

Carbon/Epoxy 복합재의 고속변형 특성 연구

최재호^{**}, 박인서^{*}, 이성호^{*}, 송흥섭^{*}

Study on the High Rate Shear Deformation of a Carbon/Epoxy Composite

Jaeho Choi^{**}, In-Seo Park^{*}, Sung Ho Lee^{*}, and Heung-Sub Song^{*}

Key Words : Inverse ballistics test, composite groove

ABSTRACT

Carbon/Epoxy composite specimens formed with buttress grooves are fabricated. The buttress form of groove is useful in any application where high shear loads are transferred in one direction between structural components. It is a primary object of the present study to test and evaluate the shear load carrying capability of a carbon/epoxy composite structure with buttress grooves for military applications

1. 서 론

섬유강화 고분자 복합재료는 설계와 공정에 관한 기술이 발달하면서 군수분야에서 날개안정철갑탄의 이탈피와 같은 높은 전단 하중을 지탱하거나 전달하는 구조물에도 사용되고 있다. 이러한 복합재 구조물은 나사산 (screw or buttress groove)을 통해 고속의 충격 에너지나 전단 하중 등을 그와 체결된 구조체에 전달하게 되는데, 이를 위해 복합재의 구조 및 groove 안전도의 확보는 필수적이다. 특히 groove는 전단, 인장, 압축응력 및 노치 효과가 중첩되어 복잡한 응력장이 발생하는 중요한 설계요소로서 구조 안전도 평가는 반드시 수행되어야 한다.

날개안정철갑탄의 이탈피용으로 적용되는 복합재 groove의 경우 높은 추진압력과 고속의 충격 에너지, 그리고 관성 가속도 등의 하중이 작용하므로 충격낙하시험 등과 같은 정적 하중에 의한 구조시험은 실제 적용 환경과 달라지며, 구조 안

전도와 직결되는 고속에서의 동적 변형 특성을 평가하기에는 부적절하다.

공압장치(air-gun)와 같은 가속장치를 이용한 고속변형 시험은 실제 발사 환경과 비교하여 압력과 가속도 등이 상대적으로 저하된다. 그러나 역탄도 방식 (inverse ballistics)을 적용하면 감속단계를 실제의 가속단계와 유사하게 모사할 수 있으며, 이때 groove의 동적 고속변형 특성을 분석하면 발사 환경에서의 구조 거동을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 4 종류의 복합재 시편을 제작하였으며 이 시편편을 통하여 역탄도 시험을 수행하고 그 결과를 분석하여 재료별 groove의 생존성 및 구조 안전성을 예측하고자 하였다.

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) \bar{Y} 가 일정하다고 가정하면, 뉴턴 제 2법칙을 적용한 충돌과정의 지배방정식은 다음과 같다.^{1,2}

^{**+} 국방과학연구소, 교신저자 (E-mail : jullius@add.re.kr)

^{*} 국방과학연구소

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

여기서 M 은 탄자의 질량, d 는 충돌과정 중의 표면 압입지름이다

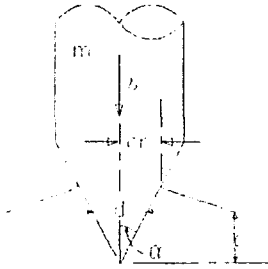


Fig 1. The notation of conical ended impactor indentation

표면 압입지름과 원추각의 관계는

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

이므로, 이를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

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

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

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

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

Tabor³ 는 Vickers 경도시험을 동적 압입시험으로 확장하여 압입속도 100m/s 이하인 속도 범위에서는 준정적(quasi-static)과정을 고려하여 압입저항 압력 \bar{Y} 를 결정하였다.

식 (1)에서 $\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$ 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 포함된다.

3. 실험

3.1 시편구조 및 제작

시험에 사용된 시편은 Fig 2 와 같이 여러 층의 T300, T700 급의 carbon/ epoxy prepreg 를 radial 방향으로 적층한 후, 압축성형으로 제작되었다. 제작 순서는 다음과 같다.

- 1) Prepreg 를 각도별, 크기별로 재단한다.
- 2) 7 개의 ply 를 적층하여 하나의 sub-segment 를 만든다.
- 3) sub-segment 를 적층하여 segment 를 만든다.
- 4) 적층된 segment 들을 preform 금형에 넣고 30~40°C 로 가열한다.
- 5) 제조된 preform 을 탈형하여 압축성형 금형에 넣고 경화시킨다.

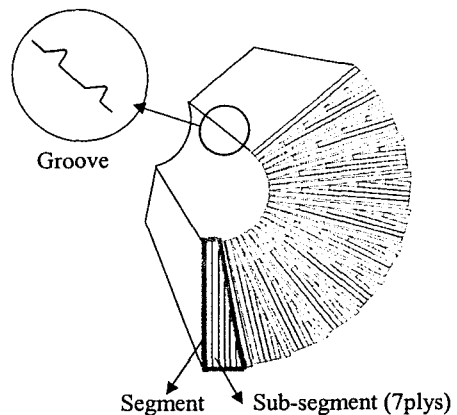


Fig 2. Schematic structure of the specimen

3.2 역탄도 시험

Table 1 은 본 시험에 적용된 carbon/epoxy 복합재의 기본 물성치로서 ASTM 규격을 따르는 표준 시편에 의한 값이다. 역탄도 시험은 Fig 3 과 같이 텅스텐 중합금 충격자와 체결되어 치구에 고정된다.

표적재료는 Al 6061 을 지름 100mm, 길이 50mm 로 가공하여 사용하였으며, 표면을 연마하여 시험 후 표면 압입지름을 측정할 수 있도록 하였다.

공압장치는 질소가스를 저장하는 압력탱크, 충격자에 추진에너지를 가하는 발사장치부, 충돌속도를 증대시키는 가속관, 이들을 지지해 주는 발사대 및 충격자를 잡아주는 표적장치부로 구성되어 있으며, 그 외 충돌속도를 측정하는 속도 측정장치와 고압 질소 가스 및 속도조절용 압력밸브등이 있다.

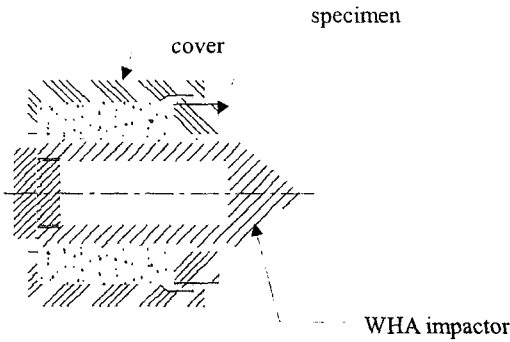


Fig 3. The schematic view of the impactor assembly

Table 1. Physical properties of the specimens

소재	배향	인장		압축		전단	
		S (MPa)	E (GPa)	S	E	S	E
T300 C/E (T3Q)	Q ^a	389.7	43.30	48.98	38.31	210.8	-
T700 C/E (T7Q)	Q	458.6	40.13	38.27	38.28	205.1	-
TEM 9015 (TEM)	BMC	254.0	47.76	256.7	53.83	209.8	16.51
C/PEI (PQ)	Q	N/A	N/A	N/A	N/A	216.7	-

a. Q : [+45/90/-45/0/-45/90/+45]

4. 결과 및 고찰

인장강도가 다른 두 탄소섬유(700kpsi, 300kpsi)를 기본으로 한 에폭시 수지 복합재의 압축성형 시편 2 종과 BMC 시편, 그리고 열가소성 기지를 사용한 carbon/PEI 복합재 등 총 4 종류의 시편에 대해 역탄도 시험을 실시하고, 고속변형 특성을 분석하였다. groove 파손 여부는 충돌 시 groove 가 1pitch 이상 움직인 것을 기준으로 판단하였다. 시

험 결과는 Table 2 와 같다.

BMC 로 제작된 TEM 시편의 동적 물성치가 Radial 적층으로 제작된 T3Q, T7Q, PQ 시편의 경우에 비해 취약하게 나타났다. 이는 BMC 의 특성상 섬유가 불규칙하게 산재하고 있어 응력 분포가 불균일 하며 groove 부위도 마찬가지로 전단 응력에 대한 수직 방향으로 섬유가 존재하지 못하기 때문으로 해석된다.

Table 2. The results of inverse ballistics test

시 편	시험 속도 (mps)	시편상태	비 고
T3Q	95	이상 없음	Groove 조건 허용
	96	이상 없음	
	106	이상 없음	
	130	Groove 1,2 개 파손	
	161	Groove 1,2 개 파손	
T7Q	95	이상 없음	Groove 조건 허용
	96	이상 없음	
	104	이상 없음	
	163	Groove 1,2 개 파손	
TEM	40.6	이상 없음	Groove 의 미 파손 최고 속도는 61.6 mps. (55,000psi 의 추진압력에 해당)
	50.6	이상 없음	
	57	이상 없음	
	61.6	이상 없음	
	65	파손	
	67	파손	
PQ	96	이상 없음	Groove 조건 허용
	101	이상 없음	

Table 2 에 나타내었듯이 61.6mps 이하의 속도에서는 groove 가 파손되지 않았으나, 그 이상의 시험 조건에서는 Fig 4 에서와 같이 groove 부위에 전단 파괴가 발생하였다. Groove 의 형상이 유지되는 최고 시험속도인 61.6 mps 는 실제 날개안정철갑탄의 이탈피에 적용 시 55,000psi 정도의 강내압력에 해당할 것으로 예측되므로 상용압력 (80,000~100,000psi)하에서는 적용이 어려울 것으로 판단된다.

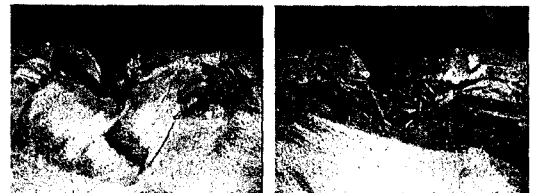


Fig 4. TEM 시편의 groove 파단 형상

이에 반해 반경방향으로 적층된 시편의 경우, T3Q, T7Q, PQ 시편 모두 100mps 이상의 높은 충

돌 속도에서도 groove 부위에 파단이 일어나지 않고 형상을 그대로 유지하였다 (Fig 5,6). Q type의 시편들은 이방성이 큰 복합재의 단점을 극복하기 위하여[+45/90/-45/0/-45/90/+45]의 준 등방성(quasi-isotropic lay up) 배열을 하고 있으며 0° (축방향)의 배향으로 인한 구조 안전성 보강과 +45° 배향에 의해 groove 전단강도 향상효과⁴를 가진다. 이들 시편은 실제 적용 가능성을 가늠하는 충돌 속도인 100mps의 조건을 모두 만족하고 있다. Fig 5~7은 T3Q, T7Q, PQ 시편들의 단면 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다.

Fig 7은 T7Q 시편의 축방향 단면을 광학 현미경으로 관찰한 미세조직 사진이다. 우측 그림에서와 같이 .../-45°/0°/-45°/90°/...의 배향 형상을 확인할 수 있다.

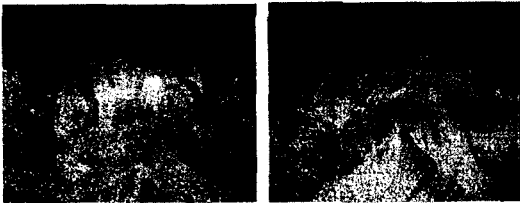


Fig 5. PQ 시편의 groove 단면 사진

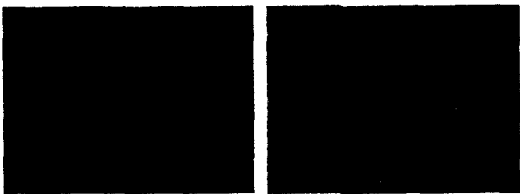


Fig 6. T7Q 시편의 groove 단면 광학 현미경 사진



Fig 7. T7Q 시편의 축방향 단면 광학 현미경 사진

5. 결론

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

전체 4 가지 재료에 대한 고속 충돌 시험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 채택된 복합재 시편 중 BMC로 제작된 TEM 시편 이외에는 모두 우수한 결과치를 보였다. BMC 시편의 경우 일정한 방향성을 가지지 않는 재료 특성으로 인해 섬유배향 방향으로의 강도 보강 효과를 기대하기 힘들고 따라서 고속에서의 내충격성이 크지 않았다.
2. Radial 성형된 T300 과 T700 급 carbon/epoxy 시편의 경우 100mps 이상의 충돌조건에서도 groove 와 구조가 모두 안정한 결과를 나타내었으며, 이는 섬유배향의 효과에 기인한 것으로 예측된다.

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

참고문헌

- (1) W. Johnson, "Impact strength of materials", Edward Arnold, London (1972).
- (2) 박관진, 강근희, "역탄도 기법을 이용한 복합재 이탈피 그루브의 안전도 평가", 지상무기체계발전세미나 (1999).
- (3) G. Sundararajan and Y. Tirupataiah, "A dynamic indentation technique for the characterization of the high strain rate plastic flow behavior of ductile metals and alloys", J. Mech. Phys. Sol., Vol. 39, No. 2 (1991).
- (4) 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).