평직 탄소섬유강화 복합재료의 파괴인성평가

The Evaluation of Fracture Toughness for Woven Carbon Fibered Reinforced Composite Materials

박홍선[1], 이우형[2], 금진화[1], 최정훈[1], 구재민[3], 석창성[3,✉]
Hong Sun Park[1], Woo Hyung Lee[2], Jin Hwa Keum[1], Jung Hun Choi[1], Jae Mean Koo[3] and Chang Sung Seok[3,✉]

1 성균관대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Hankook Univ.)
2 SK 건설 플랜트사업부 (Plant Division, SK E&C.)
3 성균관대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Hankook Univ.)
✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: 031-290-7446

Manuscript received: 2010.4.15 / Accepted: 2010.7.2

This study examined how the fracture toughness is affected according to the variation of the initial crack length and the fiber arranged angle using FEA method and experimental method. Therefore, the energy release rates were calculated and compared by J-integral method and VCCT(Virtual Crack Closure Technique). The results of fracture toughness test verified these results. At this time, the locus method was used in order to determine the energy release rate. When the results of FEA were compared with those of experiment, all of those decreased with the increase of angle between load and the fiber arranged direction. The decrease was due to reducing maximum load and stiffness, and the reason of reduction has been judged that the inplane shear stress.

Key Words: Woven Carbon Fiber Reinforced Composite Materials (평직 탄소섬유강화 복합재료), Fracture toughness (파괴인성), Virtual Crack Closure Technique (가상균열닫힘법), Energy Release Rate (에너지 해방율)

기호설명

G_T = total energy relaease rate
W = work done
U = energy for applied load

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 실정이다.[1-3] 이러한 탄소섬유강화 복합재료는 직물형태에 따라 크게 일방향 탄소섬유강화 복합재료와 평직 탄소섬유강화 복합재료 두 가지로 나누어지는데, 그 중 일방향 탄소섬유강화 복합재료는 유연성이 좋지 않기 때문에 복잡한 형상을 갖는 구조물에 적용되지 못하고, 비교적 단순한 형상인 평판이나 파이프를 만드는데 주로 사용된다. 그러나 평직 탄소섬유강화 복합재료는 높은 유연성으로 인하여 복잡한 구조물에도 적용할 수 있기 때문에 산업용 재료로 더욱 주목받고 있다.

이러한 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 섬유배열 방향의 변화가 직조된 탄소섬유 강화복합재료의 파괴역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 수치 해석적인 방법과 시험을 통해서 비교 분석하고자 한다. 이를 위해서 J 적분과 가상균열 닫힘법을 이용하여 구한 에너지 해방율의 값의 차이를 비교 분석하고, 이를 검증하기 위하여 CT 시편을 이용하여 파괴저항시험을 실시한 후, 일반궤적법으로 에너지 해방율을 구하였으며, 이를 해석결과와 비교 분석하였다.

2. 관련 이론

2.1 가상균열 닫힘법

일반적으로 에너지 해방율(G)과 응력 확대 계수(K)를 구하기 위해서는 균열선단의 특이성을 포함하는 미세 유한요소망을 사용함으로써 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 균열선단의 특이성은 요소망의 크기에 매우 민감하게 변화하기 때문에 적당한 요소의 크기를 결정하는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 이에 비하여 가상 균열 닫힘법은 균열선단에서의 요소 크기에 의한 영향을 적게 받을 뿐만 아니라 사용상의 편리성 때문에 점차 많이 사용되고 있다.

가상균열진전법은 Fig. 1 에서와 같이 실제 균열길이 a 에서 가상 균열 길이 a+Δ로 진전하기 위한 일 W 와 a+Δ에서 a 로 균열이 닫기 위한 일은 서로 같다는 가정에 기초하고 있다.[4,5] 즉,

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

이다. 여기서 v 는 균열 표면에서의 변위값이고 σ_y 는 균열선단에서의 응력값이다. 그리고 에너지 해방율 G 는 가상 균열 진전량 Δ에 대해 한 일 W 로 나타낼 수 있다.[5]

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

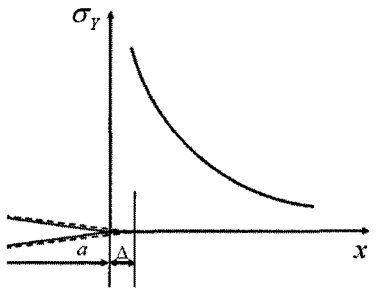

Fig. 1 Load-Displacement curve as a function of initial crack lengths

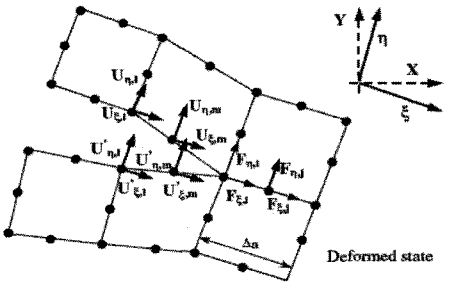

Fig. 2 Nodal forces and displacements at the crack tip for applying VCCT in non-linear analysis

Fig. 2 에서와 같이 2 차원에서의 Mode I 에 대한 에너지 해방율은 식(3)으로 나타낼 수 있다.[6]

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

여기서 Δa 는 균열면에 대한 요소의 길이이고 F 는 힘이고, U 는 변위이다.

2.2 J-integral 과 에너지 해방율의 관계

Fig. 3 에 나타난 바와 같이 균열선단 주위의 임의의 반시계 방향의 경로(Γ)에 대한 Rice[7] 에 의해 제안된 적분은 아래의 식(4)와 같다.

$$J = \int_{\Gamma} W dy = \int_{\Gamma}\left(t_x\frac{\partial u_x}{\partial_x} + t_y\frac{\partial u_y}{\partial_y}\right)ds \qquad (4)$$

여기서, Γ = 균열선단의 임의의 경로
W = 단위체적당 변형률에너지 밀도
t_x, t_y= x, y 축을 따르는 견인력 벡터의 성분

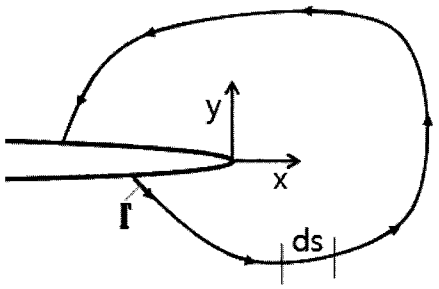

Fig. 3 Arbitrary contour around the tip of a crack

$(\sigma_x n_x+\sigma_{xy} n_y)$, $(\sigma_y n_y+\sigma_{xy} n_x)$
u = 변위벡터
ds= 곡선 Γ 를 따라 변하는 길이 증분

또한 변형률 에너지 밀도는 식(5)와 같이 정의된다.

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \tag{5}$$

여기서, σ_{ij}, ε_{ij} 는 각각 응력과 변형률 텐서이다. 견인력 T_i 는 윤곽선에 수직한 응력벡터로서 경계에 작용하는 수직응력으로 정의할 수 있다. 즉, 견인력 벡터의 성분은 식(6)과 같다.

$$T_i = \sigma_{ij} n_{ij} \tag{6}$$

여기에서 n_{ij} 는 Γ에 수직한 단위벡터 성분이다. 이 J 적분값은 탄성범위의 경우, 에너지해방율 G 와 동일하다.

2.3 일반 궤적법

일반 궤적법 [8] 은 에너지 해방율에 기초를 둔 것으로 전에너지 해방율 $G_T(a, x)$은 아래와 같다.

$$-B\int G_T da = \int dU - \int P dx \tag{7}$$
$$(B: thickness,\ a: cracklength,\ x: displacement$$
$$U = \int_0^x P dx \quad P = P(a,x): applied\ load$$

하중 P 가 균열길이 a 와 변위 x 의 함수이므로, 에너지 U 도 균열길이와 변위의 함수이다.

$$U = U(a,x)$$
$$\left[\frac{\partial U}{\partial a}\right]_x = \frac{dU}{da} - \left[\frac{\partial U}{\partial a}\right]_a \cdot \frac{dx}{da} \tag{8}$$
$$= \frac{dU}{da} - P\frac{dx}{da}$$

식 (8)를 식 (7)에 대입하고, 궤적선 L 을 따라 양변을 적분하면 식 (9)와 같다.

$$G_T = -\frac{1}{B}\left[\frac{\partial U}{\partial a}\right]_x \tag{9}$$

식 (9)의 우변은 Fig. 4 와 같다. 여기에서 궤적선 L 은 D 와 F 사이의 점선이다. 궤적선 L 은 특성점들을 연결하는 선인데 예를 들면 최고 하중점들의 궤적, 균열개시점들의 궤적 또는 균열이 일정한 길이만큼 진전한 점들의 궤적 등으로 생각할 수 있다. 우변 첫째항은 OFG 의 면적 항이고, 둘째항은 DFG 의 면적을 나타낸다. 따라서 식 (9)의 오른쪽 항들의 합은 하중선과 변위축 및 궤적선 (Locus Line)안의 빗금 친 부분, OFD 의 면적이 된다. 빗금 친 면적 $U_L(a)$는 최고 하중점들의 궤적을 사용하여 구하면 되고 다른 특성점에서의 값을 구할 때는 이에 상응하는 궤적을 사용하면 된다. 궤적선 L 에서 임의의 점에 대한 G 는 식 (9)의 양변을 균열길이에 대하여 미분하여 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_T = -\frac{1}{B}\frac{dU_L}{da} \tag{10}$$

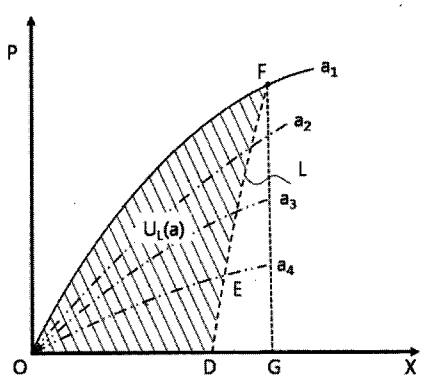

Fig. 4 Load-Displacement curve as a function of initial crack lengths

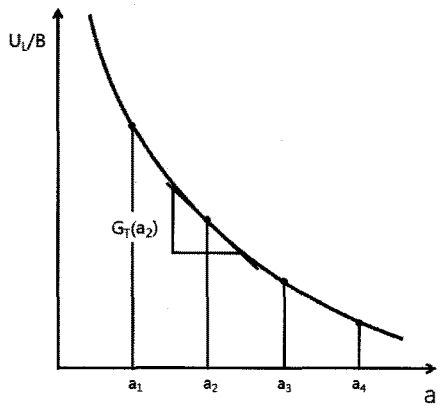

Fig. 5 The curve of U_L/B-initial crack lengths

식(10)으로부터 Fig. 5 의 경우에 나타나 있는 곡선의 기울기가 G_T 값이 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 U_L/B 와 균열길이의 관계선도로부터 균열길이의 변 화에 따른 G_T 값의 변화를 알아보는데 사용될 수 있다. G_T 가 궤적선을 따라서 일정하게 변화할 때 G_T는 식(11)과 같이 표현될 수 있다

$$G_T = -\frac{1}{B}\frac{\Delta U_L}{\Delta a} \tag{11}$$

3. 유한요소 해석

3.1 해석 모델

본 연구에서 해석한 유한요소 모델은 Fig. 6 에 나타낸 CT 시험편의 형상으로 두께가 3.5 mm (16 ply)로 모델링 한 후, 핀홀 부분에 균열진전 방향에 수직한 방향으로 하중을 부과하였다. 해석에 사용된 재료의 물성은 Table 1 과 같이 E_L, E_T, υ_{LT}, G_{LT}의 4 가지를 부여하였다. 모델은 약 12,200 개의 요소(element)와 약 41,000 개의 절점(node)으로 구성된 쉘요소(Shell element)를 사용하였으며 균열선단에서는 구속효과를 정량화하기 위하여 조밀한 유한요소망으로 구성하였다. 모델링과 해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 사용하였다.

해석은 ASTM 에서 규정하는 시험 범위인 균열길이(a/W)를 0.45~0.55 로 증가시키면서 실시하였고, 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.

3.2 해석 결과

해석은 핀홀에 수직하중을 가한 후에 균열선단에서의 임의의 경로에 대한 J 적분법과 가상균열닫힘법에 의해서 해석을 하였다. 그 결과를 각각 Table 2 와 Table 3 에 정리하였다.

Mode I 에 대한 J 적분법과 가상균열닫힘법의 해석결과를 보면, J 적분과 G 의 경우 값에서는 차이가 있었지만, 섬유와 하중 방향이 이루는 각이 커짐에 따라 그 값들이 감소하였다.

Table 1 Material Properties

E_L(GPa)	E_T(GPa)	G_{LT}(GPa)	υ_{LT}
55.0	55.0	4.75	0.18

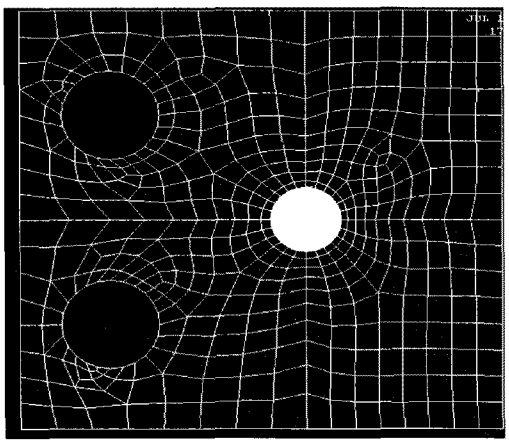

Fig. 6 Configuration of CT specimen

Table 2 The results of analysis for J-integral [kJ/m^2]

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 [kJ/m2]

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

4. 실험

4.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 평직 탄소섬유 프리프레그(Plain Woven Carbon Prepreg)인 WSN-3K(두께 0.22mm)를 16ply(3.5mm)로 적층하여 성형 · 제작하였다. 프리프레그의 일반 조성비는 Table 4 와 같다. Fig. 7 과 같이 ASTM E399[9]에 따라 NC 머신을 이용하여 폭 1mm 노치를 삽입하였으며, 노치의 입구는 COD 게이지를 장착할 수 있도록 가공하였다. 평직 탄소섬유복합재료 시험편 의 섬유배열각도를 하중방향에 대하여 0° /90° , +45° /-45° 의 두 방향으로 시험편을 채취하여 섬유배열각도에 따른 파괴인성의 변화를 고찰하였다.

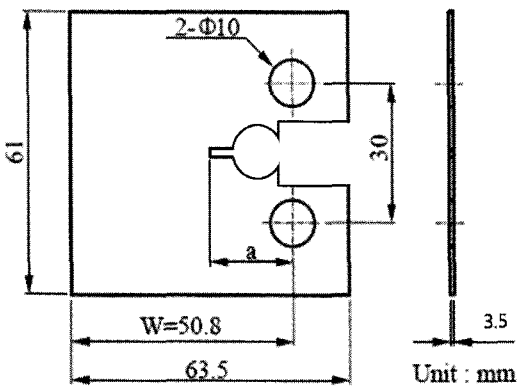

Fig. 7 Configuration of CT specimen

Table 4 Compositions of prepreg

E_L(GPa)	E_T(GPa)	G_{LT}(GPa)	υ_{LT}
55.0	55.0	4.75	0.18

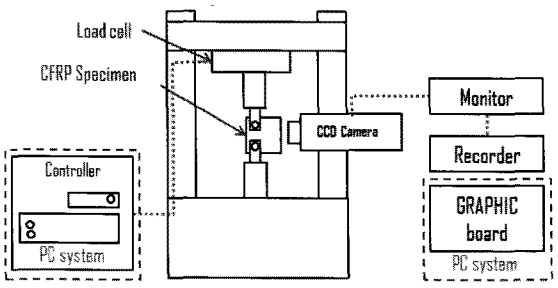

Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus for fracture toughness test

4.2 시험방법

Instron 사의 25ton 유압시험기를 사용하여 상온에서 0.2mm/min 의 속도로 변위 제어에 의하여 수행하였으며, COD 게이지를 사용하여 CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)를 측정하였다. 시험 중 모든 데이터는 상용 DA 프로그램을 이용하여 PC에 저장하였다. 또한 시험 후 균열면의 기지 및 섬유의 표면 손상을 100 배율 CCD 카메라를 사용하여 분석하고 PC 에 저장하였다. Fig. 8 에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

4.3 시험결과

하중방향과 섬유배열방향이 다른 시험편에 대해 균열길이의 변화에 따른 파괴인성 시험을 실시하였다. 균열길이는 a/W 가 0.45, 0.50, 0.55 인 것으로 결정하였으며, 각 균열길이에 대해서 시험은 3 회 실시하였다. 각 균열길이에 대해서는 산포가 적었으며, 균열길이에 대한 하중과 변위에 대한 값으로 Fig. 9~Fig. 10 에 나타내었다.

시험결과를 보면, 0° /90° 시험편의 결과는 균열길이가 증가함에 따라 최대 하중과 최종변위가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 섬유배열각이 +45° /-45° 인 경우에는 최대 하중은 감소하였지만, 최종 변위는 점점 증가하였다.

각 균열길이에 대한 하중-변위 선도에서 최대 하중점을 특성점으로 하여 연결한 궤적선을 이용하여 각 균열길이에 대한 에너지를 계산하여 Fig. 11 에 나타내었다. 이 결과로부터 초기 균열이 증가할수록 단위 두께에 대한 에너지 U_L 은 감소함을 알 수 있으며, 0° /90° 와 +45° /-45° 의 값은 비슷한 분포를 보였다. 두 가지 섬유배열각에 대해서 식 (11)에 의해 구한 전에너지 해방율 G_T 를 Fig. 12 에 J 적분값과 가상균열법에 의한 G 값을 그래프에 함께 나타내었다.

시험편의 균열진전 방향을 Fig. 13 과 같이 분석하였다. 균열은 섬유배열방향과 수직한 섬유에서 파단이 이루어지는 현상이 주로 발생하였다.

4.4 고찰 및 토의

해석을 통해 J 적분값으로 구한 에너지 해방율과 가상균열 닫힘법으로 구한 에너지 해방율을 비교하여 보았을 때, Fig. 12 에 나타낸 것과 같이 그 값에서는 차이가 있었지만, 섬유 배열방향과 하중이 이르는 각이 커짐에 따라 값의 크기가 감소함

을 알 수 있었고, 이를 검증하기 위하여 CT 시편을 이용하여 실시한 파괴저항시험 결과에 궤적법에 의한 식(11)을 적용한 결과도 각도에 따라 에너지 해방율은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각도에 따른 시험편의 균열진전 방향에서도 알 수 있듯이 섬유 배열방향과 하중이 이르는 각이 커짐에 따라 하중에 수직한 방향이 아닌 섬유배열 방향에 수직한 방향, 즉, 균열선단에서 섬유 배열 방향에 따른 수직한 힘과 수평한 힘으로 그 힘이 분해됨으로써 전단에 의해 그 값이 작아진 것으로 판단된다.

이는 하중방향과 섬유배열각이 커짐에 따라 면내 전단응력의 발생으로 시편의 파단 모드가 섬유파괴에서 전단에 의한 파괴로 변화하면서 강도가 저하된 것으로 알려져 있다.[10]

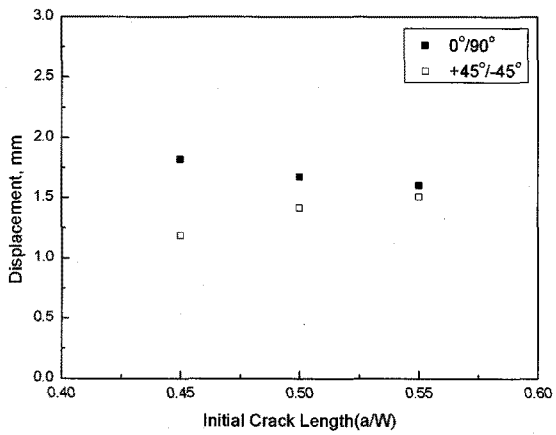

Fig. 9 Final displacements with initial crack lengths

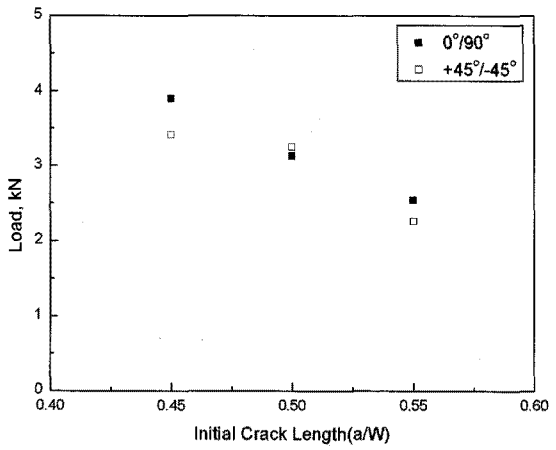

Fig. 10 Maximum loads with initial crack lengths

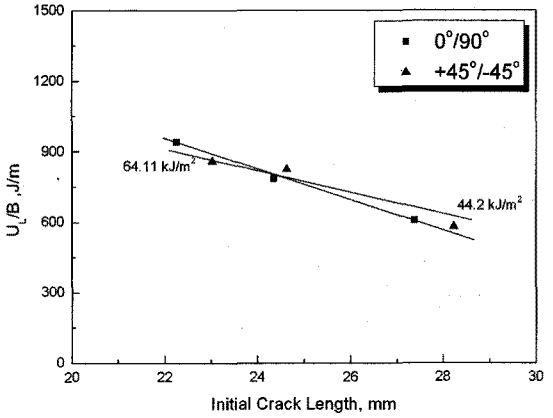

Fig. 11 The curve of U_L/B vs. initial crack lengths

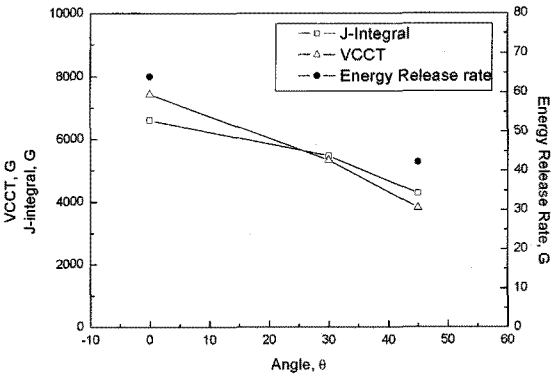

Fig. 12 The comparison with the analysis methods

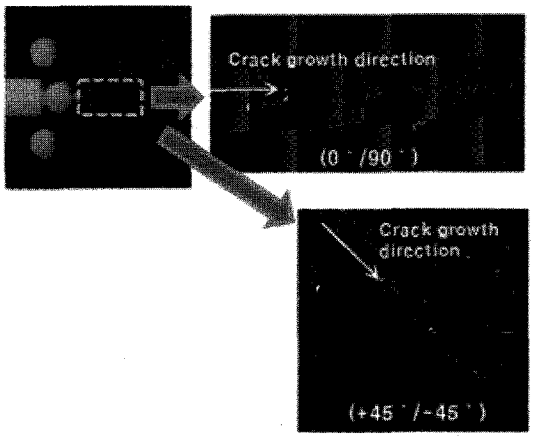

Fig. 13 Crack growth direction according to the direction of fiber

이는 복합재료의 파단은 섬유에 의한 파단이 최종적인 파단에 이른다 [11-13] 는 것으로 확인할 수

있다. 즉, 작용하중은 섬유 배열방향에 수직한 성분과 수평한 성분으로 그 힘이 분산되어, 각각의 힘이 파손을 야기시켰다고 판단된다.

5. 결론

탄소섬유강화복합재료에 있어서 균열길이가 증가함에 따라 그리고 하중방향과 섬유배열방향이 이루는 각이 달라짐에 따라 J 적분에 의한 에너지 해방율과 가상균열 닫힘법에 의한 에너지 해방율의 차이를 비교하고, 이를 검증하기 위하여 파괴저항시험을 실시하여 일반궤적법으로 에너지 해방율을 계산하였으며, 이를 해석결과와 비교하였다. 그로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) J 적분법을 이용해서 구한 에너지 해방율과 가상균열 닫힘법으로 구한 에너지 해방율의 해석결과를 살펴보면, 일정하중 조건으로 해석하였기 때문에 균열길이가 증가함에 따가 그 값은 증가하는 경향을 나타내었다.

2) 해석결과에 있어서, 섬유배열방향과 하중 방향이 이루는 각이 증가함에 따라 그 값이 감소하였다. 이는 섬유 배열각이 증가함에 따라 면내 전단응력의 발생으로 하중 방향으로의 최대 하중과 강성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

3) 일반궤적법에 의한 파괴인성평가 결과, 균열이 진전함에 따라 균열을 진전시키고자 하는 에너지는 감소하며, 섬유배열방향과 하중 방향이 이루는 각도에 따라 에너지의 값에는 차이가 있었지만, 에너지 해방율 G_T 는 해석결과와 마찬가지로 그 값이 감소함을 알 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Kwon, O. H. and Yun, Y. S., "The Effect of Load "Orientation for Crack Propagation and Acoustic Emission Evaluation on Plain Woven CFRP," Trans. of the KSME(A), Vol. 28, No. 4, pp. 443-452, 2004.
2. Kim, K. S. and Kim, S. T., "A study on Fracture Characteristics of Woven Carbon Fiber Reinforced Composite Material," Trans. of the KSME, Vol. 16, No. 3, pp. 497-505, 1992.
3. Choi, J. H., Kang, M. S., Shin, I. H., Koo, J. M. and Seok, C. S., "Evaluation of Residual Strength in Aircraft Composite Under Impact Damage," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 27, No. 2, pp. 94-101, 2010
4. Chang, Y. S., Choi, J. B., Kim, Y. J. and Yagawa, G., "Numerical Calculation of Energy Release Rates by Virtual Crack Closure Technique," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 18, No. 11, pp. 1996-2008, 2004.
5. Heo, S. P., Yang, W. H. and Kim, C., "Stress Intensity Factors for Elliptical Arc Through Cracks in Mechanical Joints by Virtual Crack Closure Technique," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 182-191, 2002
6. Raju, I. S., "Calculation of strain-energy release rates with higher order and singular finite elements," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, No. 3, pp. 251-274, 1987
7. Rice, J. R., "Recent finite element studies in plasticity and fracture mechanics," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 17-18, No. 2, pp. 411-442, 1979.
8. Choi, Y. G., Lee, Y. T. and Lee, T. S., "The Evaluation of Fracture Toughness of SMC Composite Material and Carbon/Epoxy Composite Material," Trans. of the KSOE, Vol. 7, No 1, pp. 25-32, 1993
9. ASTM E399, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness KIc of Metallic Materials," 2006.
10. Kim, S. J. and Chang, S. H., "The Effect of Bias and Shear Angles on Compressive Characteristics of Carbon/Epoxy Plain Weave Fabrics," Trans. of the KSME(A), Vol. 30, No. 7, pp. 857-864, 2006.
11. Naik, N. K. and Nemani, B., "Initiation of damage in composite plates under transverse central static loading," Composite Structures, Vol. 52, No. 2, pp. 167-172, 2001.
12. Payan, J. and Hochard, C., "Damage modelling of laminated carbon/epoxy composites under static and fatigue loadings," International Journal of Fatigue, Vol. 24, No. 2-4, pp. 299-306, 2002.
13. Zhou, G., "Static behaviour and damage of thick

composite laminates," Composite Structures, Vol. 36, No. 1-2, pp. 13-22, 1996.