

전단하중을 받는 복합재료 다중 노치의 파괴강도

이재광* · 황병선* · 박승범* · 박인서** · 윤한기***

Strength of composite notches under shear load

J.K. Lee*, B.S. Hwang*, S.B. Park*, I.S. Park** and H.K. Yoon***

Key Words: composite notch, FEA, shear load, groove

Abstract

An experimental research work for the fracture and notch strength of thick laminates has been performed to develop high quality composite notches for structural use. Thus, the multi-directional laminates are designed and compared to the baseline aluminum. The difference of notch strength caused by manufacturing techniques is also discussed. The notches of selected materials are evaluated by the static test and low-velocity impact test. Failure modes are also observed and assessed. Material design is evaluated by the FEA(finite element analysis) and confirmed by experiments. The successful results are obtained for thick composite notches, which shows higher strength than aluminum notches.

기호설명

Q : quasi isotropic, UD : unidirectional

1. 서론

기준에 사용되어 왔거나 새로 개발되는 구조물에 있어서 경량화는 공학적 관점에서 중요한 과제이다. 앞서 이용되었던 구조물을 대체하는 경우나 새롭게 어떤 구조물을 설계할 경우에는 사용목적에 부합하는 물성을 확보하거나 혹은 기존의 것을 개선하기 위해 많은 재료들이 고려된다. 이러한 맥락에서 사용되어온 적층복합재료는 대체로 커다랗고 곡률이 크지 않은 형상으로 사용되어왔다. 즉, 이종재료간의 결합으로 이루어진 섬유/고분자 복합재료의 특성으로 여타 재료에 비해 월등한 경량화 가능성에도 불구하고 집중하

중을 받거나 특정형상에 대해서는 구조적인 역할을 수행하지 못하는 경우가 있었다. 따라서 이러한 현상에 대한 연구는 중요한 과제로 남아있다.[1-4] 본 논문은 기준에 사용되어 왔던 알루미늄 재질의 나사산 형상의 노치(이하 본 논문에서는 노치라 함)보다 높거나 동등한 강도를 가지는 복합재료 노치를 개발하기 위한 실험적인 연구이다. 단일방향 탄소섬유 복합재료의 이방성은 특정방향으로는 알루미늄보다 높은 물성을 나타내지만 실제 구조물에 적용할 수 없으므로 다중방향 적층이 설계되었다. 또, 제조방법에 따른 강도의 차이와 사용된 재료에 따른 차이가 논의되었고 선정된 몇 가지 재료들은 정적실험과 저속충격실험에 의해 평가되었다. 파괴모드가 관찰되었고 수치해석에 의해 평가된 재료 설계의 타당성은 실험에 의해 확인되었다.

* 한국기계연구원 복합재료실

** 국방과학연구소

*** 동의대학교 기계산업시스템 공학부

2. 실험

2.1. 재료설계

본 연구에서 사용된 재료는 0.5inch, 0.1inch 탄소 단섬유와 인성이 있는 에폭시로 구성된 BMC, 단일방향 Carbon/Epoxy prepreg(T300, T700급 탄소섬유), 단일방향섬유와 Polyetherimide계 열가소성 수지로 구성된 Carbon/PEI가 사용되었다. 원재료들을 사용하여 섬유가 모두 같은 방향으로 적층된 단일방향시험편과 여러 방향이 조합된 다중방향 시험편이 각각 제작되었다. 섬유방향의 정의에 대해서는 Fig. 1에 나타내었고 적층형태에 관해서는 Table. 1에 나타나있다.

Table 1. Type of specimen and their lay-ups

Specimen	Lay-ups	Ply
0	$[0]_{80}$	80
90	$[90]_{80}$	80
45	$[45]_{80}$	80
-45	$[-45]_{80}$	80
± 45	$[45/-45/45/-45/45/-45/45]_{14}$	98
Q	$[45/0/-45/90/-45/0/45]_{14}$	98

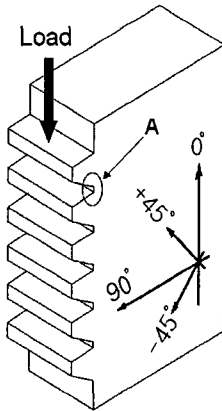


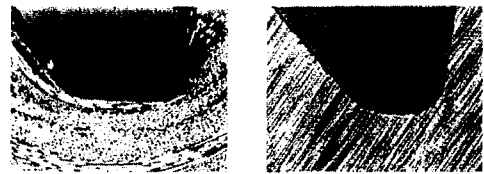
Fig. 1. Specimen configurations

단, T300과 T700 프리프레그는 위의 모든 적층에 의해 제작되었으나 PEI 프리프레그는 단지 $[90]$, $[\pm 45]$, $[0/+45/90/-45]$ 형태만 제작되었다.

2.2. 시험편제작

시험편은 성형시험편과 가공시험편 2가지 형태로 나눌 수 있는데, 성형시험편은 시험편 형상으

로된 금형으로 성형되어 2차 가공을 거치지 않은 것이며, 가공시험편은 평판형태로 제작된 것을 절단하고 전용치구로 2차 가공하여 시험편 형상으로 만든 것이다. 성형시험편과 가공시험편은 노치의 주위를 관찰해 보면 그 차이를 확실히 알 수 있다. Fig. 2를 관찰해 보면 성형시험편의 경우에는 섬유가 노치형상을 끌고루 채우지 못하고 빠져 있는 부분이 많고 이것을 수지가 채우고 있음을 알 수 있다. 그러나 성형시험편의 경우에는 평판이 깎여서 노치형상이 이루어 졌기 때문에 섬유가 형상을 따라 끌고루 분포되어있음을 알 수 있다. 이것은 두 시험편간의 커다란 강도차이를 가져 오게된다. Fig. 2는 Fig. 1의 A부분에 해당된다.



(a) Molded specimen (b) Machined specimen

Fig. 2 Fiber distribution at groove

노치는 금형과 전용치구의 연마가공으로 한쪽 끝의 길이 1.1mm 와 폭 1.0mm로 제작되었다. 빗면의 길이는 2~3mm, 노치의 각도는 중심선에서 45° 도와 7° 를 이루었다. 모든 시험편은 재료 제조사의 경화사이클을 따라 경화되었고 2시간의 후경화를 거쳤다.

2.3. 정적강도실험과 동적강도실험

노치의 강도는 동적실험과 정적실험에서 같은 치구를 사용하여 측정하였는데 치구에 의해 시험편이 지지되는 상태에서 측면의 노치에 편차가 하중을 전달하게 된다(Fig. 1 참조). 시험기는 UTM 과 Dynatup Drop-Weight System이 정적시험과 동적시험에 사용되었다. 여러 개의 나사핀 노치들은 전단형태의 하중을 받는다. 따라서 노치의 강도 평가는 전단강도의 관점에서 수행되었고 본 논문의 노치강도는 재료 전단강도의 한가지이다. 다시 말하면 노치강도는 가해진 최대하중을 전단면적으로 나누어 정의 되었다.

2.4. 응력해석

유한요소해석은 육안확인이나 데이터 검출이 어려운 파괴순간의 각 층별 응력분포를 확인하고 가시화하는데 사용되었다. ANSYS®의 복합재료 Layer Shell Element를 사용하여 노치를 가진 일정한 두께의 적층판을 모델링하여 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 정적강도

실험의 결과치에서 알 수 있는 것은 노치 제작 방법에 따라 명백한 차이를 나타낸다는 것이다. 단일방향 시험편이 낮은 값을 보이는 것은 하중이 거의 수직전단의 형태로 가해졌을 때 단지 섬유와 수지의 계면강도만이 하중에 저항하기 때문이다. 전체적으로 보면 성형된 것보다 가공된 것이 강도가 좋다는 것과 carbon/epoxy 재료의 정적 강도에 약간의 차이가 있다는 것이다. 그것은 가공시험편의 강도가 성형시험편보다 우수하지만, 단지 [0]적층의 경우에는 가공된 것은 노치가 만들어지면서 연속된 섬유가 끊어지지만 성형된 것은 수지에 비해 적은 양이지만 일부의 섬유가 노치형태를 구성하여 하중을 지지함으로써 가공된 것에 비해 높은 값을 가지며, T300과 T700이 일정한 경향을 보이지 않는 것은 가공된 것에 비해 성형된 것은 노치가 성형될 때의 압력 때문에 섬유가 흩어지면서 적층방향과는 무관하게 재배치되고 수지가 전체적인 노치형상을 구성하는 불확정성 때문이다.

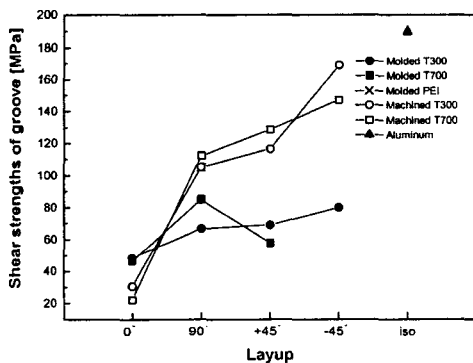


Fig. 3. Machined and molded groove strength of UD laminates block.

Fig. 3에서 노치의 강도는 [-45]>[+45]>[90]>[0]의 순서를 보인다. [0]시험편은 작용하중과 섬유배열의 방향이 같기 때문에 균열진전에 대해 가장 낮은 저항력을 가진다. [-45]방향시험편은 [+45]와 반대방향의 섬유배열을 가지고 있다. 금이간 부분은 [+45]보다 작으며 동시에 균열진전은 압축작용과 관련된 작용하중에 의해 균열진전이 방해를 받는다. 성형된 PEI/carbon(90-deg lay-up, symbol ×, 105.05 MPa)시험편은 같은 조건의 다른 시험편과 비교하여 높은 결과를 보여준다. 이것은 기지재가 되는 수지의 인성의 효과와 관련이 있다.

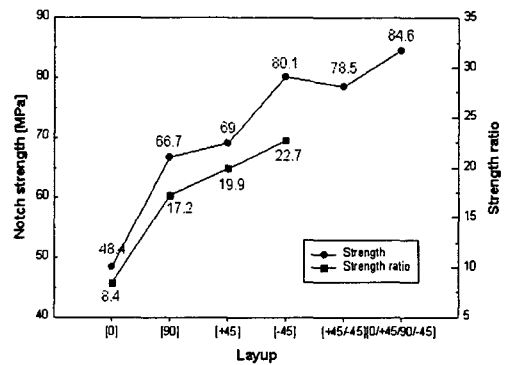
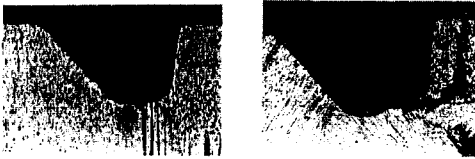


Fig. 4. Molded notch strength in terms of stacking sequence.

FEA는 실험에서 얻어진 최대과파하중이 적용되어 각층의 응력분포와 파괴가 계산되었다. 다시 각층에 동일한 하중을 적용시켜 최대 전단강도가 계산되었고 Tsai-Wu 파괴이론을 적용시켜 응력비를 계산하였다. Fig. 4에서 높은 강도비를 가지는 층은 높은 전단 강도를 보임을 알 수 있다. 일방향 적층에 관한 강도는 [0], [90], [+45], [-45], 의 순서로 8.4, 17.2, 19.9, 22.7의 값을 보인다. [0]적층에 다른 적층과 동등한 하중이 가해졌을 때 더 높은 파괴강도를 가지는 층은 낮은 강도비를 나타낸다. 그러므로 적층방향의 변화로 노치에서 일어나는 응력의 크기를 줄일 수 있다. 즉, FEA를 통해 적당한 적층각도를 선택할 수 있다.

Fig. 5의에서 다른 파괴 형태를 볼 수 있다. 일방향 적층은 섬유의 방향에 따라 파괴된다. 그러나 다중방향적층은 노치의 뿌리부분에서 시작하

여 하중의 작용방향으로 균열이 진전된다. 따라서 다중방향 적층의 섬유를 끊기 위해서는 더 높은 하중이 필요하기 때문에 목적에 부합하는 성능을 발휘하기 위해서는 다중방향 적층을 사용할 때 가능하다. 유망한 $[\pm 45]$ 와 $[0/+45/90/-45]$ 의 두 가지 적층이 실험, 평가되었다. $[+45]$ 와 $[-45]$ 가 조합된 적층은 $[-45]$ 보다 높은 강도값을 나타내지 않는다.



(a) Uni-direction (b) Multi-direction

Fig. 5. Failure of laminate blocks

다중방향 적층의 실험에서 $[0/+45/90/-45]$ 적층이 가장 높은 값을 보였으며 이것은 목표하였던 알루미늄의 강도를 증가하는 것이며 전체 결과는 Table 2에 나타내었다.

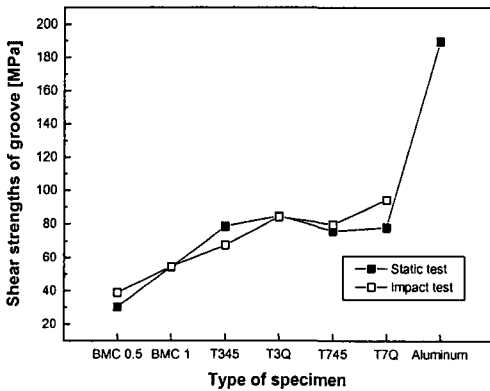


Fig. 6. Static and impact strength for molded notch materials.

3.2. 동적강도

Fig. 6은 이 실험에 사용된 모든 재료의 동적, 정적 노치강도인데 2가지 형태의 실험에서 큰 차이를 나타내지는 않는다. 이것으로 저속충격은 적층물의 파괴에 심각한 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 저속충격실험은 준정적 실험으로 간주되었고 정적 실험으로 대체되었다.

Table 2. Molded and machined groove strength of various materials.

Materials	Lay-up	Strength of molded groove[MPa]	Strength of machined groove[MPa]
T700/Epoxy	T7Q	77.972	220.839
	T745	75.873	132.557
T300/Epoxy	T3Q	84.575	206.299
	T345	78.485	158.779
Carbon/PEI	PEIQ	-	239.072
	PEI45	105.05 ¹⁾	168.401
BMC	0.5"random	30.45	-
	0.1"random	54.24	-
Al7075-T651			189.647

4. 결론

본 논문의 실험적인 연구는 알루미늄 재료의 전단실험과 동일하거나 더 높은 강도의 복합재료 노치의 개발을 가능하게 하는 결과치를 얻었다. 정적, 동적 하중을 가하여 강도를 계산하였고, 성형노치보다 가공노치 시험편들은 더 높은 강도를 보였다. 미시적인 관찰에 의해 가공노치의 섬유분포가 성형노치보다도 더욱 이상적임을 확인하였다. 더 나은 섬유 분포는 자연히 더 높은 강도를 보인다. 단일방향 강도값과 이를 이용한 FEA를 통해 $[\pm 45]$ 와 $[0/+45/90/-45]$ 가 선택되어 실험되었다. $[0/+45/90/-45]$ 의 적층을 가지고 가공된 carbon/PEI 재료가 가장 좋은 결과를 보였다.

참고문헌

- (1) S. C. Tan, Stress Concentrations in Laminated Composites, Technomic Pub., Lancaster, (1994).
- (2) F. A. Maclaughlin, Proc. of 21st Intel. SAMPE Technical Conference, (1992) p. T699.
- (3) K. Hamajima and M. Mausuda, Proc. of 4th Japan Intel. SAMPE Sympo., Tokyo (1995), p. 1189.
- (4) B. S. Hwang, et. al., Proc. of 6th Japan Intel. SAMPE Sympo., Tokyo, Oct. 26 (1999) p. 606.
- (5) P. O. Sjoblom, J. T. Hartness, and J. T. Cordell, J. Composite Materials, 22 (1988).3