

論文

역탄도 기법을 이용한 탄소섬유/열경화성수지 복합재 그루브의 파단 특성 연구

최재호*, 박인서*, 송흥섭*, 박관진*

Study on Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Composite Groove Using Inverse Ballistics Technology

Jaeho Choi*, In-Seo Park*, Heung-Sub Song*, and Kwan Jin Park*

ABSTRACT

It is a primary object of the present study to test and evaluate the shear load carrying capability of a carbon fiber reinforced thermosets composite structure with buttress grooves for military applications. The buttress form of groove is an effective structure in any applications where high shear loads are transferred in one direction between structural components. Inverse ballistics methodology was introduced to investigate the high strain rate properties of composite groove specimens. In comparison with the conventional methods, inverse ballistics technique is a proper one under dynamic environment.

초 록

나사산을 가지는 구조재료는 높은 전단 응력을 한 방향으로 전달해 주는 용도로 많이 사용되며, 이를 응용하여 고속의 충격에너지나 전단하중에 견딜 수 있는 기어 모양의 부품 등 항공 및 군수용 재료에 적용되어왔다. 최근에는 재료를 보다 경량화 하려는 노력의 일환으로 기존의 금속재료를 섬유강화 고분자 수지계 복합재료로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 탄소섬유/열경화성 수지계 복합재를 사용하여 나사산(groove)을 가지는 시편을 제작한 뒤 역탄도 기법으로 고속변형 특성 평가를 실시하였고, 이를 통하여 군수용 부품 재료로의 적용 가능성을 타진해 보았다.

Key Words : 역탄도기법(inverse ballistics technique), 복합재 그루브(composite groove), 고속변형(high strain rate), 이탈피(sabot)

1. 서론

섬유강화 고분자 복합재료는 설계와 공정에 관한 기술이 발달함에 따라 적용분야가 매우 넓어져 기어(gear), 나사산(buttress or screw thread), 나사골(root) 혹은 직선상의 그루브(groove) 등 집중 응력에 견뎌야 하는 구조물의 재료로도 사용되고 있다. 이러한 복합재 구조물은 groove를 통해 고속의 충격에너지나 전단 하중 등을 그와 체결된 구조

체에 전달하게 되는데, 이를 위해서는 복합재의 구조 및 groove 안전도의 확보는 필수적이다. 특히 groove는 전단, 인장, 압축 응력 및 노치 효과가 중첩되어 복잡한 응력장이 발생하는 중요한 설계요소로서 구조 안전도 평가는 반드시 수행되어야 한다.

이러한 복합재 구조물의 응용은 특히 군수분야에서 날개안정철갑탄(Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot with Tracer, APFSDS-T)의 이탈피(sabot) 경량화를 통한 탄

*+ 국방과학연구소, 교신저자(E-mail:julius@add.re.kr)

* 국방과학연구소 기술연구본부

성능 증대 연구와 맞물려 이탈피를 기존의 알루미늄 재료에서 탄소섬유강화 고분자 수지계 복합재료로 대체하고자 하는 노력의 일환으로 진행되고 있다. 이탈피는 관통자를 발사하기 위하여 사용되는 부품으로 탄의 운반체(projectile carrier) 용도와 추진에너지 전달(energy transfer) 이외에 탄을 포강 내에서 지지하는 역할(structural support) 및 압력 밀폐(gas seal) 역할을 수행한다.

날개안정철갑탄 발사 시 포강 내에서는 약 60,000psi 이상의 압력과 200ton 이상의 하중이 작용하게 된다. 이와 같이 포강 내에서 발생한 추진에너지는 이탈피의 groove를 통하여 관통자에 전달된다. 따라서, 이탈피를 통하여 관통자에 추진력이 정확하게 전달되기 위해서는 에너지 전이점인 groove 부분은 작용 하중에 파손되지 않는 충분한 전단 강도를 지녀야 한다.

Groove는 높은 추진압력과 고속의 충격에너지, 그리고 관성 가속도 등의 복합 하중이 작용하므로 기존의 충격나하시험 등과 같은 정적 하중에 의한 구조시험은 실제 적용 환경과 달라지며, 구조 안전도와 직결되는 고속에서의 동적 변형 특성을 평가하기에는 부적절하다.

그리고 일반적인 공압장치(air gun)와 같은 가속장치를 이용한 고속변형 시험은 실제 발사 환경과 비교하여 압력과 가속도 등이 상대적으로 저하된다. 그러나 역탄도(inverse ballistics) 개념을 도입하면 시험 시의 감속단계를 실제의 가속단계와 유사하게 모사할 수 있으며, 이 때 groove의 동적 고속변형 특성을 분석하면 발사환경과 최대한 유사한 상태에서의 이탈피의 구조 안전성을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 carbon/epoxy UD prepreg를 사용한 2가지 종류의 복합재 시편과 기존의 carbon/epoxy BMC 시편에 대한 역탄도 시험 결과를 분석하여 재료별 groove의 생존성 및 구조 안전성을 예측하고자 한다.

2. 충돌 이론 해석

Fig. 1과 같이 각도 α 의 원추머리 탄자(conical ended impactor)가 V 의 속도로 평판에 충돌할 때, 탄자가 강체(rigid body)이고 충돌과정 중의 시편의 압입저항압력(mean pressure of resistance)가 일정하다고 가정하면, 뉴턴 제 2법칙을 적용한 충돌과정의 지배방정식은 다음과 같다[1,2].

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -\bar{Y} \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

여기서 M 은 탄자의 질량, d (Fig. 1)는 충돌과정 중의 표면 압입지름이다.

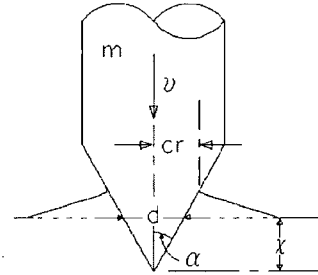


Fig. 1 The notation of conical ended impactor indentation.

표면 압입지름과 원추각의 관계는

$$\frac{d}{2} = x \tan \alpha$$

이므로, 이를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Mx(t) + \pi(\tan^2 \alpha x(t)^2) = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서 감속도(이하 가속도라 함) $x(t)$ 는 표면 지름이 최대가 되는 점에서 최대값을 나타내며, 이 때 최대 감속도(이하 최대 가속도라 함)는

$$a_{\max} = -\frac{\bar{Y} \pi D^2}{M} \frac{1}{4} \quad (3)$$

가 된다. 여기서 D 는 충돌 종료 후 표적에 발생된 표면 압입지름이다.

Tabor[3]는 Vickers 경도시험을 동적 압입 시험으로 확장하여 압입속도 100m/s 이하인 속도 범위에서는 준정적(quasi-static)과정을 고려하여 압입저항압력을 결정하였다.

식 (1)에서 $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$ 의 관계를 고려하여 x 에 관한 정적분을 수행하고 정리하면,

$$\bar{Y} = \frac{12}{\pi} \tan \alpha \frac{1}{D^3} M V^2 \quad (4)$$

식 (4)를 (3)에 대입하면

$$a_{\max} = \frac{3 \tan \alpha}{D} V^2$$

로 간단히 정리된다. 즉 최대 가속도는 원추형상, 충돌속도

및 표면 압입지름의 함수가 되며, 이 때 표적의 물성은 압입지름과 충돌속도의 관계로 포함 된다. 즉, 실제 시험 시 충돌속도(V)의 변화와 그로 부터 발생하는 압입지름(D) 인자를 통해 가속도도 계산해 낼 수 있다.

3. 실험

3.1 재료

본 연구에서 사용된 재료는 인장강도 700ksi 급의 탄소 섬유가 Bisphenol A형 에폭시 레진에 함침된 형태의 carbon fiber/epoxy unidirectional prepreg(USN175BX, SK Chemicals, Co., Ltd.) 이며, 이 소재의 물성은 아래의 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of the raw material, USN175BX

Thickness (mm)	0.168
Resin Content (wt.%)	33
Fiber Density (g/cm ³)	1.77
Resin Density (g/cm ³)	1.2
Longitudinal Young's Modulus (GPa)	138.2
Transverse Young's Modulus (GPa)	11.8
In-plane Shear Modulus (GPa)	103.2
Poisson's Ratio	0.31
Longitudinal Tensile Strength (MPa)	1973.0
Longitudinal Compressive Strength (MPa)	836.4
Transverse Tensile Strength (MPa)	29.5
Transverse Compressive Strength (MPa)	12.4
In-plane Shear Strength (MPa)	101.6

3.2 섬유 배향 설계

시험에 사용할 재료의 섬유 배향 설계를 위하여 배향 각도에 따른 single fiber groove의 전단 강도를 비교 측정하였다. Single edge를 가지는 시편을 Fig. 2와 같은 형상으로 제작하여 edge에 걸리는 단순 전단 하중 값과 파괴현상을 각 섬유 배향 별로 비교하였다. 사용한 섬유의 배열 방향은 [0], [90], [+45], [-45]의 네 가지 종류이며, 각각에 대한 강도 값은 Table 2와 같다.

테스트 결과, [0] 배열 시편의 groove전단 강도 값이 가장 낮게 나타났는데, 이는 작용하는 하중이 섬유의 평행한 방향(축방향)으로 압축하중을 가하는 형태가 되기 때문에 강도가 약한 기지재료가 전단에 의해 파괴되는 것으로부터 기인한다.

[90] 시편의 경우, 섬유가 횡 방향으로의 전단하중과 굽힘 하중을 동시에 받는 형태이기 때문에 전단에 의해 섬유가 파괴되기 이전에 굽힘에 의한 변형량이 상대적으로 커서 하중을 받지 않는 잉여 groove 전단에서 섬유가 평행한 방향으로 Mode I의 파단이 발생하였다.

결론적으로 [+45] 배향의 시편 강도 값이 가장 높았으며, 이는 섬유 배향 각도가 가해지는 전단하중에 가장 유리한 방향으로 작용된 것으로 판단된다.

3.3 시편 제작

시험에 사용된 시편은 Fig. 3과 같이 여러 층의 T700 급의 carbon/epoxy prepreg를 radial 방향으로 적층한 후, 압축 성형으로 제작되었다.

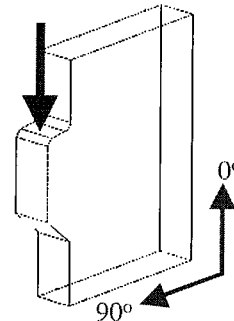


Fig. 2 Schematic structure of the single fiber specimen.

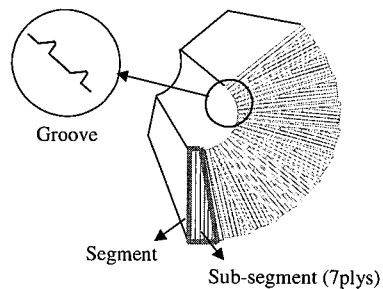


Fig. 3 Schematic structure of the specimen.

Table 2 Shear strength of the single fiber specimens

Fiber Angle	Stacking Sequence	Shear Strength (Mpa)
+45	[+45] ₃₂	66.9
-45	[-45] ₃₂	47.3
90	[90] ₃₂	46.3
0	[0] ₃₂	37.3

먼저 carbon/epoxy prepreg를 각도별, 크기별로 재단한 다음, 7개의 ply를 적층하여 하나의 sub-segment를 만든다. 이때, 복합재의 이방성을 감안하여 섬유 배열을 $[0/+45/90/-45]$ 가 포함되는 quasi-isotropic lay up으로 전제하였으며, 시편이 표적과 충돌 시 받게 되는 전단하중을 고려하여 앞서 3.2절에서 수행한 single fiber 전단 강도 시험 결과[4,5]를 토대로 가장 효과적인 배향각도인 $+45^\circ$ 가 다수 포함된 $[+45/0/-45/90/-45/0/+45]$ 의 배향 설계안(이하 Q1)과 시험편 구조체의 압축응력 향상을 고려하여 축방향 섬유 배향이 상대적으로 많이 존재하는 $[0/+45/0/90/0/-45/0]$ 의 배향 설계안(이하 Q2)을 적용하였다.

7개의 ply를 적층하여 만들어진 sub-segment를 다시 여러 개 적층하여 segment를 만들고, 적층된 segment들을 preform 금형에 넣어 $30\sim40^\circ\text{C}$ 로 가열한다. 제조된 preform을 탈형하여 압축성형 금형에 넣고 150°C 의 온도에서 최종적으로 경화시킨다.

3.4 역탄도 시험

제작된 역탄도 시편을 Fig. 4와 같이 첨단각이 75° 인 텅스텐 중합금 충격자와 체결하여 치구에 고정한 후, 공압 장치의 발사부에 넣고 질소 밸브와 압력 밸브를 열어 압력을 가한다. 발사된 시편은 가속관을 통해 최종 표적에 충돌하는데, 표적재료는 Al 6061을 지름 100mm, 길이 50mm로 가공하여 사용하였으며, 표면을 연마하여 시험 후 표면 압입 지름을 측정할 수 있도록 하였다.

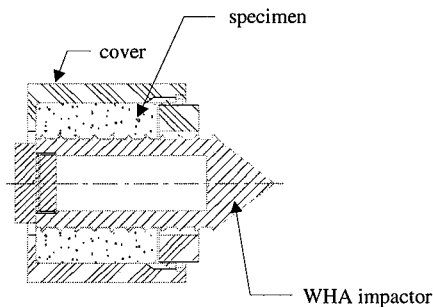


Fig. 4 A cross-sectional view of specimen and zig.

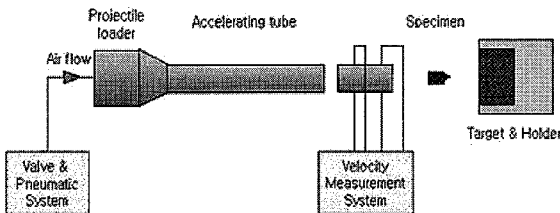


Fig. 5 A schematic view of testing equipments.

공압 장치는 Fig. 5에서처럼 질소가스를 저장하는 압력 탱크, 충격자에 추진에너지를 가하는 발사 장치부, 충돌속도를 증대 시키는 가속관, 이들을 지지해 주는 발사대 및 충격자를 잡아주는 표적 장치부로 구성되어 있으며, 그 외 충돌속도를 측정하는 속도 측정장치와 고압 질소 가스 및 속도 조절용 압력 밸브 등이 있다.

4. 결과 및 고찰

700ksi의 인장강도를 가지는 탄소섬유를 기본으로 두 가지 다른 배향 설계안을 적용한 에폭시 수지 복합재의 압축 성형 시편 2종에 대해 역탄도 시험을 실시하고, 고속변형 특성을 분석하였다. groove 파손 여부는 충돌 시 groove가 1pitch이상 움직인 것을 기준으로 판단하였다. 시험 결과는 Table 3와 같다.

Table 3 The results of inverse ballistics test

소재	배향	시편	충돌속도 (mps)	압입지름 (mm)	가속도 (g's)	*압력 (psi)
C/E UD	Q1	1	80	23.5	44,800	65,000
		2	105	24	76,000	89,000
		3	125	24	-	-
	Q2	1	89	21.4	60,900	71,000
		2	109	24	81,000	96,000
		3	125	24	-	-

*압력 : groove가 견딜 수 있는 예상 포강 압력

Table 3에서 충돌속도는 텅스텐 중합금 충격자와 체결된 복합재 시편 구조체가 표면에 충돌할 시점의 속도이고, 압입 지름은 충돌 후 표적이 관통되지 않은 상태에서 탄의 관성가속도에 의해 생기는 표면 관통부의 측정값이며, 가속도는 앞서 2장 충돌이론 해석에서 설명한 가속도 식을 적용하여 도출된 값이다. 그리고 groove 생존 예상 약실압력은 역탄도 시험으로부터 실제 탄의 적용 환경에 적용하였을 때 포강 내에서 견딜 수 있는 약실 압력을 탄두결합체의 단면적과 질량, 그리고 groove가 견딜 수 있는 하중 등을 고려하여 이론적으로 예측한 값이다.

표에서 알 수 있듯, Q1과 Q2 배향 설계안 모두 다양한 속도에서 안정적인 결과를 나타내었다. Q1 배향 설계안을 적용한 복합재 시편의 경우 80m/s와 105m/s의 속도로 표적에 충돌했을 때 모두 groove 및 구조체의 형상을 그대로 보존하였으며, 이를 실제 사용환경에 적용해 보면 89,000psi의 압력을 견뎌 낼 것으로 예상된다.

그리고, 125m/s의 속도에서는 전체적인 형상은 양호하게 유지하였으나 groove 부분에서 carbon powder가 다량 발생

하였다. Q2의 배향 설계안을 적용한 복합재 시편의 경우 89, 109m/s의 충돌속도에서 원래의 형상을 유지하였고, 125m/s에서도 형상유지 및 안정성을 확인하였으나 역시 carbon 파편이 소량 발생하였다. Q1, Q2 시편들은 이방성이 큰 복합재의 단점을 극복하기 위하여 각각 [+45/0/-45/90/-45/0/+45], [0/+45/0/90/0/-45/0]의 준등방성(quasiisotropic lay up) 배열을 하고 있으며 0°(축방향)의 배향으로 인한 구조 안전성 보강과 +45°배향에 의해 groove 전단강도 향상효과를 가진다. 이들 시편은 실제 적용 가능성을 가늠하는 충돌 속도로 예측되는 100m/s의 조건을 모두 만족하고 있다.

Fig. 6은 Q1 시험편의 시험 후 groove상태를 광학 현미경으로 관찰한 것이다. 각 사진의 아래 부분이 groove의 단면이며, Fig. 6의 (a), (b)와 같이 80m/s와 105m/s의 시험속도에서는 groove 경사면이 원래의 형상을 유지한 반면, Fig. 6의 (c)에서처럼 125m/s의 속도에서는 전단하중을 받는 groove의 45° 경사면에서 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. Q2 시험편의 광학 현미경 관찰 결과도 Q1과 같다.

참고로 앞선 연구[6,7]에서 BMC재료를 사용한 시편의 시험 결과(Table 4)와 비교해 볼 때 Q1, Q2의 배향 설계안을 적용하여 반경방향으로 적층한 carbon/epoxy UD prepreg 시편의 동적 물성치가 훨씬 높게 나타났다. BMC 재료의 경우 61.6m/sec이하의 속도에서는 groove가 파손되지 않았으나, 그 이상의 시험 조건에서는 Fig. 7에서와 같이 groove 부위에 전단 파괴가 발생하였다. Groove가 파단이 일어나는 임계속도인 61.6m/s는 실제 날개안정철갑탄의 이탈피에 적용 시 55,000psi 정도의 강내 압력에 해당할 것으로 예측되므로 상용압력(80,000~100,000psi)하에서는 적용이 어려울 것으로 판단된다.

이는 BMC의 특성상 carbon chop이 불규칙하게 산재하고 있어 응력 분포가 불균일 하며 groove 부위도 마찬가지로 전단 응력에 대한 수직 방향으로 섬유가 존재하지 못하는 반면, Q1, Q2의 경우 UD prepreg가 일정한 각도를 이루며 적층되어 있어 섬유배향 각도에 따라 전단하중 및 구조체에 작용하는 압축하중을 충분히 견뎌내기 때문으로 해석된다.

Table 4 The results of the previous study using BMC

소 재	시험 속도(m/s)	시험상태	Groove 생존 예상 약실 압력
C/E BMC	40.6	이상 없음	Groove의 파손 임계 속도 : 61.6 m/s (55,000psi의 추진압력에 해당)
	50.6	이상 없음	
	57	이상 없음	
	61.6	이상 없음	
	65	파손	
	67	파손	

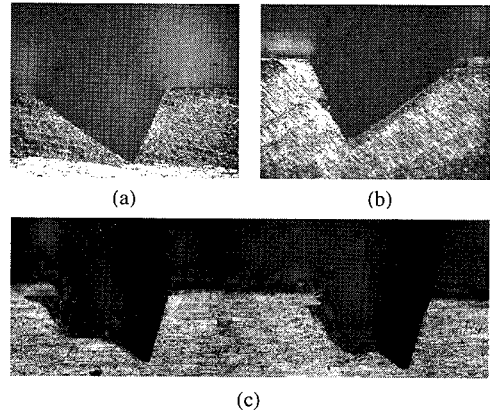


Fig. 6 Optical microscopic image of Q1 specimen : (a) Impact velocity 80mps, (b) Impact velocity 105mps, (c) Impact velocity 125mps.



Fig. 7 Fractography of BMC specimen.

5. 결 론

실제 발사 시험 환경을 모사할 수 있는 역탄도 기법을 도입하여 나사산을 가지는 carbon/epoxy 복합재 시편의 고속 변형특성을 분석하였다.

전체 2가지 재료에 대한 고속 충돌 시험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 채택된 2종의 복합재 시편 은 모두 우수한 결과치를 보였다. 앞서 수행된 시험인 BMC 시편의 경우 일정한 방향성을 가지지 않는 재료 특성으로 인해 섬유배향 방향으로의 강도 보강 효과를 기대하기 힘들고 따라서 고속에서의 내 충격성이 크지 않았다.
2. Radial 성형된 T700급 carbon/epoxy 시편의 경우 100m/s 이상의 충돌조건에서도 groove와 구조가 모두 안정한 결과를 나타내었으며, 이는 섬유 배향의 효과에 기인한 것으로 예측된다.
3. 금속재료를 대체하기 위해 요구되는 물성 중, 동적 전단 강도 수치는 본 연구를 통해 확보되었다.
4. Carbon/epoxy 복합재료는 특정 영역에서 금속 재료와 유사하거나 그 이상의 강도값을 가지며, 이는 본 연구의 고속변형특성에서도 간접적으로 확인할 수 있었다.

따라서, 추후 배향 설계에 따른 소재 물성의 비교 분석과 함께 full scale에 적용되었을 경우 실제 발사 환경에서의 거동 등이 추가로 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) W. Johnson, *Impact strength of materials*, 1st ed., Edward Arnold, London, 1972, pp. 304-306.
- 2) 박관진, 강근희, “역탄도 기법을 이용한 복합재 이탈피그루브의 안전도 평가,” 지상무기체계발전세미나, 1999.
- 3) D. Tabor, *The Hardness of Metals*, Oxford Univ. Press., 1951.
- 4) 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.
- 5) J.H. Choi, I.S. Park, H.S. Song, S.H. Lee, and B.S. Hwang, “Effects of the orientations of carbon/epoxy prepregs on the composite groove,” *Korea Institute of Military Science and Technology*, 2002.
- 6) ADD Report, KTRC-411-000022, 2000.
- 7) ADD Report, TEDC-419-000563, 2000.