J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(6), 397-404(2019)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.6.397
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

정밀선상성형장약의 침투·관통 성능에 관한 연구

이시은[1], 이주호[2], 문미애[3]

Study on Penetration Performance of Precision Linear Shaped Charge

Si-Eun Lee[1], Juho Lee[2] and Mi-Ae Moon[3]
The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development

ABSTRACT

Linear Shaped Charge (LSC) that is widely used as separation system in aerospace system has to charge lots of explosives due to lack of uniformity. In addition, it is hard to optimize shape of liner and explosives because of manufacturing process. In order to overcome aforementioned drawbacks, Precision Linear Shaped Charge (PLSC) is currently under development. PLSC is made in two steps: prepare liner independently and charge explosive uniformly. In this study, PLSC is designed to have proper amount of explosives and penetration test of PLSC with different stand-off distance from liner to target is conducted to confirm penetration performance. Based on the penetration test results of PLSC, the numerical analysis method using AUTODYN is established and verified. Penetration mechanism and characteristics of PLSC is analyzed from the numerical and experimental results.

초 록

항공우주시스템에서 절단/분리 시스템에 널리 사용되는 선상성형장약은 복합화약 충전량의 불균일로 인해 과량의 복합화약을 충전해야 하며 제작 공정의 특성상 라이너 및 복합화약 형상을 자유자재로 조절하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위하여 라이너를 단독으로 제작하여 균일한 복합화약량을 충전할 수 있는 정밀선상성형장약에 대한 연구 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 정밀선상성형장약이 적정 복합화약량을 갖도록 설계하고 설계된 정밀선상성형장약의 최적 침투·관통 성능을 확인하기 위하여 라이너로부터 표적까지의 거리에 단차를 두어 이격거리에 따른 침투·관통 성능시험을 수행하였다. 정밀선상성형장약의 침투·관통 성능시험 결과를 바탕으로 AUTODYN 기반의 수치 해석 환경을 구축하였다. 수치해석 및 시험 결과의 비교 분석을 통해 정밀선상성형장약의 침투·관통 메커니즘과 특성을 분석하였다.

Key Words : Linear Shaped Charge(선상성형장약), Precision Linear Shaped Charge(정밀선상성형장약), Stand-off(이격거리), Penetration Performance(침투 성능), AUTODYN(오토딘)

Ⅰ. 서 론

항공우주시스템의 절개/분리 시스템에는 다양한 절개/분리 방식이 적용되고 있다[1,2]. 절개/분리 방식에는 볼트 등의 체결구조를 복합화약으로 절단 후 구속을 해제하여 분리하는 방식, 팽창튜브(Expanding

† Received : January 15, 2019 Revised : April 25, 2019 Accepted : May 16, 2019
[1] Researcher, [2] Senior Researcher, [3] Senior Researcher
[2] Corresponding author, E-mail : jhlee117@add.re.kr, ORCID 0000-0002-1642-5922
© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Tube)를 이용하여 기체를 절단하는 방식, 그리고 선상성형장약(LSC, Linear Shaped Charge)을 이용하여 금속 구조물을 절단하는 방식 등이 있다.

이 중, 선상성형장약은 알루미늄, 구리 등의 금속관에 PETN, RDX, HNS-Ⅱ 등의 복합화약을 충전하여 인발 공정 등을 통해 뒤집어진 V자 단면을 가지는 관 형태로 제작한 것으로 단위 길이 당 충전 복합화약량을 다양하게 제조할 수 있으며 오래전부터 항공우주시스템의 절개/분리에 적용되어 왔다[3,4]. 그러나 기존의 선상성형장약은 금속 라이너(Liner) 형상의 비대칭 및 복합화약 충전량의 불균일에 의해 절단력의 재현성(Repeatability)이 떨어지는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위해 최적 복합화약 충전량보다 많은 복합화약량을 충전하고 있다. 또한, 선상성형장약은 제조 공정의 특성상 라이너 및 복합화약의 형상을 자유자재로 조절하기 어려워 최적의 침투·관통 성능을 내는데 어려움이 있다[5].

선상성형장약의 단점을 해결하기 위하여 정밀선상성형장약(PLSC, Precision Linear Shaped Charge)이 제안되었다[5]. 정밀선상성형장약은 설계자가 원하는 재질을 적용한 라이너를 단독으로 정밀하게 제작하여 라이너가 완성된 후 복합화약을 별도로 충전하므로 복합화약을 균일한 밀도로 충전할 수 있다. 따라서 기존의 선상성형장약과 비교하여 상대적으로 적은 복합화약 충전량으로 우수한 침투/절단성능을 보인다. 또한, 라이너 지지부, 라이너 높이, Neumann 부 형상(뒤집어진 V 형상) 등 라이너 형상의 설계 변경이 용이하여 침투·관통 성능의 최적화가 가능하다. 선상성형장약은 최적의 침투/관통 성능을 위해 최적 이격거리(Optimum Stand-Off)를 유지하여야 한다. 정밀선상성형장약의 경우, 템퍼(Tamper) 등을 적용하여 이격거리를 조절함으로써 침투·관통 성능을

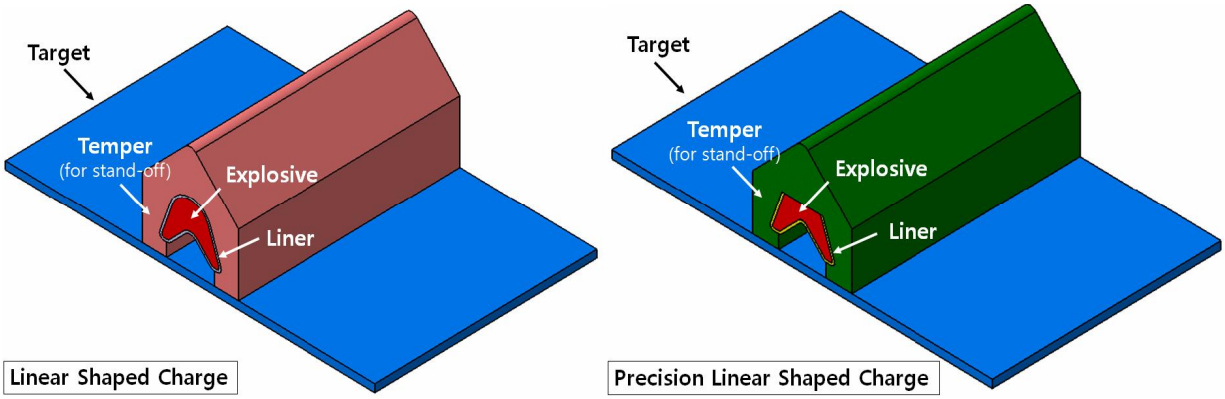


Fig. 1. Linear Shaped Charge(LSC) and Precision Linear Shape Charge(PLSC)

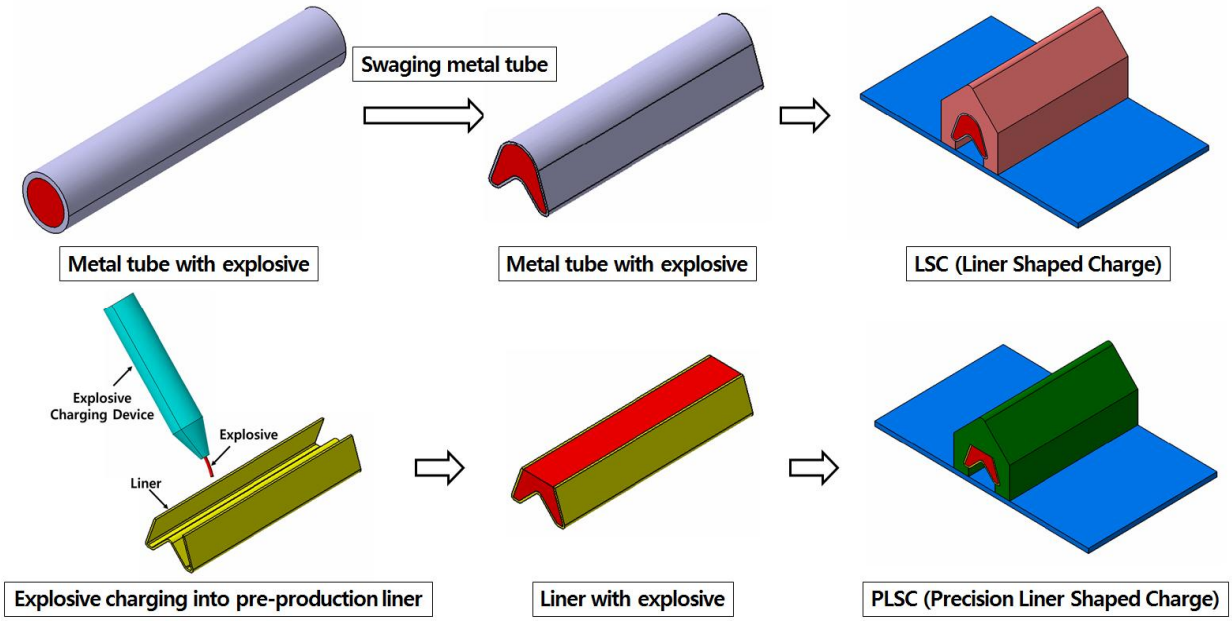


Fig. 2. Manufacturing process of LSC and PLSC

극대화시킬 수 있다. Figs. 1, 2에 선상성형장약과 정밀선상성형장약의 개념도와 제작 공정을 나타내었다.

본 연구에서는 설계된 정밀선상성형장약의 최적의 침투·관통 성능을 확인하기 위하여 라이너로부터 표적까지의 거리에 단차를 두어 이격거리에 따른 침투 관통 성능을 실험을 통해 확인하였다. 또한, 정밀선상성형장약의 침투·관통 성능시험 결과를 바탕으로 AUTODYN 기반의 수치 해석 환경을 구축하였으며, 시험 결과와의 비교 분석을 통해 해석 기법을 검증하고 침투·관통 성능을 분석하였다.

II. 침투·관통 성능시험

2.1 시험 방법 및 구성

본 연구에 사용된 정밀선상성형장약 라이너는 약 4.3 g/m 정도의 복합화약을 충전할 수 있도록 설계 및 제작하였다. 복합화약의 로트별 복합화약 성능 차이를 배제하고자 동일 로트 복합화약을 충전하여 시편시험을 수행하였다. 정밀선상성형장약의 단위 길이당 충전 복합화약량을 시험에 앞서 측정한 결과, 표준편차가 0.04g/m이며 평균값을 기준으로 최대 오차가 1.4%로 균일하게 복합화약이 충전된 것을 확인하였다. 라이너의 재질은 구리(Cu 99.8%)이고, PETN 80%와 실리콘 레진(Sylgard) 20%로 구성된 복합화약을 사용하였다.

시험 시편은 정밀선상성형장약이 삽입되는 덮개와 정밀선상성형장약 밑면을 지지하고 덮개에 고정하는 지지대(고정판), 그리고 표적으로 구성하였으며, 구조물의 재질은 모두 AL6061-T6이다. 시험 시편을 Fig. 3의 3차원 모식도와 같이 설계하여, Fig. 4와 같이 준비하였다.

정밀선상성형장약의 이격거리를 변화시키기 위해 표적의 두께에 0.2~3.0mm 범위에서 단차를 주어 Fig. 5와 같이 가공하였다. 지지대(고정판)의 두께가 1.0mm이므로, 정밀선상성형장약 하단에서 표적까지의 최종 이격거리는 위치에 따라 1.2~4.0mm가 된다. 각 단차의 길이는 20mm로서, 시험의 정확성을 위해

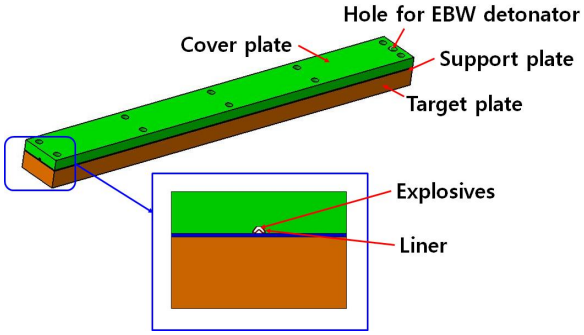


Fig. 3. 3-D diagram of test specimen

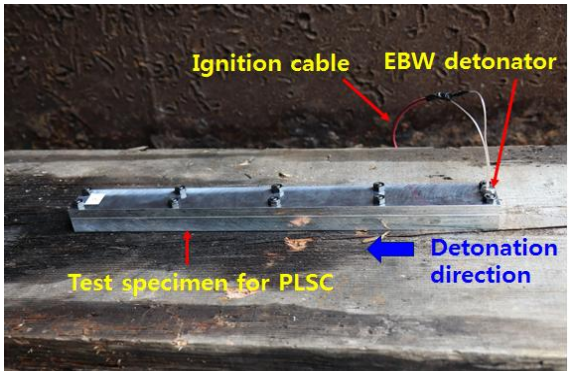


Fig. 4. Test specimen

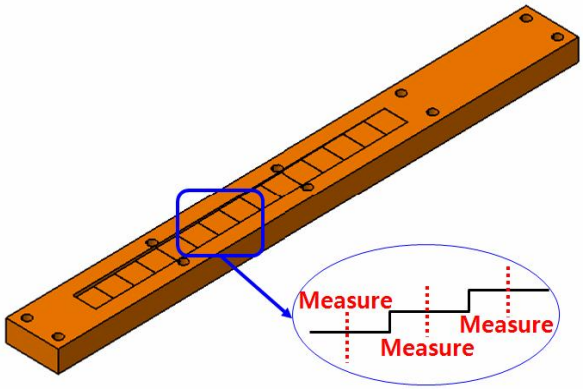


Fig. 5. Measurement standard of penetration depth

서는 이격거리 간의 간격을 증가시키는 것이 좋으나, 경제성 측면에서는 이격거리 간의 간격을 감소시켜 하나의 시험으로 많은 결과를 얻는 것이 좋다. 본 연구에서는 총 7개의 동일한 시편을 이용, 이격거리에 따른 정밀선상성형장약의 침투·관통 성능시험을 반복 수행하였다. 기폭은 시험 시편(정밀선상선형장약)의 한쪽 끝에 EBW(Exploding Bridge Wire) 기폭관을 연결한 후, 이를 고전압 발파기로 기폭시키는 방식으로 이루어졌다.

성능시험 후 표적의 침투 깊이 측정 시, 표적 침투 깊이를 Fig. 5와 같이 각 단차의 중앙 위치에서 측정하였다. 이와 같이 측정한 이유는 이격거리가 바뀌는 단차의 끝에서는 옆 이격거리의 제트가 넘어와서 영향을 받거나 표적 구조물의 변화로 인한 침투 성능 차이를 보일 것으로 예상되기 때문이다.

2.2 시험 결과 및 분석

총 7개의 시편에 대해 침투·관통 성능시험을 수행하였으며, Fig. 6과 같이 표적에 라이너의 침투 흔적이 선명하게 나타남을 확인하였다. 표적 내 각 단차 중앙 부분을 절단하여 Fig. 7과 같이 침투 깊이를 현미경을 이용하여 측정하였다. 측정한 침투 깊이의 평균을 계산하여 이격거리에 따른 침투 깊이(평균값, 최솟값, 최댓값, 표준편차)를 Table 1에 정리하였다.

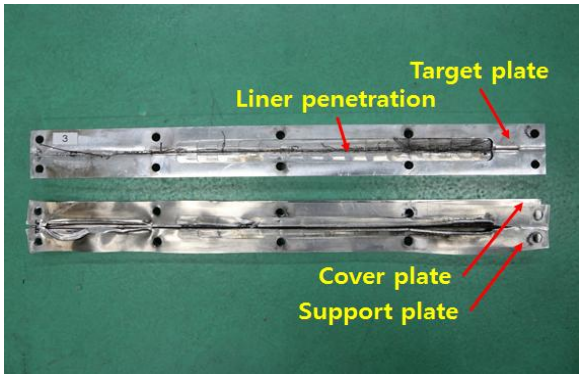
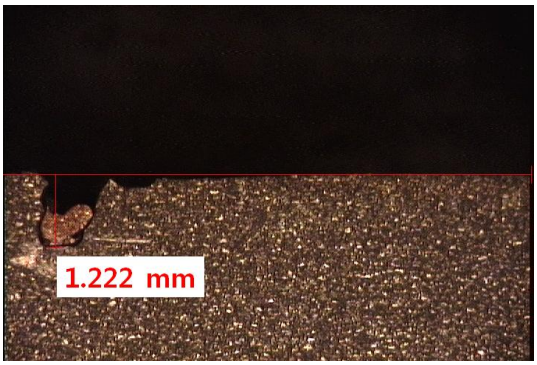
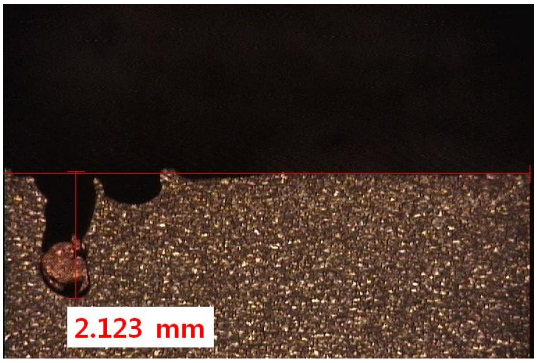


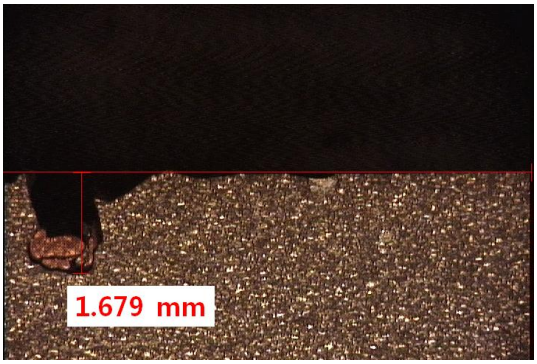
Fig. 6. Test specimen after penetration test



(a) Stand-off : 1.2 mm



(b) Stand-off : 1.8 mm



(c) Stand-off : 2.4 mm

Fig. 7. Electron microscopic image for penetration depth measurement (Experiment 3)

Table 1. Penetration depth by change of stand-off

No.	Stand-off (mm)	Penetration depth (mm)			
		Mean	Min.	Max.	S.D.
1	1.2	1.442	1.222	1.629	0.116
2	1.4	1.513	0.851	2.037	0.370
3	1.6	1.964	1.617	2.259	0.190
4	1.8	2.019	1.740	2.296	0.196
5	2.0	1.987	1.271	2.469	0.330
6	2.2	1.760	0.728	2.30	0.551
7	2.4	1.709	0.691	2.086	0.421
8	2.6	1.601	0.592	2.185	0.517
9	2.8	1.629	0.925	2.246	0.425
10	3.0	1.643	0.567	2.259	0.512
11	3.2	1.296	0.543	2.222	0.587
12	3.4	1.927	1.123	2.333	0.427
13	3.6	1.666	0.666	2.098	0.439
14	3.8	1.726	0.740	2.308	0.422
15	4.0	1.885	1.259	2.358	0.374

시험 결과, 이격거리가 1.8mm일 때, 최대 침투 깊이를 나타냄을 확인하였다. 해당 이격거리에서 침투 깊이의 평균값(2.019mm)과 최솟값(1.740mm) 모두 가장 우수하였으며, 표준편차가 작아 안정적인 침투 성능을 보여주었다. Fig. 8에서 이격거리에 따른 침투 깊이를 확인할 수 있다.

1.8mm 이하의 이격거리에서는 정밀선상성형장약의 제트 형상이 충분히 발달되지 못하여 침투 성능이 온전히 발휘되지 못했을 것으로 예측되며 1.8mm의 최적이격거리를 가질 때, 제트의 형상이 충분히 발달하여 표적에 침투되었을 것으로 판단된다. 이격거리가 1.8mm 이상으로 증가함에도 침투 깊이는 증가하지 않는다. 이는 침투에 주 영향을 미치는 전면부 제트의 질량이 최적이격거리 이후 증가하지 않고 도리어 제트 속도가 감소하는 등의 이유로 침투 성능이 저하되는 것으로 예측된다.

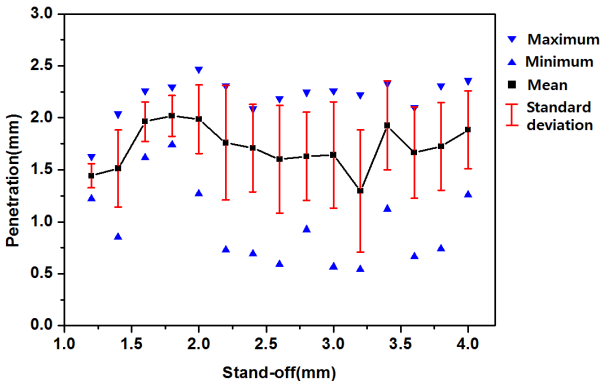


Fig. 8. Measurement results of penetration performance

Ⅲ. 전산수치해석

3.1 수치해석 모델링 요약

본 연구에서는 상용 하이드로코드(Hydrocodes)의 하나인 AUTODYN을 활용하여 정밀선상성형장약, 덮개 및 표적의 모델링을 수행하였다. 최신 상용 하이드로코드들은 복합화약 및 금속의 다양한 재료 모델과 오일러-라그랑지 상호작용을 지원하고 있어 구조물에 가해지는 폭발 하중 해석에 활용성이 높다. 절개/분리 시스템 중 하나인 폭발볼트와 MDF(Mild-detonating Fuse) 기반 평판 절개 장치 개발 과정에 AUTODYN이 활용된 바 있다[6-9].

정밀선상성형장약 시험 시편의 주요 이격거리(1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0mm) 절단면에 대해 2차원 평면 변형(Plane Strain)으로 모델링을 수행하였다. 형상 모델링 및 라그랑지(Lagrange) 요소 모델링은 ANSYS Workbench 환경에서, 오일러(Euler) 영역 모델링은 AUTODYN 환경에서 수행하였다. 제트로 인한 침투·관통, 폭압으로 인한 변형이 예상되는 표적, 지지대, 덮개(Al 6061-T6)는 라그랑지 요소로 모델링을 수행하였다. 매우 빠르며 큰 에너지가 생성되는 폭발 반응이 있는 고폭약(주변 공기 포함)과 이로 인해 형상이 매우 빠르게 변화하는 라이너는 오일러 요소로 모델링을 수행하였다.

제트의 침투·관통이 발생하여 정확한 계산이 필요한 표적의 작은 구역(4mm × 4mm)에서만 라그랑지 요소의 크기를 0.05mm로 세밀하게 구성하였다. 동시에, 나머지 라그랑지 요소의 크기를 0.1mm로 하여 계산 비용을 감소시켰다. 오일러 영역의 전체 크기도 최소화하여 계산 비용을 감소시켰으며, 요소의 크기는 0.025mm로 표적 주요 위치 라그랑지 요소 크기의 절반으로 구성하였다.

오일러 영역의 네 가장자리에 Flow-out 경계조건을 적용하여, 경계에 도달한 고폭약과 라이너가 실제와 동일하게 오일러 영역에 축적되지 않고 빠져나가도록 하였다.

표적, 지지대 및 덮개는 볼트/나사로 강하게 체결되어 있다. 따라서 구조물들을 하나의 구조물로 모델링을 수행하였으며, 접착(Bonded)된 것과 동일하게 해석된다.

폭발은 정밀선상성형장약 중심선 위, 고폭약 상단에서 시작되도록 정의하였다. 해석시간은 40μs까지 수행하였다. 대표적으로 이격거리가 1.2mm와 4.0mm인 경우에 대한 정밀선상성형장약 시험 시편 수치해석 모델을 Fig. 9에 나타내었다.

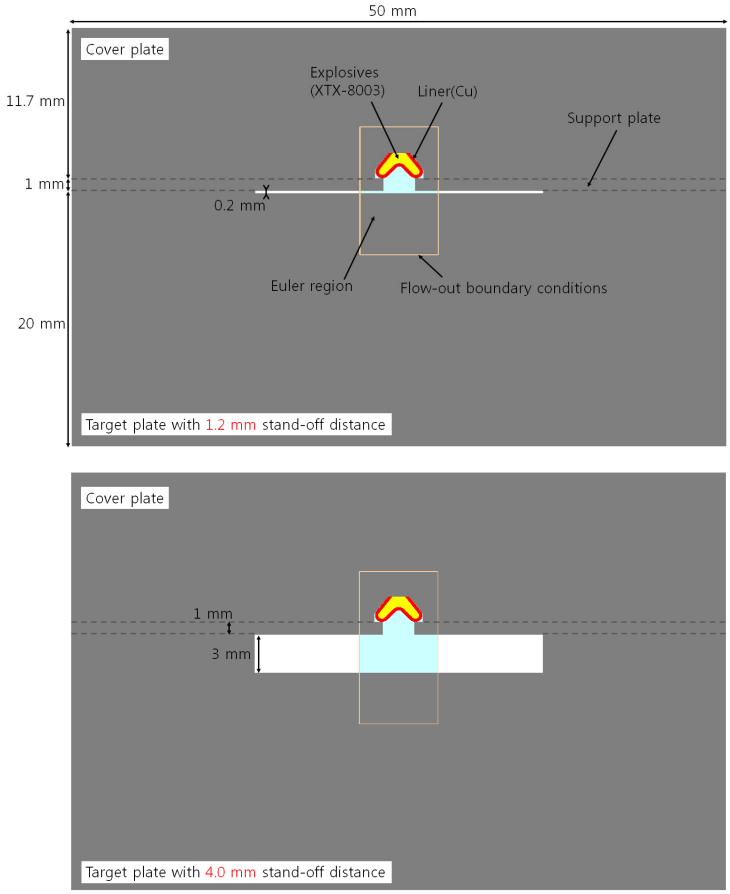


Fig. 9. Numerical models of PLSC test specimens (1.2mm and 4.0mm stand-off distance)

3.2 재료 물성 모델링

하이드로코드에서는 응력, 변형, 내부 에너지간의 관계를 정의해줄 재료 물성 모델을 필요로 한다. 응력 텐서는 정수압과 편차 응력 텐서로 나눌 수 있으며, 유체의 경우 정수압과 비부피, 그리고 비에너지 사이의 관계인 상태방정식이 요구된다. 고체 재료는 추가로 전단탄성률과 소성 변형의 기준인 항복 응력 기준을 정의해주어야 하며, AUTODYN에서는 Strength 모델로 제공된다.

본 연구에서는 AUTODYN에서 제공하는 재료 모델과 물성값을 활용하였다. 우선, 복합화약의 재료 모델로 고폭약의 폭발 및 폭발 부산물의 팽창을 폭넓게 다룰 수 있는 Jones-Wilkins-Lee 상태방정식을 사용하였다[10]. 물성값이 알려진 복합화약 중, XTX-8003(밀도 1.54g/cm^3)이 정밀선상성형장약에 적용된 복합화약과 조성이 매우 유사하여 이의 값을 사용하였다. 주변 공기는 이상기체 상태방정식을 활용하여 모델링하였다.

라이너 재료는 구리이며, Shock 상태방정식과 Multi-linear Isotropic Hardening Strength 모델을 사용한 재료 물성값이 제공되고 있다. Shock 상태방정식은 Shock Hugoniot을 기준점으로 하는 Mie-Gruneisen 형태의 상태방정식이다[11]. 금속에서의 충격파 통과 시 재료 상태 변화를 해석할 수 있어 본 경우와 같이 고폭약의 폭발로 충격파하다. Multilinear Isotropic Hardening Strength 하므로 본 경우와 같이 대변형이 있는 경우에 적합하다.

표적, 지지대, 덮개는 AL6016-T6로 제작되었으며, Shock 상태방정식과 Steinberg Guinan Strength 모델을 사용한 재료 물성값이 제공되고 있다. Steinberg Guinan Strength 모델은 항복 응력과 전단탄성률을 유효변형률, 압력, 내부 에너지(온도)로 정의하여 고속 충돌 및 관통과 같이 고속 거동에서의 해석 정확성을 높일 수 있다[11].

침투 및 관통 현상 모델링을 위해 재료 소진 조건인 Erosion (Geometric strain) 값을 조절해가며 실험값과의 비교를 통해 적절한 파괴 조건을 선정하였다. Erosion은 실제 물리적 현상 해석을 위해 도입된 것이 아니라 수치해석과정에서 매우 심하게 일그러진 라그랑지 요소를 삭제하여 계산 오류를 막기 위한 것이나, 침투 및 관통 해석에 있어 Erosion 값으로 150~200%를 사용한 경우 실험적 침투 및 관통 현상과 유사한 해석 결과를 제시한다고 알려져 있다[12, 13]. 본 연구에서는 150% 값을 사용한 경우, 실험과 유사한 침투 깊이가 나옴을 확인하였다.

Ⅳ. 정밀선상성형장약 침투·관통 성능 분석

4.1 침투·관통 메커니즘 및 특성 분석

Figures 10, 11은 정밀선상성형장약의 기폭으로 인해 제트가 생성되는 과정과 표적에의 침투·관통 과정을 보여주고 있다. 우선, 정밀선상성형장약의 기폭으로 인해 고폭약이 폭발하며, 고폭약과 라이너의 뒤집어진 V 형상으로 인해 양쪽의 라이너가 중심으로

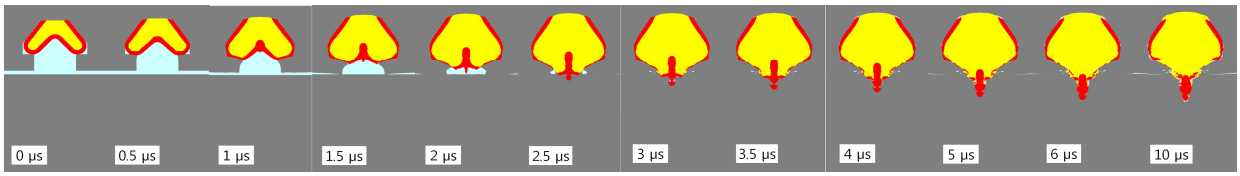


Fig. 10. Numerical results of PLSC test specimen (1.2mm stand-off distance)

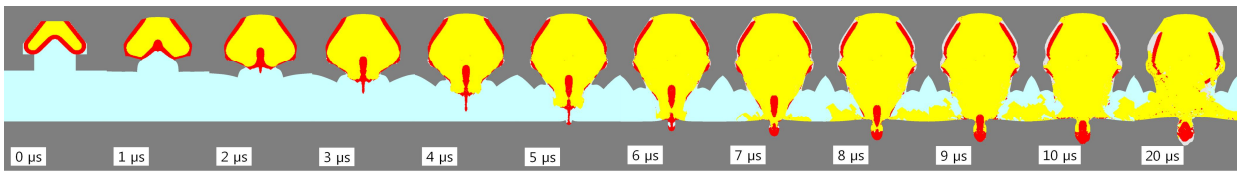


Fig. 11. Numerical results of PLSC test specimen (4.0mm stand-off distance)

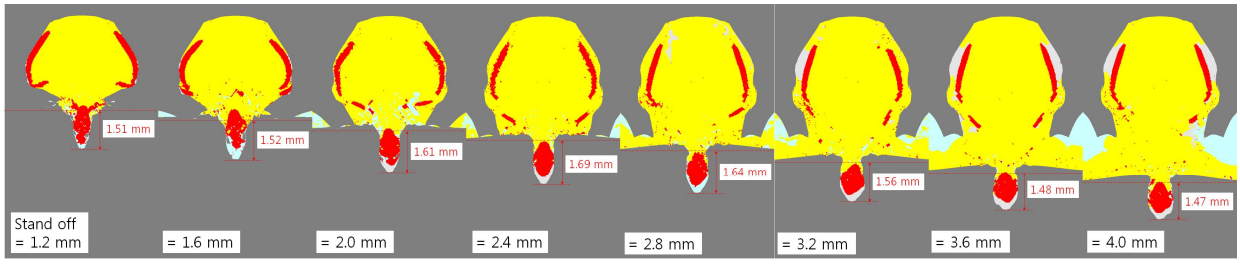


Fig. 12. Numerical results of PLSC test specimens at 20μs

모이는 것을 알 수 있다. 라이너의 수평방향 성분의 속도는 상쇄되고 수직방향 성분의 속도는 중첩되어 수직방향으로 매우 빠른 제트가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

제트의 발달 과정을 분석해보면, 이격거리가 충분하지 않으면 제트가 완전히 형성되기 전에 절단 구조물에 제트가 충돌하여 침투·관통 효율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 반대로, 이격거리가 필요 이상으로 증가되면 제트가 길어지며 끊어지기 시작하여 질량이 감소하고, 속도도 감소하여 침투·관통 효율이 낮아지는 것으로 보인다.

이격거리 4.0mm 기준으로 약 4.7μs에 제트가 표적에 침투하기 시작함을 확인할 수 있다. 이격거리가 감소함에 따라 제트가 표적에 침투하기 시작하는 시간이 감소하며, 이격거리 1.2mm 기준으로 약 2.1μs에 제트가 표적에 침투한다.

서로 다른 이격거리에 대한 해석 결과로부터 침투 깊이를 Fig. 12와 같이 변형 전 표면으로부터 최대 침투 위치까지의 거리를 계산하였다. 이격거리가 2.4 mm일 때, 가장 우수한 침투 성능(침투 깊이 1.69mm)을 보여주며, 이격거리가 감소하거나 증가함에 따라 침투 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이격거리가 증가함에 따라 침투된 영역의 좌우 폭이 증가하는 특징도 보인다.

4.2 수치해석 및 성능시험 결과 비교 분석

수치해석에서 얻은 침투 깊이를 성능시험 결과(평균값, 최솟값, 최댓값, 표준편차)와의 비교를 위해 하나의 그래프(Fig. 13)에 정리하였다. 최적 이격거리를 기준으로 이격거리가 감소하거나 증가함에 따라 침투 깊이가 단순히 감소하는 수치해석 결과와 비교하여 성능시험 결과는 복잡한 양상을 보인다. 최적의 해석 모델을 구성하였음에도 실험과 해석 결과에 차이를 보이는 것은 정밀한 성능(침투 깊이 등) 관점에서는 재현성이 떨어지는 파이로테크닉 장치의 특성

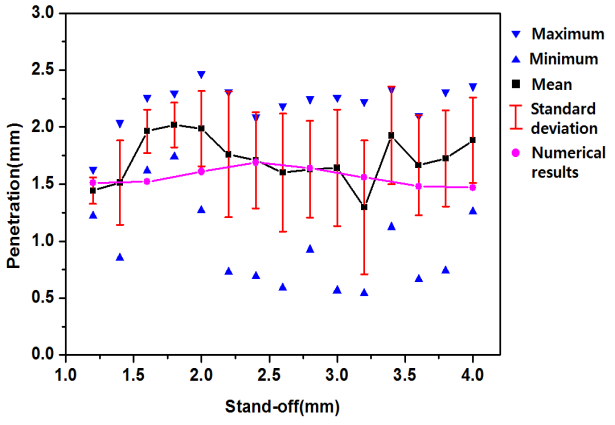


Fig. 13. Comparison of measurement and numerical results

과, 완벽한 모델링에 어려움이 있는 복합화약(큰 하중, 매우 빠른 반응, 복잡한 물리적 현상)의 특성 때문이라고 판단된다. 또한, 라이너를 단독으로 제작한 후 복합화약을 별도로 충전하여 복합화약을 균일한 밀도로 충전하였음에도 실험에 따른 편차가 큰 것을 알 수 있다. 수치해석 결과 분석을 통해 침투 메커니즘을 확인하였으며, 성능시험에서 나타난 복잡한 양상(이격거리 3.0~3.6mm에서의 침투 깊이 변화)은 정밀선상성형장약의 특성이기보다는 불확실성이 큰 복합화약 시험의 특성으로 판단된다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 적정 복합화약량을 갖도록 설계된 정밀선상성형장약의 이격거리에 따른 침투·관통 성능시험을 수행하였다. 정밀선상성형장약의 침투·관통 성능시험 결과를 바탕으로 수치 해석 환경을 구축하였다. 수치해석 및 시험 결과의 비교 분석을 통해 정밀선상성형장약의 침투·관통 메커니즘과 특성을 분석하였다. 본 연구의 수치해석 기법을 활용하면 정밀선상성형장약의 설계 과정에서 다양한 설계 변수에 대한 해석을 통해 논리적으로 설계 변경 및 개선이 가능하며, 침투·관통 성능을 시험에 앞서 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1) Lee, H.-N., Jang, S.-G. and Oh, J.-Y., “Reliability Prediction of a Pin Puller,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 8, 2013, pp. 625~631.

2) Choi, W.-H. and Shin, S.-M, “The Separating Cover Using an Explosive Bolt and Spring Lever,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45, No. 11, 2017, pp. 922~931.

3) Smith, F. Z., “Pyrotechnic Shaped Charge Separation Systems for Aerospace Vehicles,” NASA Technical Memorandum, NASA TM X-1607, 1968.

4) Brauer, K. O., *Handbook of Pyrotechnics*, Chemical Publishing Co., New York, 1974.

5) Vigil, M. G., “Precision Linear Shaped Charge Designs for Severance of Aluminium Materials,” SANDIA Report, SAND 92-2449, 1992.

6) Lee, J. H., Han, J.-H., Lee, Y. J., and Lee, H. J., “Separation characteristics study of ridge-cut explosive bolts,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 39, 2014, pp. 153~168.

7) Lee, J. H., Han, J.-H., Lee, Y. J., and Lee, H. J., “A Parametric Study of Ridge-cut Explosive

Bolts using Hydrocodes," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 16, No. 1, 2015, pp. 50~63.

8) Lee, J. H., Hwang, D.-H., Jang, J.-K., Kim, D.-J., Lee, Y. J., Lee, J.-R. and Han, J.-H., "Pyroshock Prediction of Ridge-cut Explosive Bolts Using Hydrocodes," *Shock and Vibration*, Vol. 2016, 2016, Article ID 1218767.

9) Lee, J. H., "Numerical Analysis of MDF for Aluminum Plate Cutting," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 6, 2016, pp. 134~141.

10) Lee, E. L., Hornig, H. C., and Kury, J. W., "Adiabatic expansion of high explosive detona-tion products," Lawrence Radiation Laboratory, UCRL-50422, 1968.

11) Meyers, M. A., *Dynamic Behavior of Materials*, Wiley, New York, 1994.

12) Zukas, J. A., *Introduction to Hydrocodes*, Elsevier, Amsterdam, 2004.

13) Tham, C. Y., Tan, V. B. C., and Lee, H. P., "Ballistic impact of a KEVLAR helmet: Experiment and simulations," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 304~318.