

〈論 文〉

직물탄소 섬유강화 복합재료의 파괴특성에 관한 연구

김광수* · 김상태*
(1991년 8월 30일 접수)

A Study on Fracture Characteristics of Woven Carbon Fiber Reinforced Composite Material

Kwang-Soo Kim and Sang-Tae Kim

Key Words : Woven Composite Material(직물 복합재료), Compliance(컴플라이언스) R-Curve(균열성장 저항곡선), Pop-In(팝-인현상), Critical Stress Intensity Factor(임계응력 확대계수), Crack Initiation Stress Intensity Factor(균열생성응력 확대계수), Effective Crack Length(유효균열길이)

Abstract

The fracture characteristics of recently developed woven carbon fiber reinforced composite material were studied experimentally on the basis of linear elastic fracture mechanics. Static tensile load was applied to each specimen which has different initial notch length and load-displacement data were acquired in personal computer through A/D converter. The crack detective compliance curve was determined from initial portion of load-displacement data and the increment of effective crack length(Δa_{eff}) was obtained from this compliance curve. The crack growth resistance curves (*R*-curve) for each specimen were determined by Δa_{eff} and crack growth resistance intensity(K_r). Each *R*-curve has shown almost constant shape and was independent of initial notch length. Fracture toughness of the composite material was obtained by *R*-curve. The pop-in phenomenon was occurred at about 70% of maximum tensile load and crack was initiated in the direction of 0° and 90° of applied loading direction simulataneously. Crack initiation spot was detected as a weak fiber/matrix interface or void in the matrix. Fractography study shows that most fracture energy of this composite material comes from the fiber failure energy.

1. 서 론

직물섬유강화 플라스틱은 최근에 와서 더욱 중요한 강화재료로 평가되어지고 있으며, 비록 한 방향으로 강화된 적층판 보다 구조적 효율이 다소 낮지

*정회원, 영남대학교 정밀기계공학과

만 직물섬유강화 플라스틱의 다양한 특성과 낮은 제조경비의 잇점으로 인해 각광을 받고 있으나 한 방향으로 섬유를 배열하여 적층한 복합재료 혹은 짧은 섬유를 불규칙하게 보강한 복합재료 등에 비해 직물형태의 섬유강화 복합재료에 대한 역학적 해석 혹은 실험이 미미한 실정이므로 보다 광범위한 사용을 위해 정략하고 다양한 해석이 요구된다.

복합재료의 파괴특성은 최근에 와서 많은 학자들에 의해 여러관점으로 연구되어 왔었다. 복잡하고도 불규칙한 이러한 복합재료의 올바른 사용을 위해 발생가능한 여러 가지의 파괴 기구를 이해해야 함이 우선 과제이며 상당한 연구가 이 분야에 집중되었지만 복합재료의 신뢰성 문제는 완전히 해결되지 않고 있다.

복합재료 혹은 단순재료의 강도는 미리 존재하고 있는 결함의 크기나 그러한 결함이 성장되는 데에 나타나는 재료의 저항에 의해 좌우 된다⁽¹⁻³⁾. 직물섬유강화 복합재료를 포함하는 대부분의 섬유강화 복합재료는 파괴를 일으키는 균열의 생성과 성장이 하나의 주된 균열로 이루어지지 않는다. 이의 주된 원인으로서는 재료가 하중을 받을 경우 강도, 강성 및 수명의 감소를 일으키는 손상(damage)의 복잡한 기구와 불규칙한 출현에 기인한다^(4,5). 손상의 전개에 관한 재래식 금속과 복합재료는 근본적으로 큰 차이를 나타내며, 복합재료에 있어서는 손상의 분산 개시, 느린성장파 축적 및 급격한 파단의 형태로 나타난다. 복합재료에서 이러한 손상의 특성으로 인한 파괴 메카니즘은 기지의 균열(matrix cracking), 섬유와 기지간의 분리(fiber/matrix debonding), 층간분리(delamination), 섬유의 파단(fiber failure) 등의 복잡한 형태로 나타난다.

이러한 섬유강화 복합재료의 재료특성에 관한 종래의 연구들은 적층판의 층간 응력을 통한 파괴강도 예측법⁽⁶⁾, 컴플라이언스곡선에서 얻은 특성길이를 통한 해석법⁽⁷⁻⁹⁾, R곡선법^(10,11), J적분법^(12,13) 등 몇가지 방법^(14,16)을 이용하여 나타내었으며, 이들 연구의 대부분은 기존의 선형탄성파괴역학의 개념과 관련지어 설명하고 있다. 또한 직물섬유강화 복합재료에 대해서는 이러한 재료의 거동 특성을 나타내기 위한 해석적 모델⁽¹⁷⁾ 혹은 피로강도에 대한 연구⁽¹⁸⁾가 행해졌으나 충분한 자료를 제공하지 못하고 있다.

본 연구에서는 최근에 개발된 직물 탄소섬유강화 복합재료의 파괴인성치를 정량적으로 결정하고 파괴거동을 조사하고자 한다.

본 연구의 목적은 이 재료에 선형탄성파괴역학의 적용여부를 알아보고, R곡선을 이용하여 균열의 생성점 및 불안정 파괴점의 파괴인성치를 정확히 구하며, 주사형 전자현미경을 통해 파단면 및 균열 성장시점을 관찰하여 파괴거동을 조사하는데 있다.

2. 실험

2.1 시험편 준비

사용된 재료는 (주)한국화이버에서 제작된 직물 탄소섬유강화 복합재료(woven carbon fiber reinforced composite material), HC3319/RS1222 이다.

시험편 재료의 제작은 DMS 2288사양(Type2, Class2, Grade B)의 제조공정으로 하여 [0/90] 형태로 탄소섬유가 보강된 두께 0.3mm의 프리프레그(prepreg) 6장을 겹쳐 오토클레브(autoclave)에서 약 2.75×10^5 Pa의 압력으로 127°C, 2시간동안 유지시켜 두께 1.1mm의 평판을 얻었다. 섬유강화 플라스틱과 같이 취성이 매우 큰 복합재료에서는 시험편을 절삭가공할때 원하지 않는 손상이 발생하는 것이 대부분이다. 본 연구에서는 이러한 손상을 최대한 억제하기 위해 다이아몬드 휠 커터(diamond wheel cutter)로 가공하였다. 또한 그림에 물려질 시험편 양쪽 부분에는 두께 1.4mm, 크기 31×48 mm의 탭(tap)을 오토클레브에서 가압 접착시켰다. 사용될 시험편에 양편측 노치(double edge notch)는 두께 0.4mm의 저속 다이아몬드 휠 커터로 가공하여 노치가공으로 인한 손상을 최소화 하였으며 노치첨단에 대한 부수적인 가공은 하지 않았다. 이때 시험편 폭에 대한 노치의 비(2a/W)는 0.2, 0.3, 0.4, 0.5이며, 노치첨단의 반경은 0.2 mm이다. 시험편의 제원은 폭 31 ± 0.5 mm, 게이지 길이 120mm이고 자세한 형상은 Fig. 1에 나타나

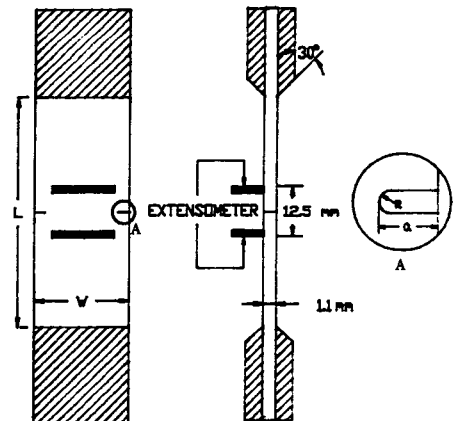


Fig. 1 Configuration of double edge notched specimen

Table 1 Chemical composition of woven carbon fiber reinforced composite material (HC3319/RS1222)

Wet Resin Content	39±2% (Wt.)
Volatile Content	1.0% (Wt.)
Fiber Weight/Area	193±8g/m ²
Resin Flow	15±5%

Table 2 Mechanical property of woven carbon fiber reinforced composite material

Ultimate Tensile Strength	1027 MPa
Tensile Modulus	6.13×10 ⁴ MPa
Ulti. Compressive Strength	730MPa
Poisson's Ratio	0.04
Elongation	1.0±0.2%

있으며, 재료의 성분 및 물성은 Table 1과 Table 2에 나타낸 바와 같다.

2.2 실험 방법

본 연구에 사용된 시험기는 인스트론사(Instron, Model No. 1332)의 유압식 만능시험기이다. 먼저 노치가 없는 시험편의 중앙지점에 로제트 스트레인 게이지(rosette strain gage)를 붙여서 탄성계수(elastic modulus) 및 포아송 비(poission ratio)를 구하였고 인장시험을 통해 최대인장강도를 알았다. 그 다음 서로 다른 네가지 노치길이를 가진 시험편에 대해 정적인 인장하중을 시험편 파단시까지 가하였으며 실험도중 시험편의 노치주변에 발생하는 변위량을 측정하기 위해 게이지길이(gage length) 12.5mm인 변위신장계(extensometer, Instron Model 2620-532)를 Fig. 1과 같이 부착하였다.

실험은 변위 제어모드(stroke control mode)로서 시험속도는 0.3mm/min로 하였다. 시험편은 유압그립(hydraulic grip)에 견고히 물렸으며 실험도중에 얻어지는 하중, 변위, 변형의 데이터는 A/D변환기를 통해 개인용컴퓨터에 10Hz의 속도로 받아들였다. 또한 X-Y 기록계를 통해서도 하중-변위 선도를 얻었으며, 각 조건에서 3-4번의 실험을 하였다. 실험도중 팝-인(pop-in) 현상으로 여겨지는

‘딱’하는 소리가 날때 실험을 중단하여 노치첨단 부위의 손상상태를 이동식 현미경으로 관찰하였고 시험편이 파단되고 난 후의 파단면 관찰은 시험편에 금이온 코팅(gold ion coating)을 한후 주사형 전자현미경(scanning electron microscope)으로 관찰하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 파괴 거동및 파괴 메카니즘

각기 다른 노치길이를 가진 시험편에 대해 인장하중을 가했을 때 나타내는 하중-변위 곡선은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. Fig. 2는 대표적인 하중-변위 곡선으로서 이때의 변위는 인장시험도중 나타나는

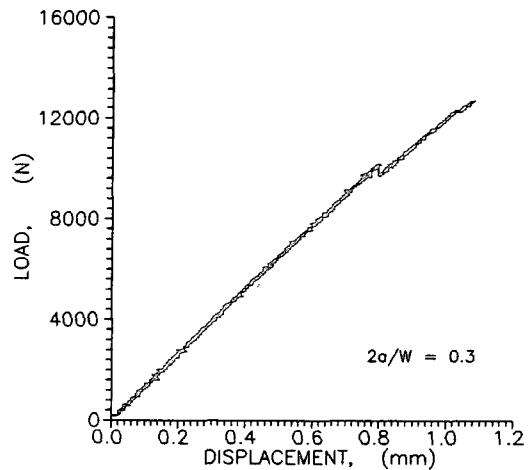


Fig. 2 Load vs. displacement curve

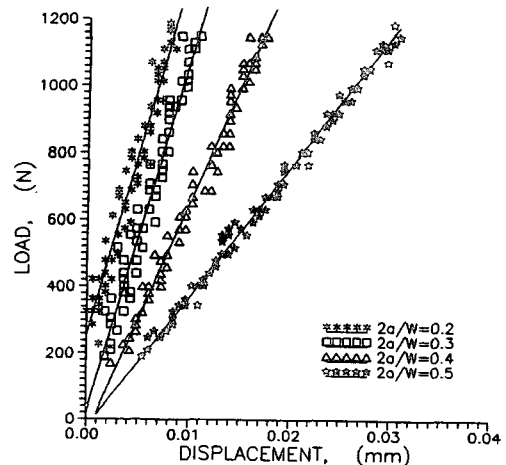


Fig. 3 Load vs. displ. (in gage length) curve

시험편 전체의 변위를 나타내며, Fig. 3는 변위신장계 게이지길이(extensometer gage length)내의 변위로서 전체 하중-변위 곡선중의 초기부분을 나타내고 있다. 각 조건에서 3~4번의 실험을 통해 거의 일정한 하중-변위 거동을 나타내었으며 각 조건에서 인장하중이 최대 인장하중의 약 70%를 지날무렵 ‘딱’하는 소리와 함께 팝-인 현상으로 보여지는 양상을 나타내었으며 Fig. 2에 보인 하중-변위 곡선상에 비선형 형태로 나타났다.

이러한 소리를 들은 직후 실험을 중지하여 시험편의 노치 첨단을 이동식현미경으로 관찰하여 균열의 생성 유무를 살펴보았다. Fig. 4는 최대하중의 약 70%부근에서 팝-인현상을 나타낸 직후의 노치첨단부근을 나타낸 사진으로 화살표로 표시한 바와 같이 몇개의 균열이 노치첨단으로부터 하중방향과 직각되게, 또한 노치첨단에서 어느정도 떨어진 지점에서 하중방향과 평행되게 성장되어 있다. 이러한 초기균열이 노치첨단에서 생성될 경우에는 노치가공으로 인해 취약해진 몇몇 지점에서 하중방향과 수직되게 보강된 섬유방향으로 섬유/기지의 계면분리를 일으키며 균열이 생성되고, 노치첨단에서 다소간 떨어진 곳에서 발생하는 하중방향과 평행한 방향으로 생성된 균열은 재료의 성형과정에서 발생하는 기공에서 초기균열이 보강된 섬유방향을 따라 생성되었다.

Fig. 5는 노치첨단에서 떨어진 지점의 기공부위에서 발생한 초기균열을 나타낸 것으로 Fig. 4에서 A지점의 균열을 고배율로 보이고 있다. 또한 Fig. 6은 Fig. 4에서 B지점의 노치첨단 부분의 균열을 고배율로 나타낸 것으로 섬유와 기지간의 계면분리를 일으키면서 균열이 생성된것을 보이고 있다.

전체적인 균열의 생성 및 성장거동을 관찰하기 위해 실험을 중지하지 않고 시험편이 파단될 때까지 관찰한 경우 앞에서 언급한 주변균열(sub-crack)과 더불어서 균열이 생성되는 단계를 지나 하중이 증가됨에 따라 균열은 결국 노치첨단에서 발생한 하나의 균열이 하중방향과 수직된 방향으로 보강된 섬유를 따라 주균열(main crack)로 성장되어 최종파괴에 이르렀다.

Fig. 7은 시험편의 파단면을 나타내며, Fig. 8은 파단면에서 나타난 섬유의 파단을 보이고 있다. 이와같은 파단면 관찰을 통해서도 노치첨단에서 생성된 주균열은 섬유/기지의 계면분리 현상을 나타내며 생성되어 성장한 것을 알 수 있었으며 섬유와

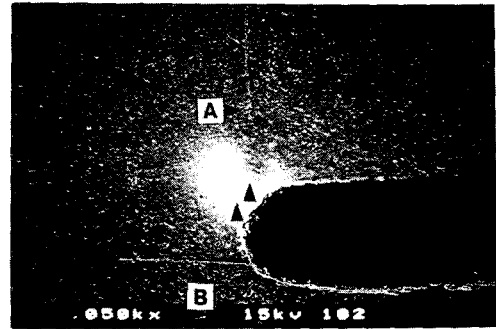


Fig. 4 The shape of crack initiation at notch tip and far from notch tip

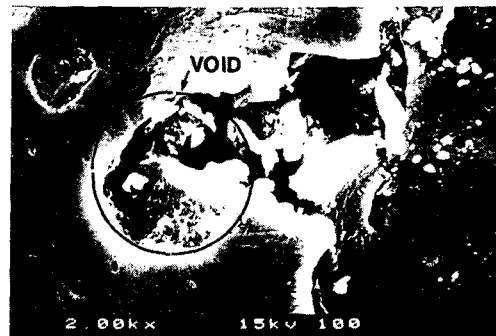


Fig. 5 The shape of crack initiation at void

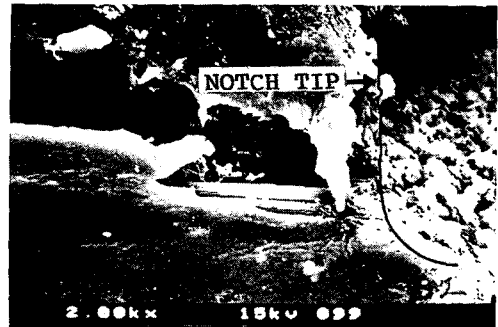


Fig. 6 The shape of crack initiation and crack growth at fiber/matrix interface from notch tip

기지간의 분리(fiber/matrix debonding), 기지의 균열(matrix cracking), 및 섬유의 파단(fiber-failure)과 같은 양상을 복합적으로 수반하면서 최종파괴에 이르렀다.

전체적인 파단면 양상을 볼 때 이러한 [0/90] 형태로 직물섬유가 보강된 복합재료에서의 파단면 형태는 한방향으로 섬유가 보강되어 적층시킨 복합재료의 파단면 형태와는 다른 양상을 나타내었다. 한

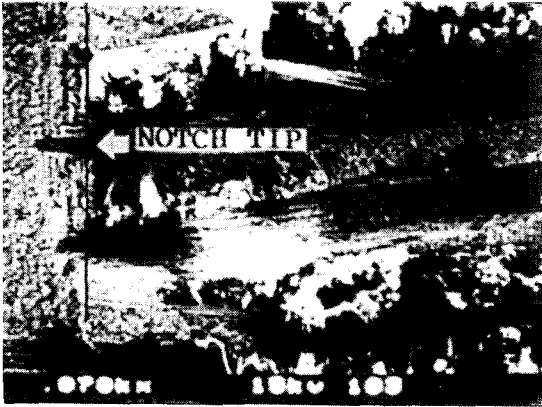


Fig. 7 The fractography of fracture surface(Load direction is normal to fracture surface)

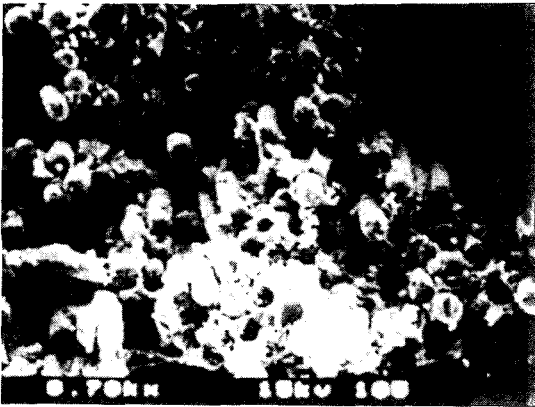


Fig. 8 The fractography of fiber bundle after fiber failure

방향으로 섬유가 보강된 복합재료의 경우 재료의 파단 형태는 파단면이 상당히 불규칙하며 기지로부터 섬유의 뽑힘(fiber pull-out)과 층간분리(delamination) 현상이 뚜렷이 나타나지만⁽¹⁹⁾, 본 연구에서 사용된 직물 형태로 섬유가 보강된 경우에는 하중방향에 수직된 방향으로 섬유/기지의 계면분리와 하중방향으로 섬유파단의 양상이 지배적으로 나타나 비교적 골고루 분포되었으며 층간 분리 및 섬유의 뽑힘 현상은 거의 나타나지 않았다.

섬유강화 복합재료에 어떠한 외력이 작용할 경우 그러한 외력으로 인해 섬유와 기지간의 접촉 혹은 층간 접촉에 손상이 일어나지 않고 전적으로 보강된 섬유에 의해 하중이 지탱되어지는 것이 가장 이상적인 것이다.

따라서 본 연구에서 사용한 직물탄소섬유강화 복

합재료에서 하중방향에 수직되게 보강된 섬유는 기지와 계면 접착강도가 재료의 강도에 어느 정도 기여를 하고 대부분의 외력이 하중방향으로 보강된 섬유에 전달되었다고 판단되므로 이러한 재료가 최종 파괴를 일으키기까지 소비되는 대부분의 에너지는 고강도 탄소섬유의 파괴를 일으키는 데 해당된다고 여겨진다.

복합재료의 파괴에 선형탄성파괴역학을 적용할 때 당면하는 가장 큰 문제는 복합재료의 경우 균열의 성장이 평면의 형태로 나타나지 않는다는 것이며⁽²⁰⁾ 본 연구에 사용된 직물탄소섬유강화 복합재료에서도 Fig. 5, Fig. 6와같이 불규칙하게 비평면의 형태로 균열이 생성되어 진전되었다.

섬유강화 복합재료에 하중이 가해질 경우 노치첨단 부근의 기지에 섬유방향으로 발생되는 다수의 미세한 주변균열(sub-crack)로 인해 응력이 완화되고 이들 주변균열을 손상영역으로 볼 때 복합재료에서도 등방성 재료의 소성영역과 같이 균열진전에 대한 저항을 증가시키는 역할을 하는 손상영역(damage zone)의 개념을 도입함으로써 LEFM을 적용시켜 볼 수 있을 것이다.^(20,21) 또한 노치첨단 주위를 에너지 밀집구역으로 가정하고 손상영역의 확장을 평면형태의 균열성장으로 이상화한 유효균열길이(effective crack length)의 개념을 이용하여 균열성장 저항곡선(R-curve)을 구함으로써 파괴인성을 평가할 수 있을 것이다.

3.2 균열 성장 저항곡선

각 조건에서의 하중-변위 곡선, Fig. 3에서부터 시험편의 초기 거동에 해당되는 부분 즉, 인장하중 686 N-1176N에 해당되는 부분의 데이터를 취하여 식(1)에서 각 시험편의 초기 컴플라이언스(compliance)를 얻었다.

$$C = \frac{\delta_{c,L}}{P} \quad (1)$$

여기서 C 는 컴플라이언스 $\delta_{c,L}$ 은 변위 신장계내의 변위량이며 P 는 $\delta_{c,L}$ 에 대응되는 하중이다.

시험편 폭에 대한 초기노치의 비가 0.2, 0.3, 0.4, 0.5일 경우에 해당되는 각 컴플라이언스값을 이용해 얻은 컴플라이언스곡선은 Fig. 9과 같으며, 이때 최소자승법을 이용한 2차 곡선의 방정식은 식(2)와 같고 각 조건이 나타내는 컴플라이언스값을 식(2)에 대입하여 유효 균열길이, a_{eff} 를 구하였다.

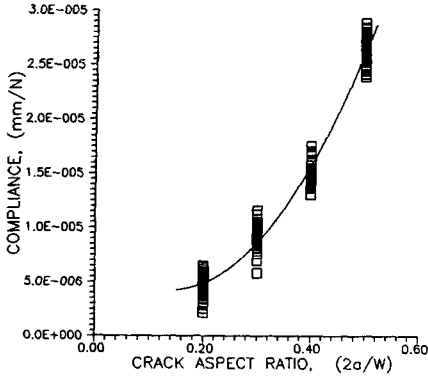


Fig. 9 Crack detection compliance curve

$$Y = Ax^2 + Bx + C \quad (2)$$

$$A = 1.65925 E-3$$

$$B = -4.63244 E-4$$

$$C = 7.4231 E-5$$

$$K_r = \frac{P}{W \cdot t} \sqrt{\pi a_{eff}} f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) \quad (3)$$

$$f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) = \left[1 + 0.122 \cos^4\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)\right] \sqrt{\frac{W}{\pi a_{eff}} \tan \frac{\pi a_{eff}}{W}} \quad (4)$$

이러한 방법으로 얻은 a_{eff} 의 값과 식 (3), (4)를 이용하여 균열성장에 대한 저항, K_r 을 계산하였고 그 다음 K_r 과 유효균열길이에서 초기노치 길이를 뺀 균열의 성장량 Δa 와의 관계곡선 즉, R 곡선을 그렸다.

식 (3), (4)에서 P 는 유효균열길이에 대응되는 하중이며 W 는 시험편의 폭이고 t 는 시험편의 두께이며 a_{eff} 는 유효균열길이이다.

Fig. 10은 균열의 성장량과 Δa 에 대한 저항, K_r 을 나타내는 균열성장저항곡선이다. 만약 균열성장저항곡선이 재료의 고유 특성을 나타낸다면 그 모양과 양상이 초기 노치의 길이에 관계없이 일정해야 할 것이다. Fig. 10에서 나타내는 각기 다른 초기노치 길이를 가진 직물탄소섬유강화 복합재료의 균열성장저항곡선은 거의 일정한 형태를 나타내고 있으며 이러한 R 곡선을 통한 해석법이 설계자료로 유용히 사용될 수 있을 것이다. 균열의 성장에 따라 균열진전의 저항력이 변하는 평면응력의 경우 파괴가 일어나기전 균열이 일정한 양의 안정성장(stable crack growth) 단계를 지나는 동안은 에너지 해방률(energy release rate)이 균열 진전 저항력과 같으며, 이때의 에너지 해방률, G 는 식(5)와

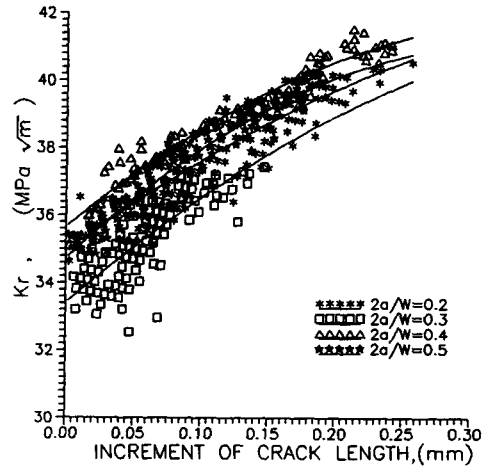


Fig. 10 Crack growth resistance curve

같이 표현되어진다.

$$G = \pi \sigma^2 a / E \quad (5)$$

균열이 성장하는 동안 σ 와 a 는 다같이 증가하게 되고 $G = K_r$ 이므로 균열성장에 대한 저항도 증가할 것이다. 따라서 이론적으로도 균열을 진전시키는 힘이 재료의 고유저항 값보다 크게되면 이때에 최종파괴가 일어나게 될 것이다. 따라서 이때는

$$\frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a}, \quad G = R \quad (6)$$

의 관계가 성립되며 식(6)은 평면응력(plane stress) 상태에서의 파괴에 대한 에너지 조건식이 될 것이다. 이와같이 R 곡선에 대한 해석적인 표현을 유도할 수 있으면 선형탄성파괴역학 조건에 의한 직물탄소섬유강화 복합재료의 파괴특성 평가는 가능하다.

균열의 안정된 진전의 시작은 G 의 어느값에서 일어날 것이며 최초의 균열진전은 '딱'하는 소리를 동반하므로 통상 팝-인(pop-in)이라 칭한다. 팝-인 이후에는 점차적으로 균열이 어느 정도 안정성장을 하여 불안정파괴(unstable crack growth)를 일으키는 K_c 지점을 지나 재료는 파단된다. 본 실험에서는 이와같이 섬유유 파단음으로 여겨지는 소리를 시험편의 최종파단까지 몇차례 더 들을 수 있었으며 처음으로 소리가 나는 때의 하중은 최대인장하중의 약 70%에 해당되었으며 또한 팝-인현상과 더불어서 균열의 생성이 발견되었다.

각 조건의 시험편에서 팝-인현상이 나타난 하중

Table 3 Summary of average pop-in load, maximum load and % of pop-in over maximum load for variant crack aspect ratio

Crack Aspect Ratio(2a/W)	Ave.Pop-In Load(N)	Maximum Load(N)	%of Pop-In/Max.
0.2	9751	13642	71%
0.3	8624	12700	67%
0.4	7252	9908	73%
0.5	6174	8741	70%

값과 최대인장하중의 평균값을 Table 3에 나타내었다. 이때의 팝-인하중은 실제로 R 곡선상에서 균열성장력곡선(crack driving force curve)을 통해 나타난 균열생성시의 하중값 보다 약 10% 범위내에서 작게 나타났으며, 이는 분산되어 나타나는 초기균열을 유효균열로 이상화 함에 따른 오차로 여겨지며 그 경향은 각 시험편을 통해 일치되었다.

또한 식(3), (4)를 사용하여 구한 균열성장력곡선으로 R 곡선상에서 나타낸 K_{ci} 값 즉, 균열생성 응력확대계수는 $33.6\text{MPa}\sqrt{m} \sim 35.5\text{MPa}\sqrt{m}$ 의 값을 가진다.

초기노치의 길이가 다른 재료에 있어서 파괴가 일어나는 G값은 각각 다를 것이며 이러한 사실은 평면응력에 대하여 임계에너지해방률(critical energy release rate), G_c 가 일정하지 않고, $K_c^2 = E \cdot G_c$ 의 관계가 있으므로 K_c 도 일정하지 않을 것이다. 평면변형의 경우에는 G_c 혹은 K_c 가 어느 범위 내에서 재료상수인데 반하여 평면응력의 경우에는 균열의 길이에 비례하여 변하게 된다.

Fig. 11~14는 각 조건의 시험편에 대한 균열성장력 곡선과 R 곡선을 나타낸다. 균열성장력곡선은 방정식(3), (4)에서 각각의 하중에 대해 계산하였으며 균열성장력곡선이 R 곡선에 대해 접선을 이루는 점, 이점을 불안정한 파괴가 일어나는 점 K_c 로 결정하였다. 네가지의 각 경우에서 K_c 값은 $41.3\text{MPa}\sqrt{m} \sim 42.7\text{MPa}\sqrt{m}$ 의 범위를 가지며 비교적 일정한 값을 나타내었다. Table 4에서는 K_c 및 K_{ci} 값들을 나타내며 K_c 를 결정하는 균열성장력곡선의 하중값이 Table 3의 실제 최대인장하중보다 다소 작는데 이는 K_c 를 결정함에 있어서 최대 균열성장저항값이 아닌 R 곡선에 대한 균열성장력곡선의 접점을 K_c 로 결정하였으므로 다소 낮게 나타

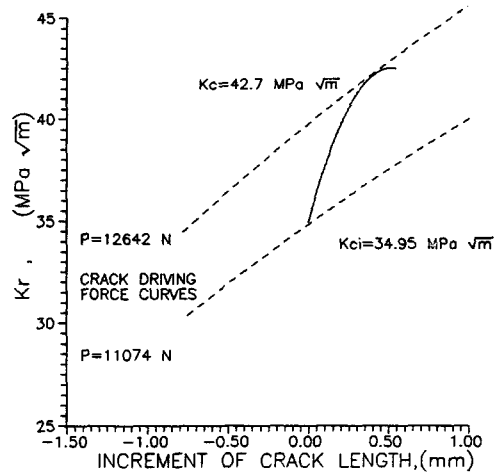


Fig. 11 Crack growth resistance curve (2a/W=0.2)

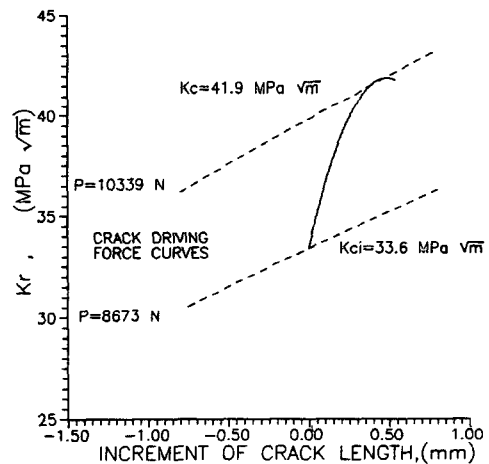


Fig. 12 Crack growth resistance curve (2a/W=0.3)

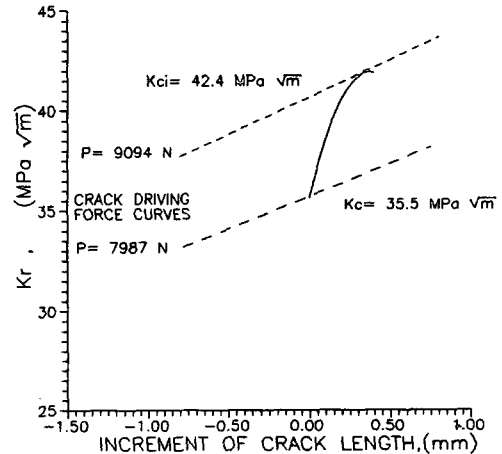


Fig. 13 Crack growth resistance curve (2a/W=0.4)

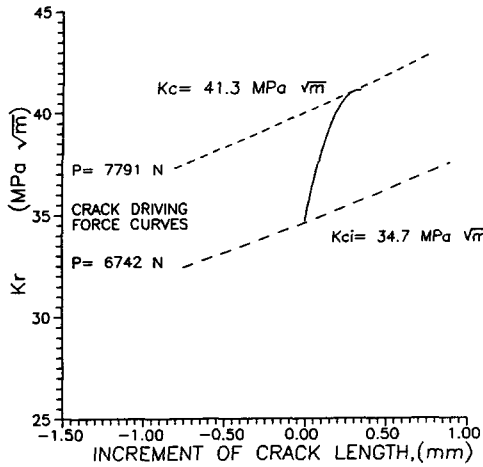


Fig. 14 Crack growth resistance curve(2a/W=0.5)

Table 4 Summary of K_{ci} (S.I.F. of crack initiation point), K_c (S.I.F. of instability point) and load of critical point by driving force curve

Crack Aspect Ratio(2a/W)	S.I.F.(MPa√m)		Load of Critical Point by Driving Force curve(N)
	K_{ci}	K_c	
0.2	34.95	42.70	12642
0.3	33.61	41.94	10339
0.4	35.54	42.46	9094
0.5	34.72	41.33	7791

나며, 이렇게 볼때 R곡선 방법은 직물탄소섬유강화 복합재료의 파괴인성치를 결정하는데 아주 유용한 방법으로 사용될 수 있으며 이렇게 얻어진 파괴인성치는 설계자료로 유용히 사용될 수 있을 것이다. 또한 R곡선을 알면 응력이 일정할 때 균열성장력곡선을 균열길이의 치수로 나타냄으로써 균열성장지점 또는 최종 파괴점의 균열길이를 유효균열길이로 이상화하여 빠른 시간내 성장한 균열성장특성을 살펴볼 수 있다.

4. 결 론

최근에 개발된 국내산 직물탄소섬유강화 복합재료의 파괴특성에 대해 조사하였다. 기존의 선형탄성파괴역학의 관점에서 R곡선 방법을 통해 파괴인

성치를 결정하고 주사형 전자현미경을 사용한 균열의 생성양상 및 파단면 관찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직물탄소섬유강화 복합재료의 파괴특성을 평가함에 있어서 기존 선형탄성파괴역학의 R곡선법은 유용한 해석법으로 사용할 수 있으며 초기 노치의 길이에 관계없이 R곡선은 일정한 모양을 가진다.

(2) 직물탄소섬유강화 복합재료가 인장하중을 받을 때 최대인장하중의 약 70%에서 팝-인 현상과 더불어서 균열이 생성되며 이때의 초기 균열은 주 균열 및 주변 균열로 분산되어 나타난다

(3) 본 연구에서 사용된 HC3319/RS1222 재료에서 R곡선으로 구한 K_c 는 $42.3 \pm 0.3 \text{ MPa}\sqrt{m}$, K_{ci} 는 $34.7 \pm 0.8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이고, 각 조건의 시험편을 통해 일정한 값을 가진다.

(4) 직물탄소섬유강화 복합재료에서 균열의 생성은 취약한 섬유/기지의 계면과 지지상에 존재하는 기공에서 보강된 섬유 방향으로 발생되어 섬유/기지의 분리 및 섬유의 파단을 일으키며 성장한다. 또한 재료의 파괴를 일으키는 대부분의 에너지는 섬유의 파단에너지에 해당된다.

후 기

본 연구는 1990년도 한국학술진흥재단 연구비 및 영남대학교 교비 연구비의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드리며, 시편제작에 협조해주신 (주)한국화이버 연구소 조정미 소장님, 김영수 과장님, 이경봉 계장님을 비롯한 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Hertzberg, R.W., 1976, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Cooper, G.A., 1976, "Micromechanics Aspects of Fracture and Toughness," Composite Materials, Wiley, NewYork, pp. 415~448.
- (3) King, J.E., 1989, "Fracture in Composite Materials," Metals and Materials, pp. 720~726.
- (4) Stinchomb, W.W. and Reifsnider, K.L., 1979, "Fatigue Damage Mechanisms in Composite

- Materials : A Review," Fatigue Mechanisms, ASTM STP 675, pp. 762~782.
- (5) Smith, T.R. and Owen, M.J., 1969, "Progressive Nature of Fatigue Damage in RP," *Morden Plastics*, pp. 128~133.
- (6) Pagano, N.J., 1971, "The Influence of Stacking Sequence on Laminates Strength," *J. Composite Materials*, Vol. 5, pp. 50~57.
- (7) Waddoups, M.E., Eisenmann, J.R. and Kaminiski, B.E., 1971, "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials," *J. Composite Materials*, Vol. 5, pp. 446~454.
- (8) Whitney, J.M. and Nuismer, R.J., 1974, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composite Materials, Vol. 8, pp. 253~265.
- (9) Yeown, Y.T., Morris, D.H. and Brinson, H.F., 1979. "The Fracture Behavior of Graphite/Epoxy Laminates," *Experimental Mechanics*, pp. 1~8.
- (10) Gaggar, S. and Broutman, L. J., 1975, "Crack Growth Resistance of Random Fiber Composites," *J. Composite Materials*, Vol. 9, pp. 216~227.
- (11) Morris, D.H. and Hahn, H.T., 1977, "Fracture Resistance Characterzation of Graphite/Epoxy Composites," ASTM STP 617, pp.5~17.
- (12) Wang, S.S., Chim, E.S. -M., Yu, T.P. and Goetz, D.P., 1983, "Fracture of Ramdom Short-Fiber SMC Composite," *J. Composite Materials*, Vol. 17, pp. 299~315.
- (13) 전의진, 조치룡, 유 희, 1991, "섬유강화 복합재료의 파괴인성 평가", 한국 복합재료학회 춘계 학술발표회 논문초록집, pp. 49~54.
- (14) Gaggar, S. and Broutman, L.J., 1977, "Fracture Toughness of Random Glass Fiber Epoxy Composites : An Experimental Investigation," *Flaw Grwoth and Fracture*, ASTM STP 631, pp. 310~330.
- (15) Gaggar, K. and Broutman, L.J., 1975, "Effect of Crack Damage on Fracture of Random Fiber Composite," *Mat. Sci. Eng. Vol. 21*, pp. 177~183.
- (16) Alexander, R.M., Schapery, R.A., Jerina, K.L. and Sanders, B.A., 1982, "Fracture Characterization of a Random Fiber Composite Material," *Short Fiber Reinforced Composite Materials*, ASTM STP 772, pp. 208~224.
- (17) Ishikawa, T. and Chou, T.W., 1982, "Stiffness and Strength Properties of Woven Composites," *ICCM-IV, Tokyo*, pp. 489~496.
- (18) Biner, S.B. and Yuhas, V.C., 1989, "Growth of Short Fatigue Cracks at Notches in Woven Fiber Glass Reinforced Polymeric Composites," *J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 111, pp. 363~367.
- (19) Ingvar, E. and Carl-Gustaf, A., 1990, "Strength of Tensile Loaded Graphite/Epoxy Laminates Containing Cracks, Open and Filled Holes," *J. of Composite Materials*, Vol. 24, pp. 456~482.
- (20) Wang, S.S., Mandell, J.F. and McGarry-F. J., 1975, "Three-Dimensional Solution for a Through-Thickness Crack with Crack Tip Damage in a Cross-Plied Laminate," *Fracture Mechanics of Composites*, ASTM STP 593, pp. 61~85.
- (21) 김광수, 김상태, 1989, "非規則性 短纖維 強化 SMC 複合材料의 疲勞龜裂 進展에 關한 研究," *대한기계학회논문집*, 제13권 제1호, pp. 85~95.
- (22) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., 1973, "The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corp., Hellertown, Pa., pp. 2.6~2.7.