge jet," Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics, Vol. 2, pp. 135-144, 2007.
- [6] P. Y. Chanteret, "Studies of maximum velocities for coherent shaped charge jets," Proceedings of the 13th International Symposium on Ballistics, Vol. 2, pp. 327-334, 1992.
- [7] H. Kemmoukhe, S. Savie, S. Terzie, M. Lisov, N. Rezgui, H. Sedra, "Improvement of the shaped charge jet penetration capability by modifying the liner form using AUTODYN-2D," Scientific Technical Review, Vol. 69, pp. 10-15, 2019.
- [8] S. Saran, O. Ayisit, M. S. Yavuz, "Experimental investigations on Aluminum shaped charge liners," Procedia Engineering, Vol. 58, pp. 479-486, 2013.
- [9] P. J. Hazell, T. Lawrence, C. Stennett, "The defeat of shaped charge jets by explosively driven ceramic and glass plates," International Journal of Applied Ceramic Technology, Vol. 9, pp. 382-392, 2012.
- [10] M. Held, "Comparison of explosive reactive armour against different threat levels," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 24, pp. 76-77, 1999.
- [11] M. Held, M. Mayselless, E. Rototaev, "Explosive reactive armor," Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics, Vol. 1, pp. 33-46, 1998.
- [12] M. J. van der Voorde, J. J. A. van der Burgt, M. J. van der jagt-Deutekom, "Defeating the RPG7 threat by using electric power in reactive armour applications," Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics, Vol. 2, pp. 1141-1147, 2007.
- [13] W. Walters, "Introduction to Shaped charges," U.S. Army Research Lab. Report, ARL-SR-150, 2007.
- [14] M. Mayselless, "Effectiveness of Explosive Reactive Armor," ASME Journal of Applied Mechanics., Vol. 78, 051006, 2011.
- [15] L. Yang, J. Xu, "Analysis on the development of active Production system for tanks and armored vehicles," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1855, 012034, 2021.
- [16] O. Ayisit, "The influence of asymmetries in shaped charge performance," International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, pp. 1399-1404, 2008.
- [17] M. Katayama, A. Takeba, S. Toda, S. Kibe, "Analysis of jet formation and penetration by conical shaped charge with the inhibitor," International Journal of Impact Engineering, Vol. 23, pp. 443-454, 1999.
- [18] J. H. Joo, J. H. Choi, "The inhibitor effect on the shaped charge jet penetration," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, pp. 4685-4694, 2020.
- [19] J. H. Joo, J. W. Yoon, "The potential of rubber material as an inhibitor to suppress jet formation of the shaped charge warhead," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 38, pp. 1329-1340, 2024.
- [20] Operator's manual, "EBW firing system FS-17 fire set," Teledyne RISI, Inc. Tracy, CA 95377, 2015.
- [21] M. Held, "Penetration cutoff velocities of shaped charge jets," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 13, pp. 111-119, 1998.