

평직 탄소섬유복합재료의 파괴인성평가

The Evaluation of Fracture toughness for Woven CFRP

*박흥선¹, 이우형², 금진화¹, 최정훈¹, 구재민¹, #석창성¹

*H. S. Park¹, W. H. Lee², J. H. Keum¹, J. H. Choi¹, J. M. Koo¹, #C. S. Seok(seok@skku.edu)¹

¹ 성균관대학교 기계공학과, ² SK 건설 플랜트 기계장치팀

Key words : Woven Carbon Fiber Reinforced Composite Materials, Fracture toughness, Virtual Crack Closure Technique, Energy Release Rate

1. 서론

탄소섬유강화 복합재료가 금속재료에 비하여 높은 비강성과 비강도 등의 우수한 기계적 성질을 가지고 있기 때문에, 최근 경량화가 요구되고 있는 항공기와 자동차 등에 금속재를 대체하여 사용되고 있는 실정이다¹.

항공기나 자동차용 구조물에 사용되는 복합재의 경우, 안전에 대한 요구 때문에, 정확한 물성을 평가하고 획득하는 것이 중요하다. 특히 운행 중 발생하는 결함의 성장에 의한 파괴는 안전에 심각한 영향을 미치기 때문에 파괴역학적인 측면에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

이에 본 논문에서는 초기 균열길이와 섬유배열방향의 변화가 직조된 탄소섬유 강화복합재료의 파괴역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 수치 해석적인 방법과 시험을 통해서 비교 분석하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 가상균열 닫힘법

가상균열진전법은 실제 균열 길이 a 에서 가상 균열 길이 $a+\Delta$ 로 진전하기 위한 일 W 와 $a+\Delta$ 에서 a 로 균열이 닫기 위한 일은 서로 같다는 가정에 기초하고 있다². 즉,

$$W = \frac{1}{2} \int_0^\Delta v(r) \sigma_y (\Delta - r) dr \quad (1)$$

이다. 여기서 v 는 균열 표면에서의 변위값이고 σ_y 는 균열선단에서의 응력값이다. 그리고 에너지 해방율 G 는 가상 균열 진전량 Δ 에 대해 한 일 W 로 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{W}{\Delta} = \frac{1}{2\Delta} \int_0^\Delta v(r) \sigma_y (\Delta - r) dr \quad (2)$$

2차원 문제에 있어서 Mode I과 mode II에 대한 에너지 해방율은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} [F_{\eta,i}(U_{\eta,l} - U'_{\eta,l}) + F_{\eta,j}(U_{\eta,m} - U'_{\eta,m})] \quad (3)$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} [F_{\xi,i}(U_{\xi,l} - U'_{\xi,l}) + F_{\xi,j}(U_{\xi,m} - U'_{\xi,m})]$$

2.2 J-integral과 에너지 해방율의 관계

Fig. 2와 같이 균열선단 주위의 임의의 반시계방향의 경로(Γ)에 대한 Rice⁶에 의해 제안된 J 적분은 아래의 식과 같다.

$$J = \int_\Gamma W dy - \int_\Gamma (t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial x}) ds \quad (4)$$

여기서, Γ = 균열선단의 임의의 경로

$$W = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad u = \text{변위벡터}$$

$t_x, t_y = x, y$ 축을 따르는 건인력 벡터의 성분

$ds =$ 곡선 Γ 을 따라 변하는 길이 증분

$\sigma_{ij}, \epsilon_{ij} =$ 응력, 변형률 텐서

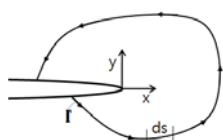


Fig. 2 Arbitrary contour around the tip of a crack

2.3 일반 켈러법

일반 켈러법³은 에너지 해방율에 기초를 둔 것으로 전에너지 해방율 $G_T(a, x)$ 은 아래와 같다.

$$G_T = -\frac{1}{B} \left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_x \quad (5)$$

(B : thickness, a : crack length, x : displacement)

$$U = \int_0^x P dx = U(a, x) \quad P = P(a, x): \text{applied load}$$

$$\left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_x = \frac{dU}{da} - \left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_a \cdot \frac{dx}{da} \quad (6)$$

$$= \frac{dU}{da} - P \frac{dx}{da}$$

식 (6)를 식 (5)에 대입하고, 켈러선 L 을 따라 양변을 적분하면 식 (7)와 같다.

$$-B \int_L G_T da = \int_L dU - \int_L P dx \quad (7)$$

식 (7)의 우변은 Fig. 3과 같다. 켈러선 L 은 D 와 F 사이의 점선이며, 최고 하중점들의 켈러이다. 첫째항은 OFG의 면적이고, 둘째항은 DFG의 면적이다. 따라서 식 (7)의 오른쪽 항은 빗금 친 부분, OFD의 면적이다. 켈러선 L 에서 임의의 점에 대한 G 는 식 (7)의 양변을 균열길이에 대하여 미분하여 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_T = -\frac{1}{B} \frac{dU_L}{da} \quad (8)$$

G_T 가 켈러선을 따라서 일정하게 변화할 때 G_T 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$G_T = -\frac{1}{B} \frac{\Delta U_L}{\Delta a} \quad (9)$$

3. 유한요소 해석

3.1 해석모델

본 연구에서 해석한 유한요소 모델은 Fig. 4에 나타난 CT시험편의 형상으로 두께가 3.5mm(16ply)로 모델링 한 후, 핀홀 부분에 균열진전 방향에 수직한 방향으로 하중을 부과하였다. 해석에 사용된 재료의 물성은 Table 1과 같다. 모델은 약 12,200개의 요소(element)와 약 41,000개의 절점(node)으로 구성된 쉘요소(Shell element)를 사용하였으며 균열선단에서는 구속효과를 정량화하기 위하여 조밀한 유한요소망으로 구성하였다. 모델링과 해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

해석은 균열길이(a/W)를 0.45, 0.50, 0.55로 증가시키고, 직조된 섬유와 하중 작용방향이 0°, 30°, 45°가 되도록 모델을 구성하여 수행하였다. 그리고 하중은 핀홀에 일정한 힘을 작용하였을 때 나타나는 응력과 에너지를 이용하여 결과를 분석하였다.

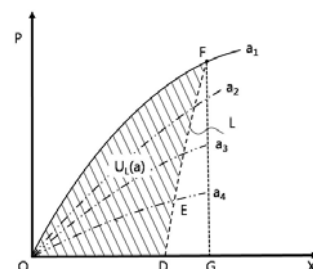


Fig. 3 Load-Displacement curve as a function of initial crack lengths

Table 1 Material Properties

E_L (GPa)	E_T (GPa)	$G_{L,T}$ (GPa)	ν_{LT}
55.0	55.0	4.75	0.18

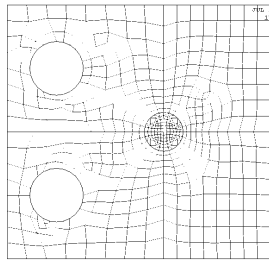


Fig. 4 Configuration of CT specimen

3.2 해석 결과

균열선단에서의 임의의 경로에 대한 J적분법을 이용한 방법과 가상균열 단합법에 의한 방법에 대해서 해석을 하였다. 그 결과를 각각 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

해석결과를 보면, J적분과 G의 경우 값에서는 차이가 있었지만, 섬유와 하중 방향이 이루는 각이 커짐에 따라 그 값들이 감소하였다.

4. 실험

4.1 재료 및 시험 방법

평직 탄소섬유 프리프레그인 WSN-3K를 16ply(3.5mm)로 적층하여 성형·제작하였다. ASTM E399⁴에 따라 CT시편을 제작하였으며, 폭 1mm 노치를 삽입하였으며, 시험편의 섬유배열각도를 하중방향에 대하여 0°/90°, +45°/-45°의 두 방향으로 시험편을 채취하여 섬유배열각도에 따른 파괴인성의 변화를 고찰하였다.

Instron사의 25ton유압시험기로 상온에서 0.2mm/min의 속도로 수행하였으며, COD 게이지를 사용하여 개구변위를 측정하였다.

4.2 시험결과

균열길이는 a/W가 0.45, 0.50, 0.55이며, 각 균열길이에 대해서 시험은 3회 실시하였다. 균열길이에 대한 하중과 변위에 대한 값으로 Fig. 5에 나타내었다.

시험결과를 보면, 균열길이가 증가함에 따라 최대 파단 하중은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 섬유배열각이 0°/90°에서 +45°/-45°로 증가함에 따라 최종 변위는 점점 증가하였다. 이는 하중방향과 섬유배열각이 커짐에 따라 전단에 의한 하중 분산으로 인해 그 변형이 증가한 것으로 판단된다.

각 균열길이에 대한 하중·변위 선도에서 최대하중점을 연결한 궤적선을 이용하여 각 균열길이에 대한 에너지를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과로, 초기 균열이 증가할수록 단위 두께에 대한 에너지 U_L 은 감소함을 알 수 있다. 두 가지 섬유배열각에 대해서 G_T 를 Fig. 7에 해석결과와 함께 나타내었다.

4.3 고찰 및 토의

해석을 통해 J적분값으로 구한 에너지 해방율과 가상균열 단합법으로 구한 에너지 해방율을 비교하여 보았을 때, Fig. 7에 나타난 것과 같이 그 값에서는 차이가 있었지만, 섬유 배열방향과

Table 2 The results of analysis for J-integral

a/w	0°/90°	30°/-60°	+45°/-45
0.45	4967.95	3836.85	2920.77
0.50	6378.63	5230.21	4078.22
0.55	8465.96	7352.59	5834.50

Table 3 The results of analysis for G by VCCT

a/w	0°/90°	30°/-60°	+45°/-45
0.45	6715.99	4387.24	3024.34
0.50	7344.35	5425.21	3725.45
0.55	8211.98	6187.5	4687.25

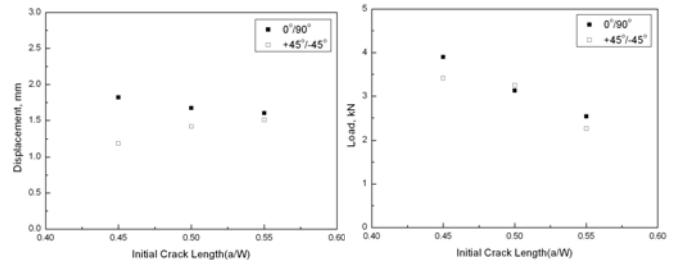


Fig. 5 Final displacements and maximum loads with initial crack lengths

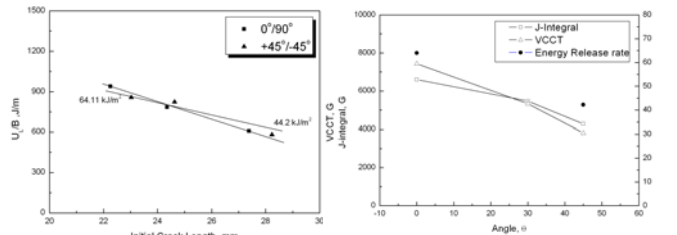


Fig. 6 The curve of UL/B vs. Fig. 7 The comparison with the analysis methods

하중이 이루는 각이 커짐에 따라 값의 크기가 감소함을 알 수 있었고, 이를 검증하기 위하여 궤적법에 의한 실험 결과에서도 각도에 따라 에너지 해방율은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각도에 따른 시험편의 균열진전 방향에서도 알 수 있듯이 섬유 배열방향과 하중이 이루는 각이 커짐에 따라 하중에 수직한 방향이 아닌 섬유배열방향에 수직한 방향, 즉, 균열선단에서 섬유 배열방향에 따른 수직한 힘과 수평한 힘으로 그 힘이 분해됨으로써 전단에 의한 Mode II 방향으로의 파괴가 발생함에 따라 그 값이 작아진 것으로 판단된다.

5. 결론

해석과 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 해석을 통한 에너지 해방율의 결과를 보면, 일정하중 조건으로 해석하였기 때문에 균열길이가 증가함에 따라 그 값은 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 해석결과에 있어서, 섬유배열방향과 하중 방향이 이루는 각이 증가함에 따라 그 값이 감소하였다. 이는 하중에 수직한 방향으로의 강성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.
3. 일반궤적법에 의한 파괴인성평가 결과, 균열이 진전함에 따라 균열을 진전시키고자 하는 에너지는 감소하며, 에너지 해방율 G_T 는 해석결과와 마찬가지로 그 값이 감소하였다.
4. 해석결과와 시험결과 모두에서 각도가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 정확한 섬유배열방향에 따른 파괴저항을 예측하고 평가하기 위해서는 Mode II 방향을 고려한 혼합모드에 의한 해석 및 평가가 필요하다.

후기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업(BK21)과 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-0055842).

참고문헌

1. 김광수, 김상태, “직물탄소 섬유강화 복합재료의 파괴특성에 관한 연구,” 대한기계학회 논문집, 16(3), 497 ~ 505, 1992.
2. S. P. Heo, W. H. Yang, C. Kim, “Stress Intensity Factors for Elliptical Arc Through Cracks in Mechanical Joints by Virtual Crack Closure Technique,” KSME international Journal, 16(2), 182 ~ 191, 2002.
3. 최영근, 이유태, 이택순, “SMC 복합재료와 Carbon/Epoxy 복합재료의 파괴인성평가,” 한국해양공학회지, 7(1), 25 ~ 32, 1993.
4. ASTM E399, ASTM international. 2006.