

운동에너지탄용 복합재 이탈피의 제조에 관한 연구

A Study on the Fabrication of the Composite Sabot for a Kinetic Energy Projectile

최재호*

Choi, Jaeho

ABSTRACT

In order to substitute current aluminum sabot and to increase the penetration performance of the kinetic energy projectiles, the research and development program for composites sabot has been conducted. For carbon/epoxy composites sabot, unidirectional carbon fiber reinforced epoxy prepreg was chosen and thick sectioned composites preforms with the different fiber angles along the circumferential direction of sabot were prepared by compression molding under the careful processing conditions at 150°C for 1hour with 70kgf/cm² curing pressure. The composites sabot demonstrated a weight reduction by approximately 30% than that of current aluminum sabot. The muzzle velocity of a kinetic energy projectile with composites sabot was measured to be about 63m/s higher than that with aluminum sabot. These results imply that the penetration performance is expected to be considerably increased when the composite sabot is applied to the kinetic energy projectiles.

주요기술용어(주제어) : Penetration Performance(관통 성능), Kinetic Energy Projectile(운동에너지탄), Carbon/Epoxy Composite(탄소섬유강화 에폭시수지복합재료), Composite Sabot(복합재 이탈피), Compression Molding(압축 성형), Muzzle Velocity(포구속도)

1. 머리말

관통자의 높은 밀도와 빠른 포구 속도를 이용하여 표적을 파괴시키는 운동에너지탄(Kinetic Energy Projectile of Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot Ammunition)은 성형작약탄(High Explosive Anti Tank Ammunition)과 함께 전차(MBTs : Main Battle Tanks)의 대표적인 무기로

사용되고 있다.

이탈피는 추진 에너지를 관통자에 전달하여 관통자가 포구 밖으로 비행할 수 있게 하며, 또한 관통자를 포강 내에서 지지 하고, 탄 발사 시 추진제의 폭발로부터 얻어지는 고압의 가스가 포구 밖으로 빠져 나오지 못하게 막는 역할을 한다. 이탈피는 탄이 포구를 벗어나자마자 공기 저항력(air resistance)에 의해 세 부분으로 나뉘어져 관통자로부터 이탈하게 된다. 최종적으로 관통자만이 목표에 도달하여 표적을 타격하게 된다. 즉, 이탈피는 나사산 모양의 그루브(groove)로 관통자와 체결되며, 관통자가 포강으로부터 표적까지 비행하여 소기의 목적을 달성하도록 돕는 역할

† 2006년 7월 11일 접수~2006년 8월 28일 게재승인

* 국방과학연구소 기술연구본부(ADD TRC)

주저자 이메일 : jullius@add.re.kr

을 하는 운동에너지탄의 핵심 부품 중 하나이다^[1]. 운동에너지탄의 관통력은 표적에의 충돌 속도에 비례하기 때문에, 탄의 운동에너지를 증대시키기 위해서는 이탈피를 최대한 경량화 시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 이탈피 경량화를 위한 연구는 궁극적으로 운동에너지탄의 성능을 향상시키기 위해 매우 중요한 이슈로 주목받고 있다

탄소섬유강화 고분자 복합재(carbon fiber reinforced polymeric matrix composites)는 금속이나 여타 재료들에 비해 밀도가 낮고, 비 강도가 높아서, 운동에너지탄의 이탈피 재료로 널리 사용되고 있는 알루미늄 합금을 대체할 수 있는 유력한 소재로 각광받고 있다.

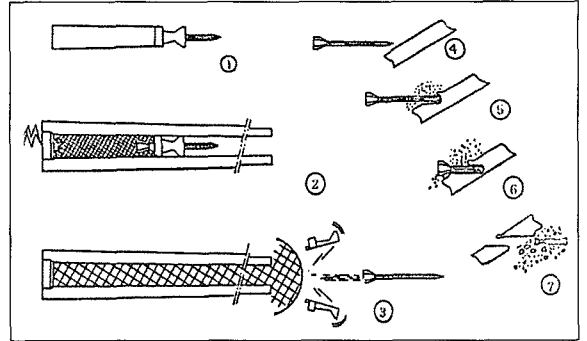
본 논문에서는 기존의 운동에너지탄 알루미늄 이탈피 소재를 대체하고, 궁극적으로는 운동에너지탄의 관통 성능을 향상시키기 위하여 탄소섬유강화 에폭시 수지 복합재의 설계와 제조공정에 관한 연구를 기술하였다. 본 연구를 통해 확립된 복합재 제조 공정을 통하여 복합재 이탈피가 성공적으로 제작되었으며, 구조안전도 시험 등을 수행하여 성능을 확인하였다.

2. 이론적 배경

운동에너지탄의 이탈피는 그림 1과 같이 포구를 벗어나자마자 세 조각으로 분리되어 떨어져 나간다. 아래는 일반적으로 잘 알려진 힘-가속도 관계식이며, 비행체에 대해 널리 적용할 수 있다.

$$a = \frac{F}{m} = A \cdot \frac{P}{m} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot P}{m_s + m_p}$$

여기서, a는 탄의 가속도, F는 힘, m은 탄의 질량 (m_s 는 이탈피의 질량, m_p 는 관통자의 질량), A는 탄의 단면적, P는 추진 압력, r은 탄의 반경을 뜻한다. 관통자의 무게가 동일하다고 가정하면, 이탈피 경량화를 통하여 탄 조립체가 가벼워질수록 탄의 비행 속도가 증가한다. 더구나 이탈피 경량화는 충돌 속도를 증대시켜 탄의 관통 성능을 향상시킬 뿐 아니라, 감



[그림 1] 운동에너지탄의 비행 원리와 이탈피의 역할

량된 무게 만큼 관통자의 길이를 증가시킬 수 있는 설계 변수로 작용할 수도 있다.

3. 복합재 이탈피의 제조

가. 소재 선정

경량 이탈피 용으로 가장 적합한 소재는 비 강도와 비 강성이 높은 재료들이다. 탄소섬유강화 고분자기지 복합재료(이하 복합재)는 밀도가 낮고 섬유 방향으로의 강도와 강성이 높기 때문에 우수한 비 강도/강성 특성을 가지지만, 섬유 수직 방향으로의 기계적 물성이 취약하다는 단점이 있다. 다시 말해 복합재는 보강 섬유의 방향에 따라 물성이 다른 이방성(anisotropic) 재료이다. 이러한 이유로, 복합재는 충분한 기계적 물성을 확보하기 위해 서로 다른 섬유 배향으로 적층하여 사용되어진다.

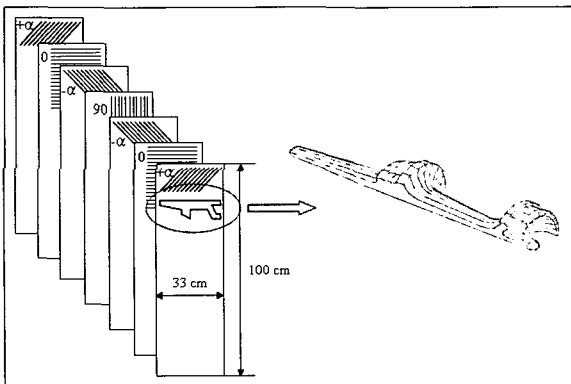
본 연구에서는 원소재로 탄소섬유강화 에폭시(이하 탄소섬유/에폭시) 일방향 프리프레그(prepreg)를 선정하였다(SK Chemicals Co., USN175BX). USN175BX의 탄소섬유는 polyacrylonitrile(PAN)계 전구체를 사용한 T-700 급이며, 에폭시 수지는 DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol-A) 타입이다. 프리프레그의 두께는 0.175mm이며, 단위면적 당 질량은 261g/m²이었다. 원소재의 기계적 물성은 표 1에 나타내었다.

나. 프리프레그 적층

프리프레그 일곱 플라이(이하 서브세그먼트)를 서로 다른 배향 각도로 적층한 다음, 이탈피 모양의 철

[표 1] 원소재(SK USN175BX)의 기계적 물성

Longitudinal Young's modulus	E_1	138.2GPa
Transverse Young's modulus	E_2	11.8GPa
In-plane shear modulus	G_{12}	103.2GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.31
Longitudinal tensile strength	X_T	1,973.0MPa
Longitudinal compressive strength	X_C	836.4MPa
Transverse tensile strength	Y_T	29.5MPa
Transverse compressive strength	Y_C	12.4MPa
In-plane shear strength	S	101.6MPa

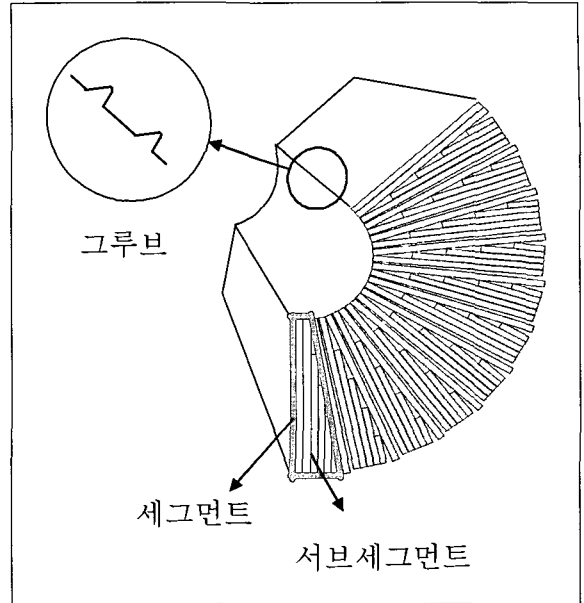


[그림 2] 복합재 이тал피의 형상과 섬유 적층 구조

형을 사용하여 절단하였다. 복합재 이тал피의 전체적인 형상과 섬유 적층 배향은 그림 2에 나타내었다. 서브세그먼트 내의 각 프리프레그는 [0], [+a], [-a], [90] 도 ($15^\circ \leq a \leq 75^\circ$)와 같은 각기 다른 배향 각도를 가진다.

일곱 플라이의 프리프레그가 적층된 서브세그먼트를 그림 3과 같이 부채꼴 모양으로 적층한다. 이렇게 적층된 상태를 세그먼트라 명명하였고, 이 세그먼트의 원주각은 10° 이다. 최종적으로 12개의 세그먼트를 관통자의 원주방향으로 적층하여 120° 의 이탈피 한 조각의 프리폼(preform)을 만들었다. 이 때, 프리폼은 진공상태의 금형에서 30분 동안의 배킹 공정을 거쳤다.

본 연구에서 제시된 섬유배향 설계안은 두 가지 이



[그림 3] 이탈피 프리폼의 적층 형상

[표 2] 섬유 배향 설계안

설계안	섬유 배향	특징
I	$[+a^\circ/0^\circ/-a^\circ/90^\circ/-a^\circ/0^\circ/+a^\circ]$	그루브 전단 강도
II	$[0^\circ/+a^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-a^\circ/0^\circ]$	축방향 압축 강도

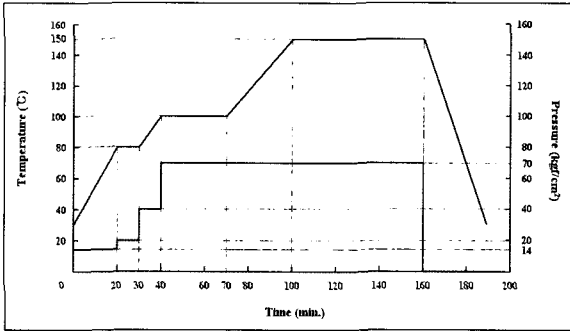
며 표 2에서 확인할 수 있다.

“Type I”은 그루브의 전단 강도 향상에 초점을 둔 설계안이다. $[\pm a]$ 의 섬유 배향은 관통자와 복합재 이탈피 사이의 계면 전단 강도 향상에 중요한 역할을 한다. “Type II”의 섬유 배향은 [0] 방향을 많이 분포하여 길이 방향으로의 인장 및 압축강도 향상에 초점을 두고 설계되었다^[2].

다. 복합재 이탈피 제작

개발된 복합재 이탈피는 길이 500mm이고 직경 120mm로서, 기존 알루미늄 이탈피에 비해 추진체와 접촉하는 부분의 길이가 더 길어졌다. 이탈피의 완전한 형상을 만들기 위해 120° 프리폼을 금형에 넣고 압축성형으로 경화시킨다. 이 때 프리폼은 정수압 프

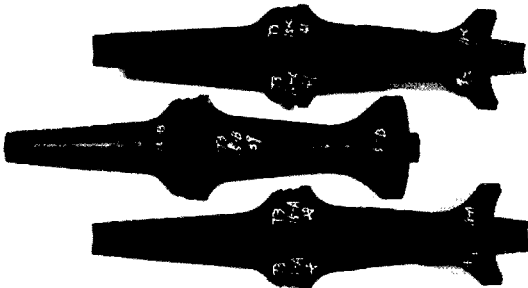
레스에 부착된 금형의 상형에 의해 가압된다. 경화 사이클은 dielectrometry를 사용하여 결정하였고, 이때 얻어진 경화 조건은 그림 4와 같다.



[그림 4] 복합재 이탈피 제작에 적용된 경화 사이클

복합재 이탈피는 직경이 120mm로 매우 두껍기 때문에 완전 경화시키기 위해서는 일반적인 온도 조건보다 더 높게 설정해야 한다. 복합재 이탈피의 경화를 위해 첫 번째 가압은 14kg/cm²로 상온에서 20분간 실시하였다. 금형 온도가 80°C가 되었을 때, 40 kgf/cm²의 압력을 10분간 가하였다. 금형의 온도가 100°C가 되었을 때, 최종적으로 70kgf/cm²의 압력 조건을 적용하였다. 최종 가압 공정은 금형 온도가 150°C가 될 때까지 60분간 연속적으로 진행되었다.

압축 성형 공정이 끝난 후, 복합재 이탈피의 정확한 치수 확보를 위해 그루브와 이탈피 내경 및 외경에 대한 기계 가공을 실시하였다. 최종 기계 가공된 복합재 이탈피는 기존의 알루미늄 이탈피에 비해 약 30% 가량 경량화 되었다. 그림 5는 제작된 복합재 이탈피의 형상을 보여주고 있다.

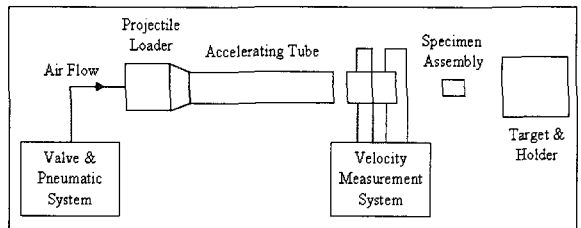


[그림 5] 복합재 이탈피 형상

4. 시험

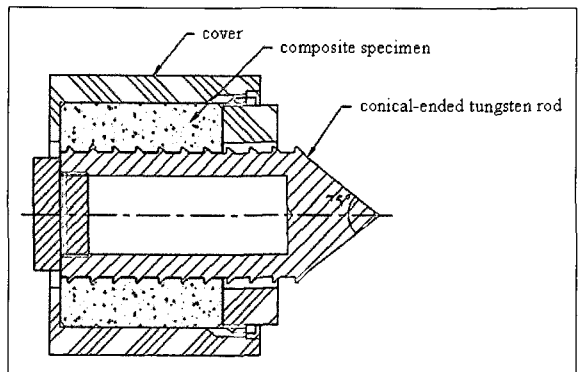
가. 역탄도 시험

역탄도 시험(Inverse ballistics test)은 복합재 이탈피의 그루브 생존성을 평가하기 위해 도입되었다. 복합재 이탈피의 구조 안전성은 이 역탄도 시험을 통해 모사해 낼 수 있다. 역탄도 시험에 사용된 장치는 그림 6과 같다.



[그림 6] 역탄도 시험 장치 구성도

복합재 이탈피의 역할을 위해 축소된 시편과 관통자에 해당하는 텅스텐 봉이 그림 7과 같이 지그내에서 체결 되었다. 텅스텐 봉은 끝단이 원추형(conical-ended)으로 가공되었고, 팁의 각도는 75°였다^[3]. 복합재 시편은 실린더 타입으로 설계되었으며, 내경은 텅스텐 봉과의 체결을 위해 그루브 형태로 가공 되었다. 복합재 시편의 외경은 50mm이고, 높이는 30mm이다.



[그림 7] 시편 결합체 형상

역탄도 시험을 위해 시편 결합체를 공압 장치(pneumatic system)에 장착한 후, 압력 조절 장치

(pressure regulator)를 연다. 시편 결합체가 고압에 의해 발사되면 가속 튜브(accelerating tube)를 통과하여 알루미늄 6061 합금으로 만들어진 표적과 충돌하게 된다. 표적은 압입 지름(indentation diameter)을 측정할 수 있도록 연마된 상태로 사용하였다^[4].

역탄도 시험에서 충돌 속도는 시편 결합체가 표적의 표면을 타격하는 순간의 속도로 정의 하였다. 압입 지름은 표적 표면이 시편 결합체의 텅스텐 팁과 충돌하여 생긴 압입부의 지름을 측정함으로써 결정되는데, 이는 시편 결합체의 관성력(inertial force)에 의해 생성된다. 압입 지름의 크기와 시편 결합체의 감가속도로부터 시편의 그루브에 가해지는 압력을 계산해 낼 수 있다^[4,5].

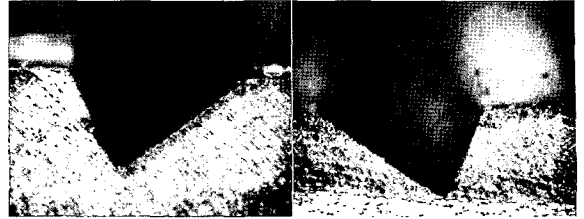
역탄도 시험을 통해 얻어진 결과를 표 3에 정리하였다.

[표 3] 역탄도 시험 결과

소재	섬유배향	시편 번호	충돌속도 (m/s)	압입지름 (mm)
탄소섬유/ 에폭시 복합재료	Type I	1	80	23.5
		2	105	24
		3	125	24
	Type II	1	89	21.4
		2	109	24
		3	125	24

“Type I”과 “Type II” 설계안을 채택한 시편 모두 충돌 속도 최고 125m/s에서 생존하였고, 그루브 형상도 파손되지 않고 원 상태를 유지하였다. 이는 “Type I”과 “Type II” 설계안 모두, UD prepreg가 일정한 각도를 이루며 적층되어 있어, 섬유배향 각도에 따라 그루브에 작용하는 전단 하중 및 구조체에 작용하는 압축 하중을 충분히 견뎌내기 때문으로 해석된다. 그림 8은 역탄도 시험 후 시편 단면을 광학 현미경으로 관찰한 사진이다.

시험 결과로부터, 복합재 이탈피 그루브는 실제 사용 환경인 강내압 90,000psi 정도에서 안전성이 확보될 것으로 예측된다.



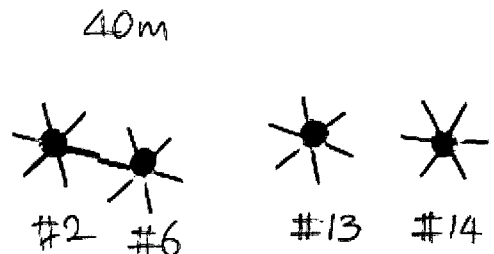
[그림 8] 역탄도 시험 후 그루브 단면 모습

나. 구조 안전도 시험

복합재 이탈피의 실제 사용 환경에서의 적용성과 안전성, 그리고 탄 성능 향상 여부를 평가하기 위하여 복합재 이탈피를 현재 운용중인 120mm 운동 에너지탄에 조립하여 구조 안전도 시험을 수행하였다. 시험에는 지상에 고정된 120mm 대구경 전차포신이 사용되었다. 시험용 탄은 상온에서 보관 및 처리되었다.

복합재 이탈피를 적용함으로써 변화되는 탄의 포구 속도와 이탈피의 생존성 및 안정성 등을 관찰하기 위하여 포신의 측면에 포구 속도 레이다 시스템(MVRS : Muzzle Velocity Radar System)과 스메어 카메라(smear camera), 정지 화면 기록 장치(SVR : Still Video Recorder), 고속 카메라(high speed camera), 요 카드(yaw card) 등이 사용되었다.

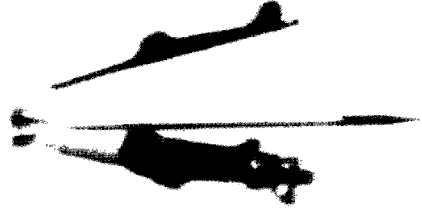
그림 9는 포신 40m 전방에 설치된 요 카드 관통 사진이며, 여섯 갈래의 날개를 가지는 관통자 후미의 단면 부분이 정확하게 표현된 것으로 보아 탄의 비행 상태가 양호한 것으로 판단된다.



[그림 9] 요 카드 사진

그림 10과 11은 복합재 이탈피의 분리 장면을 순간 포착하기 위하여 사용된 smear camera와 SVR 장비이다. 복합재 이탈피는 정상적으로 발사되었으며, 그림 12와 13의 smear camera 및 SVR 이미지에서 확인 되는 바와 같이 이탈피의 이상 분리 현상과 적층 계면 분리에 따른 조각 분리 및 파손 등의 현상은 전혀 관찰되지 않았다.

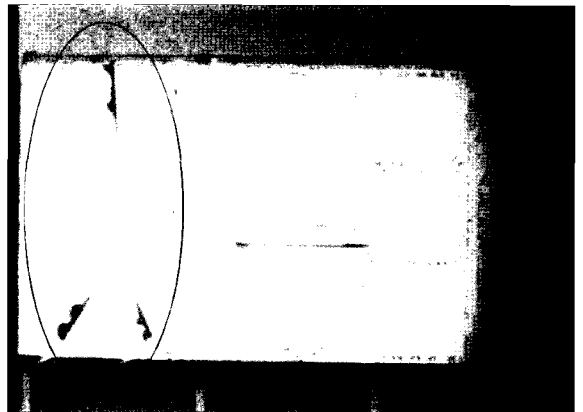
복합재 이탈피를 적용한 운동 에너지탄의 포구 속도는 알루미늄 합금 이탈피를 사용하는 기존의 운동 에너지탄에 비하여 약 63m/s 정도 증가하였다. 이는 같은 량의 추진제를 사용하고 동일한 조건에서 비행 시험을 실시하였을 때, 포구 에너지가 동일하다고 가정하면 이탈피의 무게가 감량됨에 따라 상대적으로



[그림 12] Smear camera로 촬영한 탄의 비행 및 복합재 이탈피 정상 분리 장면



[그림 10] Smear camera

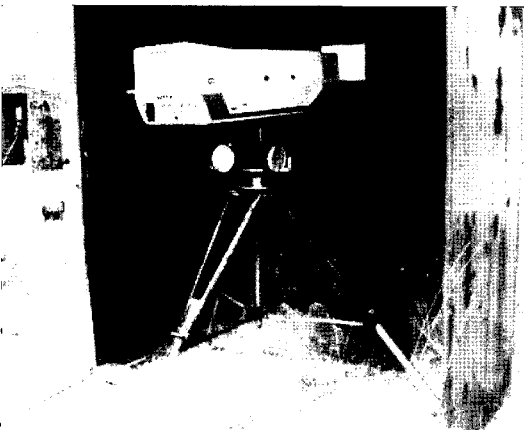


[그림 13] SVR로 촬영한 복합재 이탈피 분리 거동

포구 속도가 증가하리라는 예측이 입증된 것으로, 궁극적으로는 탄의 관통 성능 증대에 큰 효과를 가져다 줄 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구는 운동 에너지탄의 성능 증대를 위한 노력의 일환으로, 핵심 부품인 이탈피를 경량화 함에 따라 탄의 포구 속도를 증가시켜 궁극적으로 관통 성능을 향상시키기 위한 목적으로 수행되었다. 이탈피의 경량화를 위해 밀도가 낮고 비강도 및 비강성이 뛰어난 탄소섬유강화 에폭시 수지 복합재료를 채택하였



[그림 11] Still Video Recorder, SVR

다. 이탈피와 관통자가 체결되는 그루브의 강도와 복합 응력이 작용하는 강내 환경을 고려한 축방향 물성을 부여하기 위해 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 다양한 각도로 적층하여 두 가지의 준 등방성(quasi-isotropic) 섬유 배향 설계안을 도출하였다. 관통자 축방향에 대해 반경 방향으로 프리프레그를 적층하여 서브 세그먼트 단위를 만든 다음, 다시 서브 세그먼트를 반경 방향, 부채꼴 모양으로 적층하여 원주각 10°의 세그먼트 단위를 만들었다. 최종적으로 10°의 세그먼트를 12개를 적층하여 한 조각의 120° 이탈피 프리폼을 제작하였다. 복합재 이탈피는 프리폼을 압축 성형에 의해 경화한 후 기계 가공을 통하여 완성되었으며, 기존의 알루미늄 합금 이탈피에 비해 약 30% 경량화 시켰다.

복합재 이탈피의 취약 부위인 그루브의 생존성을 평가하기 위하여 실험실 내에서의 역탄도 시험을 실시하였으며, 그 결과 두 가지 설계안 “Type I”, “Type II” 모두 강내압 90,000psi 정도의 환경에서 파손되지 않고 형상을 유지할 수 있으리라 예측된다. 최종적으로 실제적인 복합재 이탈피의 구조 안전성을 관찰하기 위하여 현재 운용중인 120mm 운동에너지탄에 조립하여 시험 평가를 수행하였다. 그 결과 복합재 이탈피가 파손 없이 정상 분리되었으며, 탄의 비행 자세도 양호함을 확인할 수 있었다. 또한, 기존의 알루미늄 이탈피가 적용된 운동에너지탄에 비해

포구 속도 63m/s의 증대 효과를 확인하였으며, 이는 궁극적으로 탄의 관통 성능 증대에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] B. P. Burns, W. H. Drysdale, C. P. R. Hoppel, and T. A. Bogetti, Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics, pp.347 ~ 353, 2001.
- [2] B. S. Hwang, S. B. Park, J. K. Kim, J. B. Kim, I. S. Park, and H. S. Song, “Failure strength of machined composite edges”, 47th Int'l. SAMPE Symposium, 2002.
- [3] W. Johnson, “Impact Strength of Materials”, Edward Arnold Publishers Limited, London, p.304, 1972.
- [4] K. J. Park, K. H. Kang, and D. H. Ha, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, pp.371 ~ 378, 1999.
- [5] 최재호, 박인서, 송홍섭, 박관진, “역탄도 기법을 이용한 탄소섬유/열경화성 수지 복합재 그루브의 파단 특성 연구”, Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 17, No. 2, 2004.