

論文

음향방출법을 이용한 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)의 파괴인성평가

김상태* · 이유태** · 김광수***

Evaluation of Fracture Toughness for CFRP by using AE Method

S.T. Kim, Y.T. Lee and K.S. Kim

ABSTRACT

Fracture process of continuous fiber reinforced composites is very complex because various fracture mechanisms such as matrix cracking, debonding, delamination and fiber breaking occur simultaneously during crack growth. If fibers cause crack bridging during crack growth, the stable crack growth and the unstable crack growth appear in repeated pattern. By that reason, it is very difficult to determine the starting point of crack growth and the fracture toughness at the critical crack length in composites exactly.

In this study, fracture toughness test for CFRP was accomplished with acoustic emission(AE) and fracture process was recorded by video-microscope in real time. The starting point of crack growth, pop-in point and the point of unstable crack growth could be determined exactly by the above methods. Each fracture mechanism can be classified by the fracture process analysis through AE and video-microscope. The more reliable method for the toughness measurement of composite material is proposed with the combination of R-curve method, AE and video-microscope.

초 록

연속섬유강화 복합재료의 경우 보강섬유의 파괴, 모재의 파괴, 섬유와 모재의 분리, 층간파괴 등의 복합적인 파괴현상이 동반되고 특히 균열성장과 균열성장 정지가 균열가교현상 때문에 반복됨으로 안정성장과 불안정성장이 불규칙하게 반복되며 따라서 주균열 성장의 개시점과 불안정 파괴점에서의 파괴인성치를 정확하게 결정한다는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 CFRP에 대하여 파괴인성 실험과 병행하여 실시간으로 결함을 검출하는 새로운 방법인 AE해석법 및 마이크로 비디오 스코프를 이용하여 파괴과정을 수록하여 검토, 해석함으로써 손상의 정도와 파괴기구를 규명하였을 뿐만 아니라 주균열 성장의 개시점, 균열가교 역할을 하는 섬유다발의 파단점, 균열의 불안정 파괴 개시점을 찾아 이를 기초로 균열진전 저항곡선에 의한 파괴인성치를 평가해 봄으로써 신뢰성 있는 파괴인성 측정법을 제시하였다.

1. 서 론

금속재료에 대한 균열성장 저항곡선을 결정하기

위한 노력은 지금까지 많이 행해졌으나 복합재료의 경우에 대하여서는 단지 몇몇 연구자에 의해서 시도되었다. [1-4] Gaggar 등[5]은 선형탄성파괴역

* 영남대학교 기계공학과

** 예천전문대학 자동차과

*** 경북실업전문대학 기계설계과

학(LEFM)의 개념에 바탕을 둔 균열성장 저항곡선(crack growth resistance curve; R -curve)을 이용하여 복합재료의 파괴특성을 검토하고 복합재료에 대한 R 곡선방법의 적용 가능성을 제시하였다. Morris 등[6]은 손상영역의 확장을 이상화한 유효 균열길이의 개념을 이용하여 K_I 곡선을 구하였으며, 균열의 성장이 뚜렷이 식별되는 금속과는 달리 이러한 복합재료에서는 균열의 성장이 불규칙적이므로 이러한 K_I 곡선을 통한 평가가 타당하다고 하였다. Gaggar 등[7]은 불규칙 단섬유강화 복합재료의 파괴인성을 LEFM의 관점으로 조사한 결과 파괴에너지는 섬유/기지의 분리 및 섬유의 뒤틀림현상에 지배를 받는다고 하였다. 그들은 또 다른 연구[8]에서 불규칙 단섬유강화 복합재료의 파괴인성을 균열성장 저항곡선을 사용하여 구하였으며, 이러한 R 곡선법이 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

연속섬유강화 복합재료의 파괴인성의 경우 Morris[6]등이 평가한 바와 마찬가지로 기지재와 보강섬유가 각각 선형파괴 특성을 나타내는 재료라고 할지라도 실제로 복합체의 경우는 심한 비선형의 파괴양상을 나타낸다. 평직 복합재료의 실제 파괴거동을 조사하여 보면 보강섬유의 파괴, 모재의 파괴, 섬유와 모재의 분리, 층간파괴등의 복합적인 파괴현상이 동반되고 특히 균열성장시 균열가교현상이 발생된다면 모재의 균열은 성장과 정지가 반복된다. 특히 모재균열이 발생하여 안정성장한 뒤 균열이 지나간 부분의 균열면을 강화섬유가 균열가교현상을 일으키고 있다가 강화섬유다발에 응력이 집중되어 순간적으로 파괴가 일어나서 마치 불안정성장과 같은 현상이 나타난다. 또 주균열이 성장하다가도 또다른 강화섬유다발을 만나면 모재의 균열과 섬유/모재분리 혹은 층간박리에 의한 손상만이 증가하고 섬유다발은 다시 균열가교현상을 일으켜 마치 균열의 안정성장이 일어나는 거동이 반복된다. 따라서 복합재료에서의 균열은 아주 불규칙하게 안정성장과 불안정성장을 반복하기 때문에 주균열의 성장개시점이나 임계균열길이를 결정한다는 것은 쉬운 일이 아닐 뿐만 아니라 이 시점에서의 응력확대계수인 파괴인성치를 정확하게 결정한다는 매우 어려운 것이다.

실시간(實時間)으로 결함을 검출하는 새로운 방법인 AE해석법은 최근에 와서 몇몇 연구자에 의해 섬유강화 복합재료의 각요소별 파괴기구(섬유의

파단, 모재의 파단, 층간박리, 모재와 섬유간의 분리등)를 정확히 밝혀내는 데 적용이 시도되고 있다.[9-12]

본 연구에서는 파괴인성 실험과 병행하여 AE법 및 비디오 마이크로스코프를 이용하여 파괴과정을 실시간으로 수록하여 검토, 해석함으로써 손상의 정도와 파괴기구를 규명하고 이를 기초로 AE법의 검사 기준 확립을 시도하고 신뢰성 있는 파괴인성 측정법 개발을 시도해 보고자 한다.

2. 시편준비 및 실험방법

사용된 재료는 (주)한국 화이버에서 제작된 평직 탄소섬유강화 복합재료(plane woven carbon fiber reinforced composite material), HC3319/RS1222이다. 적층된 프리프레그는 탄소섬유가 0° 및 90° 로 배열된 평직의 형태로 보강되어 있으며 세로 방향의 섬유 즉, 경사(fill)방향으로 인장력을 가한 상태에서 성형되어 경사는 팽팽하며 가로방향의 섬유 즉, 위사(wrap)는 이완된 상태에서 성형되어 섬유의 배열이 구부러진다. 본 연구에서 사용된 시험편의 채취는 평직의 형태에서 경사방향으로 절단하였으며 길이는 $210 \pm 3\text{mm}$, 폭은 $31 \pm 0.5\text{mm}$, 두께는 3mm 로 가공하였다. 또 양편측 노치(double edge notch)는 두께 0.4mm 의 저속 다이아몬드 휠커터로 손상을 최소화 하여 시험편폭에 대한 노치의 비($2a/W$)를 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 가공하였다. 이 재료의 성분과 기계적인 특성은 Table 1과 Table 2에 각각 나타낸 바와 같다.

변환자 교정이 끝난 시험편은 실온 대기중에서 크로스헤드속도 0.1mm/min 으로 단축 인장하중을 가하였다. 이렇게 하중이 가해져 재료가 손상됨에 따라 발생되는 탄성파는 변환자로 검출되어 100kHz - 1.2MHz 의 밴드패스필터(bandpass filter)를 이용하고 있는 예비증폭기(gain : 40dB)를 통하여 추가증폭기(gain : 20dB)의 지원을 받는

Table 1. Chemical compositions of plain woven carbon fiber reinforced composite material (HC3319/RS1222)

| | |
|---|-------------|
| Wet Resin Content (% Wt) | 39 ± 2 |
| Volatile Content (% Wt) | 1.0 |
| Fiber weight/area (g/m^2) | 193 ± 8 |
| Resin Flow (%) | 15 ± 5 |

Table 2. Mechanical Properties of plain woven carbon fiber reinforced composite material (HC3319/RS1222)

| | |
|---------------------------|-----------|
| Ultimate tensile strength | 1027 Mpa |
| Notch strength | 506.2 Mpa |
| Young's modulus | 63.1 Mpa |
| Uti. compressive strength | 730 Mpa |
| Short beam strength | 73.3 Mpa |
| Poisson's ratio | 0.04 Mpa |
| Elongation | 1.0±0.2% |

PAC社製 Locan-320으로 수록, 해석을 행하였다.

이 시스템의 threshold값은 예비증폭기 입력한 산 100 μ V(40dB)이다. 이렇게 준비된 시험편에서 스트레인값을 얻기 위하여 시험편 중심에 게이지 길이(gauge length) 5mm인 共和전기회사제의 bridge type 스트레인게이지(strain gauge)를 부착하여 하중-변위곡선을 얻도록 하였다.

또 실험은 AE계측과 동시에 비디오 마이크로스코프를 통하여 시험편의 파괴과정을 수록하므로써 응력, 변형율, AE신호의 파라미터, 손상 파괴 과정을 실시간으로 비교, 분석할 수 있도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 하중-변위곡선 및 AE진폭분포 해석결과

Fig. 1은 시험폭(W)에 대한 노치길이(2a)의 비(2a/W)가 각각 0.2, 0.3, 0.4, 0.5인 시험편에 대하여 인장하중을 가하였을 때의 하중-변위곡선을 나타낸 그림이다. 선형 탄성구간에 있어서 하중-변위곡선의 기울기는 2a/W가 증가함에 따라 점차로 감소하게 되고 각각의 곡선에서 팽-인현상으로 보이는 불연속점들을 지나서 최대하중점에 도달하게 된다. 또한 재료는 팽-인현상으로 보이는 불연속점을 지나기 이전에 이미 미세한 비선형거동을 보이게 된다.

Fig. 2의 (a), (b), (c), (d)는 각각의 시험편에 대한 변위-하중곡선과 AE진폭분포 해석의 결과에 대한 그림이다. 2a/W에 관계없이 하중의 초기부분에서는 AE신호가 나타나지 않는 것으로 보아 시험기로부터 들어오는 잡음은 완전히 제거된 것으로 여

겨진다. 하중이 증가함에 따라 점차적으로 70dB이하의 저진폭 AE신호가 발생하기 시작하였다. 저진폭 신호의 발생빈도가 많아지고 중진폭 신호가 검출되기 시작함에 따라 하중-변위곡선은 서서히 비선형성을 보이기 시작하고 연이어 중진폭 신호와 고진폭 신호가 검출되기 시작한다. 특히 연속적인 고진폭 신호가 검출되는 영역과 하중-변위곡선의 팽-인이 일어나는 부분은 아주 정확히 일치하고 있다. 연속 고진폭 신호는 2a/W= 0.2, 0.3, 0.4, 0.5의 시험편에 대하여 각각 12,500 N, 10,000 N-10,500 N, 8,100 N-8,300 N, 7,100 N-7,400 N의 하중범위에서 연속적으로 검출되었고 하중-변위곡선에서 섬유다발의 파단 등에 의해 발생하는 "딱" 하는 소리와 함께 불연속점이 되는 팽-인점은 각각의 시험편에서 12,533 N, 10,000 N, 8,081 N, 7,126 N으로 나타났다.

李 등[13]의 CFRP재료, Tsuda[14]등의 Nicalon/Pyrex® 복합재료에 대한 파괴과정을 AE진폭분포해석한 결과에 따르면 저진폭, 중진폭, 고진폭의 신호가 각각 모재의 파괴, 계면분리, 섬유다발의 파단에 대응되는 것으로 밝혀졌다. 또 Takajima와 P. Bowen[15]은 SiC/Ti합금 복합재료에 대한 파괴과정을 고찰하여 본 결과, 40-70dB의 진폭을 가지는 신호는 모재균열과 모재/섬유의 계면박리에 대응하고 90dB이하의 진폭신호는 섬유파

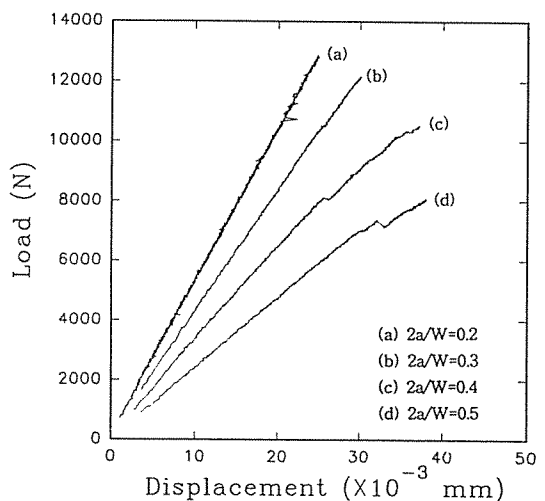


Fig. 1. Load-displacement curve for each specimen with the different notch ratio under Mode I loading.

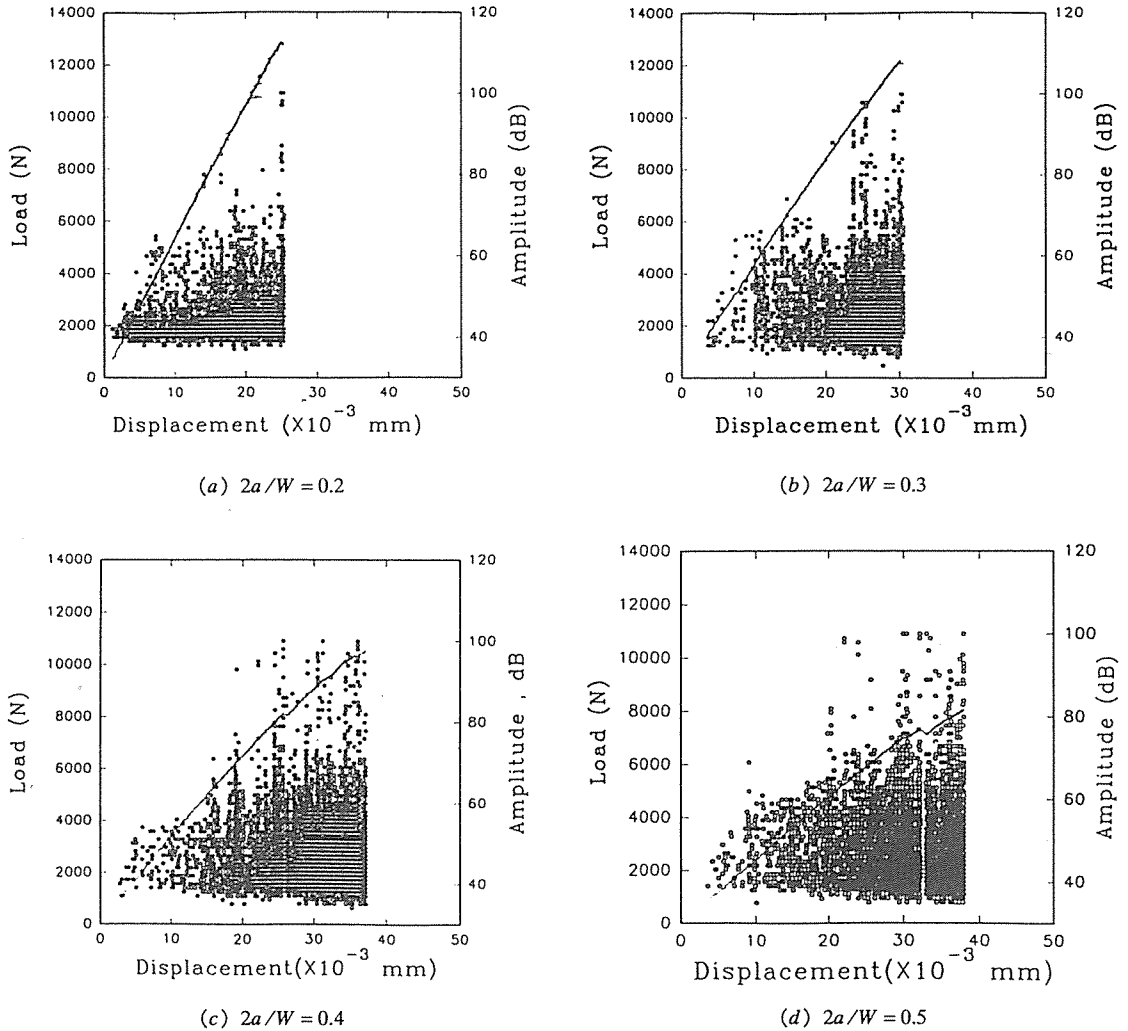


Fig. 2. Load-displacement curve and Amplitude distribution of AE signals for (a) $2a/W = 0.2$ (b) 0.3 (c) 0.4 (d) 0.5 during the test.

단에 명확히 일치되고 있음을 밝혔다.

이상의 결과를 기초로, 본 결과를 관찰하여 보면 아무런 결함도 발견되지 않는 구간을 거쳐 저진폭 신호의 발생빈도가 낮은 범위에서는 노치 선단의 시험편 내부에서 모재의 미세균열 발생에 의해 손상이 누적되나 스트레인 게이지의 감도로서는 측정이 불가능하다. 모재균열에 의한 손상이 누적되어 미세균열의 합체, 성장에 따라 저진폭 신호의 발생빈도가 높아짐과 동시에 70dB이상의 중진폭

신호가 검출되며 이때부터 하중-변위선도는 아주 미세하게 비선형 거동을 나타내기 시작하는 것으로 판단된다. 또 여러 연구자에 의해 섬유다발의 파단에 대응되는 것으로 알려진 90dB이상의 고진폭 신호가 발생한 지점에서 팝-인 현상이 나타나 좋은 일치를 보여 주고 있다.

따라서 섬유강화 복합재료의 경우는 일반적으로 섬유의 강도와 탄성율이 모재에 비하여 아주 높다는 사실을 기초로 하여 모재에서의 미세균열의 발

생에 의해 방출되는 에너지보다 섬유다발의 파단에 의하여 방출되는 에너지는 훨씬 클 것으로 추정할 수 있고 섬유다발의 파단시에 검출되는 AE에너지는 모재의 균열 발생시에 검출되는 AE에너지보다 크게 됨으로 섬유다발의 파단시에 발생하는 AE신호의 진폭이 모재의 파괴시에 발생하는 AE신호의 진폭보다 훨씬 크게 나타날 것이다.[16]

3-2. 파괴기구의 해석

전 절에서 예측한 결과를 확인하기 위하여 2a/W가 0.3인 시험편의 한가지 경우에 대해서만 대표적으로 자세히 다루어 보고자 한다.

Fig. 3은 하중-변위선도와 AE 발생율-변위선도이다. 이 구간에서는 변위가 증가함에도 불구하고 발생율은 거의 증가하지 않고 있다. 하중-변위선도에서도 비선형 거동은 전혀 나타나지 않았다. 더욱 엄밀히 말하자면 4,000 N-6,200 N의 범위에서 AE 신호의 발생율은 변위에 대해 거의 선형적으로 증가하고 있으며 역시 이 범위에서도 하중-변위곡선은 거의 선형적으로 거동하고 있다. 그러나 6,200 N이후에서 AE 신호의 발생율은 변위가 증가함에 따라서 급격하게 상승하여 신호 발생빈도는 아주 높아지며 이때부터 하중-변위곡선은 비선형 거동을 시작한다. Fig. 4에서 하중이 10,000 N에서부터 10,500 N사이에서 90 dB이상의 고진폭 신호가 연속적으로 검출되고 이 하중범위에서 하중-

변위곡선은 일반적으로 섬유파단의 시작으로 알려져 있는 팝-인현상을 나타낸다. 또 10,500 N에서 12,100 N에 이르기까지는 고진폭 AE신호가 발생되지 않은 상태로 저진폭 신호와 중진폭의 신호만이 검출되고 있다. 만약 고진폭 신호가 섬유파단에 대응한다면 모재균열과 모재/섬유 계면의 분리에 따른 현상만이 나타나게 될 것이다. 그후 12,100 N에 이르러서 다시 고진폭 신호가 검출되기 시작하면서 복합재료는 최종파단에 이르게 된다.

Fig. 4는 2a/w=0.3의 시험편에 대한 시간-하중곡선과 시간-AE 진폭분포에 대한 그림이다. Fig. 2(b)에서 나타난 특정점들의 발생시간을 알아내기 위한 것으로 4,000 N, 6,500 N, 10,000 N, 10,500 N 그리고 12,200 N의 하중점은 각각 200 sec, 300 sec, 480 sec, 500 sec 그리고 602 sec에 대응된다.

Fig. 5는 각각의 하중 특성점에 대응된 시간에서 video-microscope를 이용하여 녹화한 화면에서 발췌해 낸 사진이다. (a)는 시험 시작전의 사진으로써 노치선단부에서 어떠한 현상도 일어나지 않았다. (b)는 299 sec에서 시험편의 표면으로써 노치의 선단에 모재의 미소균열에 의해 손상된 부분이 희게 나타나 있다. (c)는 479 sec에서의 표면으로서, 모재균열이 합체되어 상당히 많이 진전되어 있으나 파단이 일어나지 않은 섬유의 균열가교 현상에 의하여 균열은 개구현상을 보이지 않고 있다. (d)는 500 sec에서의 노치선단 형상으로써 불과 20초 동

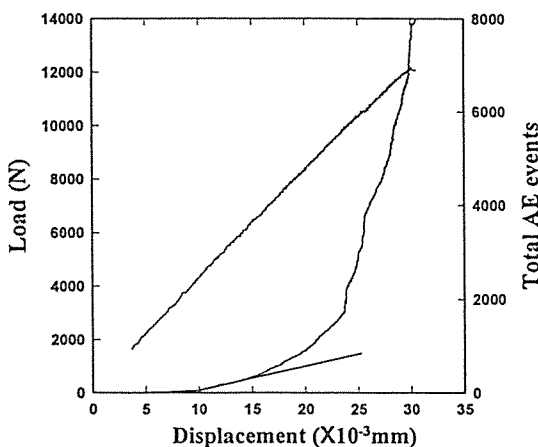


Fig. 3. Load-displacement curve and AE event curve for the specimen with the notch ratio of $2a/W = 0.3$.

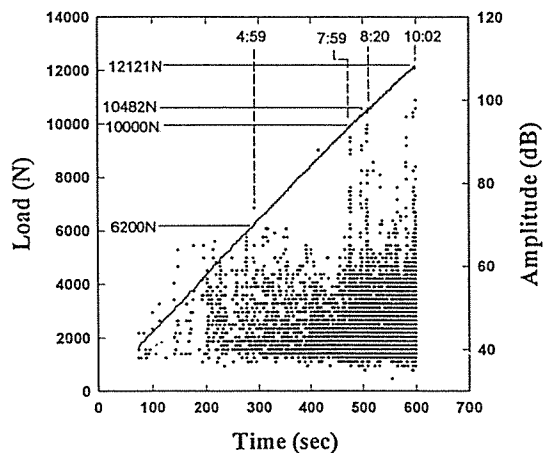


Fig. 4. Loading history and amplitude distribution of AE signals for characterizing the fracture process ($2a/W = 0.3$).

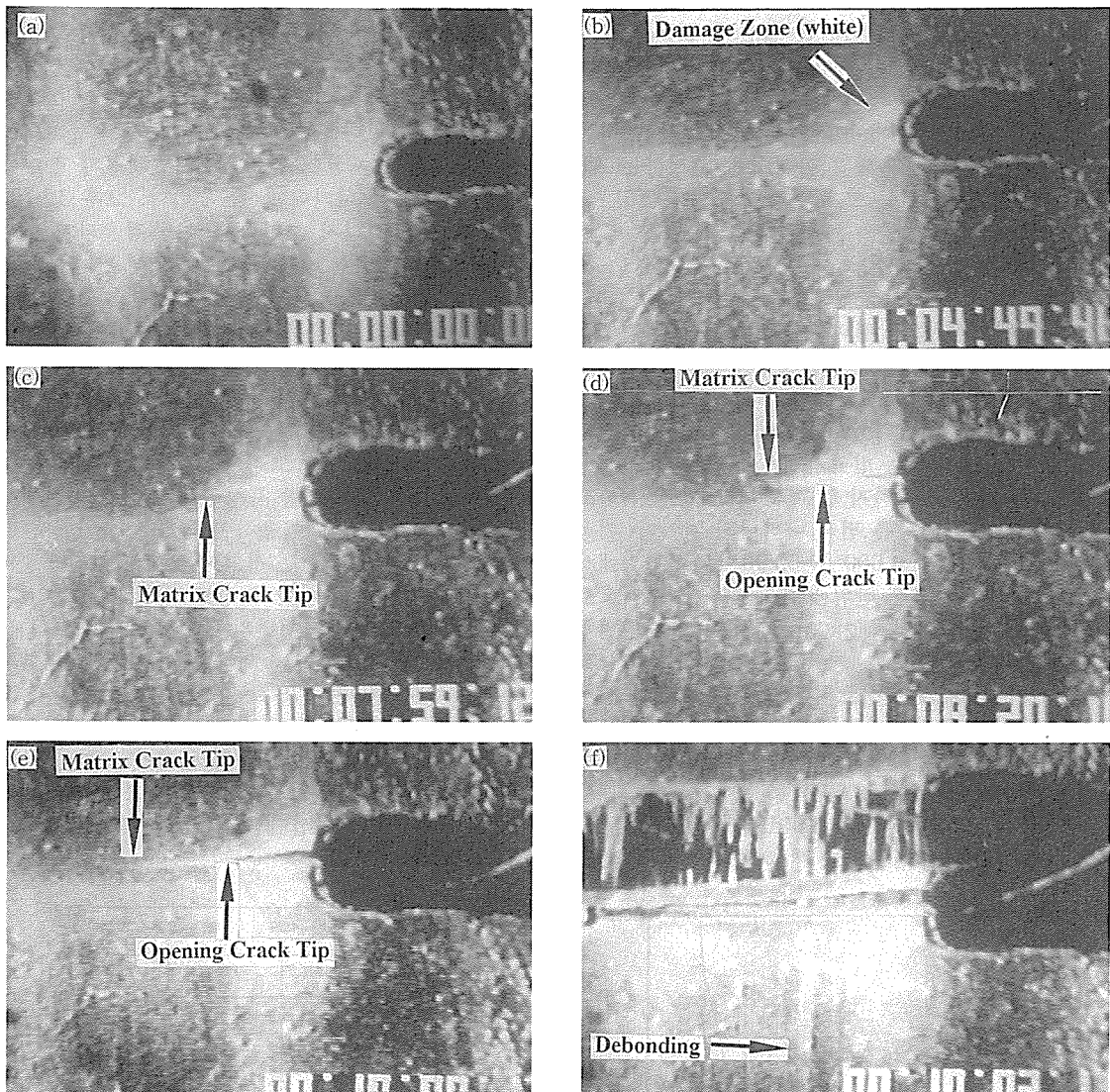


Fig. 5. Photographs of fracture process which was taken by using video microscope in real time (a) 0 sec (b) 299 sec (c) 479 sec (d) 500 sec (e) 600 sec (f) 602 sec. ($2a/W = 0.3$).

안에 갑작스러운 균열개구현상이 나타나는 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 모재균열의 균열가교 역할을 하던 섬유다발이 일순간 파단됨으로 마치 균열이 불안정 성장을 일으키는 것처럼 보인다. (e)에서는 500~600 sec의 시간 안에서 일어난 현상을 나타내고 있다. 여기서는 500sec까지 일어났던 섬유다발의 파단에 의해 개구현상을 일으켰던 주

균열의 선단이 만난 하중방향에 평행한 새로운 섬유다발이 균열가교 역할을 함으로써 균열성장에 저항으로 작용하여 하중방향에 수직인 횡방향 균열의 성장은 아주 작게 되고 종방향균열이 섬유를 따라 모재/섬유 계면에서 발생하게 되어 개구된 균열의 길이는 변하지 않고 개구량만 증가하게 된다. (f) 602sec에서의 사진으로 균열선단에 의해 균열

성장을 저지하고 있던 섬유다발에 응력이 집중되면서 섬유다발의 파단과 함께 균열의 불안정성장이 발생되어 불과 2초동안에 복합재료의 최종파단이 일어나게 된다. 따라서 본 결과는 AE 진폭분포의 해석과 완전히 일치하고 있으며 40~70 dB의 신호는 모재의 파괴 70~90 dB의 신호는 섬유/계면분리 혹은 층간박리에 90dB이상의 신호는 섬유다발의 파괴에 대응되는 것으로 보여진다.

3-3. 파괴기구와 균열진전 저항곡선

복합재료의 파괴에 선형탄성 파괴역학을 적용할 때 당면한 가장 큰 문제는 균열의 성장이 평면형태가 아닌 복잡한 형태로 나타난다는 것이다. 따라서 본 연구에서도 역시 균열은 여러 가지 파괴기구를 통하여 성장한 것으로 판단되므로 여러 가지 파괴기구에 의한 비평면형태의 복잡한 균열을 평면형태의 균열로 이상화한 유효균열길이의 개념을 도입하여 균열진전 저항곡선을 구함으로써 주균열 성장개시점과 파괴인성평가를 시도하였다.

각 시험편의 하중-변위곡선으로부터 짧은 선형 구간을 구분하고 이 부분에서의 컴플라이언스(compliance)를 구한다.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (1)$$

여기서 C는 컴플라이언스 δ 는 스트레인 게이지로부터 구한 변위량이고 P는 하중치이다.

Fig. 6은 2a/w가 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 일 경우에 해당되는 경우의 Compliance곡선이다. 이 때 구해진 컴플라이언스곡선의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\delta}{P} = A \left[\frac{2a}{w} \right]^2 + B \left[\frac{2a}{w} \right] + C \quad (2)$$

여기서 상수값은 A=1.756, B=-0.4859, C=0.2243으로 구하여진다.

이 방정식에 각 시험편에서 최종파단에 이르기까지의 각점에서 구한 세컨트(Secant) 컴플라이언스 값을 대입함으로써 양의 값을 갖는 2a/W를 찾고 여기에 W를 대입하여 구한 a를 유효균열길이(a_{eff})로 결정하였다. 이렇게 결정된 a_{eff} 와 그때의 하중값으로 다음의 식을 이용하여 K_I 값을 구하였다.

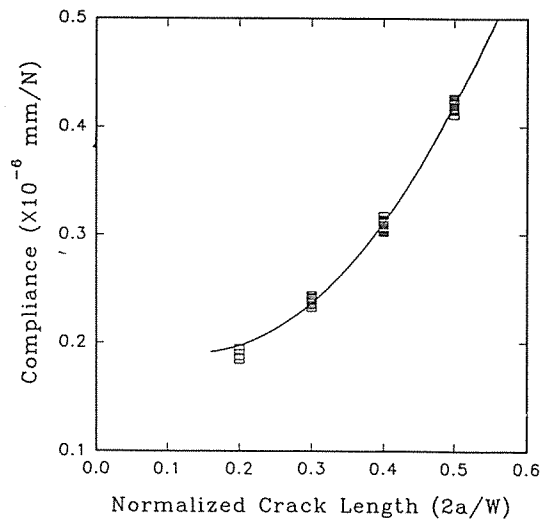


Fig. 6. Initial compliance of each 2a/W specimens obtained from the displacement measurement.

$$K_I = \frac{P}{Wt} \sqrt{\pi a_{eff}} f \left(\frac{a_{eff}}{W} \right) \quad (3)$$

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

여기서 P는 유효균열길이에 대응되는 하중 값이며 W는 시험편의 폭이고 t는 시험편의 두께이다. 일반적인 평면응력상태에서 균열의 성장에 따라 균열진전의 저항력이 변하며 파괴가 일어나기 전의 안정성장 단계를 지나는 동안은 에너지 해방율이 균열진전 저항력과 같으며 이때의 에너지 해방률은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (5)$$

균열이 성장하는 동안 σ 와 a의 값은 동시에 증가하게 되고 $\delta = K_I$ 이므로 균열성장에 대한 저항도 증가하게 될 것이다. 따라서 균열을 진전시키는 힘이 재료의 고유저항보다 크게 되면 재료의 최종파괴

가 발생하게 된다.

Fig. 7은 결정된 K_{Ic} 값과 유효균열길이의 증분 (Δa_{eff}) 사이의 관계, 즉 R곡선을 나타낸 그림으로써 10개의 데이터당 1개씩 샘플링하여 나타내었다. 만약 균열진전 저항곡선이 재료의 고유한 특성

을 나타낸다면 곡선의 양상은 초기노치의 길이에 관계없이 일정하게 나타나야 할 것이다. Fig. 8의 (a), (b), (c), (d)는 각각 $2a/W=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 인 시험편에 대한 균열진전 저항곡선이다. 초기노치의 길이에 관계없이 거의 일정한 양상을 보여줌으

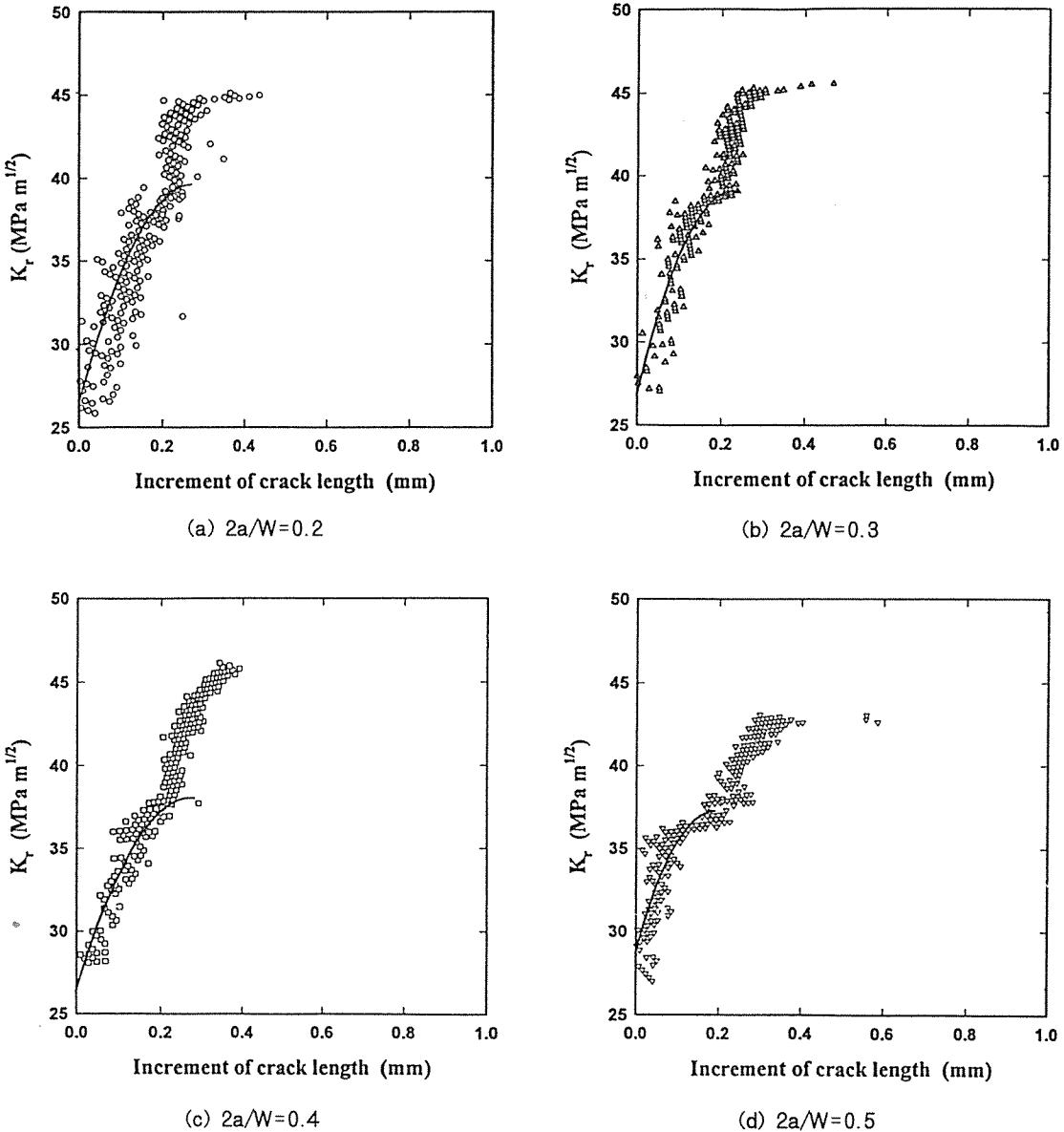


Fig. 7. Crack growth resistance curves for each $2a/W$ values.

로써 R곡선을 통한 복합재료의 파괴특성평가가 가능함을 보여주고 있다. 각 파괴기구에 대한 균열진전 저항곡선의 특성을 이해하기 위하여 대표적으로 (b)의 $2a/W = 0.3$ 인 경우를 상세히 고찰하여 보면 고밀도의 저진폭 AE신호와 중진폭 AE신호가 검출되기 시작하고 하중-변위곡선이 비선형 구간을 보이기 시작한 6,200 N으로부터 조금 더 지난 7,300 N에서부터 R곡선은 균열길이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 노치 주변의 손상영역에서 발생하는 모재의 미소균열과 계면과 층간에서 미소균열이 발생하고 이러한 미소균열이 합체되기 시작하여도 보강섬유에 의한 균열가교현상 때문에 변위의 증분이 크지 않으므로 스트레인게이지에서는 이 미소 변위 증분을 검출하기 어렵다. 따라서 컴플라이언스에 의해 계산된 유효균열의 진전은 모재균열 합체의 시발점보다 조금 늦게 나타날 것이다. 그 후 균열진전 저항의 증가율이 급속히 감소하였다가 재차 상승하는 형태를 보여 이 부분에서 한 번의 불안정 균열성장이 이루어지는 것처럼 보인다. 따라서 이 부분에서 K_{Ic} 값과 유효균열길이를 계산하여 그때의 하중값을 역추적한 결과, 10200N에서 10500N사이에서 일어난 현상으로 판명되었다. 이 하중범위에서 AE신호 특성은 고진폭과 중진폭이 집중적으로 검출되어 섬유다발의 파괴시점을 나타내었고 하중-변위곡선은 팝-인현상을 보였으며 비디오 마이크로스코프에 의하여 녹화된 파괴과정을 살펴본 결과, 진전되어진 모재 균열에 저항으로 작용하고 있던 균열가교 섬유다발이 급속하게 파단되면서 균열의 개구현상이 아주 짧은 시간에 형성되었다. 이 하중범위를 지나면 다른 섬유다발의 저항에 의해 균열진전은 멈추게 된다. R곡선에서는 10,500 N 이후 유효균열이 아주 느리게 안정성장을 시작하면서 균열진전 저항이 다시 증가하는 것으로 나타나고 있는데 AE신호 분석에서도 섬유/모재분리 혹은 층간박리를 의미하는 중진폭 신호와 모재균열을 의미하는 저진폭 신호만이 검출되었고 비디오 마이크로스코프에 의하여 녹화된 파괴과정의 분석에서도 균열길이의 변화는 아주 작았고 개구량만 증가하는 것을 현상을 보였다. 이 결과를 종합하여 볼 때 균열 선단부의 또다른 섬유다발들이 가교역할을 하여 균열진전에 대해 저항하여 균열은 횡방향으로 계속 성장하지 못하고 계면이나 층간을 따라 종방향으로 성장할 것으로 사료된다. 그 후 하중이 최종파단 하

중의 99.5%인 12,100 N에서 R곡선의 기울기는 감소하면서 K_{Ic} 값은 더 이상 증가하지 않고 일정하게 되고 아주 짧은 시간 후에 불안정파괴에 이르게 된다. 이 구간에서도 AE신호 분석에서는 섬유의 파단을 의미하는 고진폭 신호가 집중적으로 발생한 후 최종파단으로 이어졌고 비디오 마이크로스코프의 관찰에서도 12,100N에서 균열의 급격한 성장을 시작하여 2초후 불안정파단으로 이어졌다.

연속섬유강화 복합재료의 경우 모재의 균열성장, 섬유/모재분리, 층간박리, 섬유다발 파단의 기구들이 연속 반복적으로 발생함에 따라 균열이 안정성장과 불안정성장을 반복하게 된다. 그러므로 복합재료는 하나의 균열이 발생하여 안정성장을 한 후 연이어 불안정성장으로 이어지는 금속재료와는 근본적으로 다른 파괴과정을 보인다. 이전의 연구자들은 금속재료의 균열성장개념을 파괴기구의 고찰없이 복합재료에 적용함에 따라 하중-변위곡선의 불연속점이나 "딱"하는 소리로 판단한 팝-인점을 균열성장개시점으로 평가하였을 뿐만 아니라 이렇게 발생한 균열이 금속에서와 마찬가지로 안정성장을 거쳐 불안정파괴로 이어진다고 평가하였다. 그러나 실제의 복합재료에서는 팝-인점 이전에 모재, 층간 그리고 모재/섬유의 계면에서의 손상 누적과 균열의 발생 등에 하중-변위곡선은 비선형 거동을 보일 뿐만 아니라 균열은 이미 안정성장을 보이게 되는 것이다.

다음 Table 3은 $2a/W = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 의 각 시험편에 대한 AE신호 분석과 하중-변위곡선에 의해서 평가된 균열성장개시점, 팝-인점 그리고 최대 하중점에서의 하중값을 보여주고 있다.

모재균열의 성장개시점은 초기노치 길이에 관계없이 최대하중에 대해 $55 \pm 5\%$ 의 범위에서 일어난다. 그리고 팝-인현상은 $2a/W=0.2$ 인 경우 초기노

Table 3. Summary of crack initiation load, pop-in load and maximum load determined by AE signal analysis for the specimens with different initial notch length

| P 2a/W | P _{AE} (N) | P _{AE} / P _{max} (%) | P _{POP} (N) | P _{POP} / P _{max} (%) | P _{max} (N) |
|-----------|------------------------|--|-------------------------|---|-------------------------|
| 0.2 | 7507 | 58 | 12533 | 97 | 12903 |
| 0.3 | 6200 | 51 | 10000 | 82 | 12180 |
| 0.4 | 5270 | 50 | 7847 | 74 | 10540 |
| 0.5 | 4684 | 57 | 7027 | 86 | 8104 |

치가 없는 시험편과 같이 거의 최대하중 근처에서 일어났고 나머지 시험편에서는 최대하중의 80±6%의 범위에서 발생하였다.

Table 4에서는 R곡선을 통하여 평가된 균열성장개시점에서의 균열성장 저항값(K_{mi}), 1차 불안정성장 개시점에서의 균열성장 저항값(K_{ci}), 그리고 2차 불안정성장 개시점, 즉 임계균열에서의 파괴인성치(K_{C})를 나타내고 있으며 이론적으로 균열을 진전시키는 힘이 재료의 고유저항값보다 크게 되면 이때 불안정파괴가 일어나게 된다. 따라서 다음의 식이 성립하게 되고

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

δ 의 곡선과 균열성장 저항곡선의 접점으로부터 역으로 추적하여 계산되어진 하중값을 나타내고 있다. K_{mi} , K_{ci} , 그리고 파괴인성치(K_{C})의 값들은 각각 26.5-29 $MPa\sqrt{m}$, 37-39.1 $MPa\sqrt{m}$, 43-45.9 $MPa\sqrt{m}$ 의 범위로 거의 일정하게 평가되었다. 균열성장 개시하중과 팝-인 하중들은 최대하중과의 비율로 나타내었을 때 R곡선으로부터 평가된 경우가 AE신호에 의해 평가된 경우보다 약 8%와 2% 정도 높게 나타나 좋은 일치를 보여주고 있다. 이와 같이 약간의 오차를 보이는 이유는 스트레인게이지의 경우는 내부에서 일어나는 균열의 성장거동에 대해 민감하게 반응할 수 없으나 AE의 경우는 이러한 신호를 검출할 수 있기 때문이다. 또 파괴인성치로 판단된 임계하중이 최대하중값에 비해 평균 1.7%작게 나타나 최대하중값으로 파괴인성치를 결정할 경우 작은 오차가 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

폭에 대한 노치길이의 비를 달리한 평직 탄소섬유강화 플라스틱 복합재료의 파괴인성실험을 행하고 그때 발생한 AE신호의 결과와 비디오 마이크로스코프를 통한 실시간 파괴거동을 해석하여 파괴기구를 고려한 R곡선거동의 고찰을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 발생빈도가 낮은 70dB이하의 저진폭 AE신호가 검출되는 초기 영역은 노치선단의 시험편 내부에서 모재의 미세균열 발생에 대응되고 발생빈도가 높은 저진폭의 AE신호와 70dB이상의 중진폭 AE신호가 검출되는 영역은 모재, 섬유/모재사이의 계면 및 층간에서의 미세균열의 합체에 의한 모재균열 성장에 대응되며 90dB이상의 고진폭 신호가 발생한 지점은 섬유다발의 파단에 대응된다.

(2) 본 연구에서 사용된 복합재료의 파괴과정은 모재, 층간 그리고 모재와 섬유 사이의 계면에서의 미세균열의 합체 등에 의한 안정성장 구간, 팝-인으로 표현되는 섬유다발의 파단에 의한 균열의 불안정성장구간, 또다른 섬유의 균열가교현상에 의하여 균열성장 저항이 재차 상승하는 안정성장 구간 그리고 임계균열에 의한 불안정파괴등이 반복되는 것으로 평가되었다.

(3) 평직탄소섬유강화 플라스틱복합재료에서 균열성장개시점의 응력확대계수, 팝-인점에서의 응력확대계수, 파괴인성치의 평균이 각각 27.2 $MPa\sqrt{m}$, 38.4 $MPa\sqrt{m}$, 45.0 $MPa\sqrt{m}$ 로 평가되었고 오차는 5% 이내로 되어 초기노치와는 무관하게 거의 일정한 값으로 나타났다.

(4) 평직탄소섬유강화 플라스틱 복합재료의 경우 R곡선만을 기초로 하여 팝-인점을 균열성장개시점으로 간주하여 평가한 응력확대계수는 38.4 $MPa\sqrt{m}$ 가 되며 이 값은 팝-인점 이전의 미세균열의 발생에 의한 손상의 누적이라든가 미세균열의

Table 4. K_{mi} (S.I.F. of crack initiation point), K_{ci} (S.I.F. of 1st unstable crack growth point), K_C (Fracture toughness) and loads of each point determined by crack resistance curve

| K 2a/W | K_{mi} ($MPa\sqrt{m}$) | P_{mi} (N) | $\frac{P_{mi}}{P_{max}}$ (%) | K_{ci} ($MPa\sqrt{m}$) | P_{ci} (N) | $\frac{P_{ci}}{P_{max}}$ (%) | K_C ($MPa\sqrt{m}$) | P_C (N) | $\frac{P_C}{P_{max}}$ (%) |
|-----------|-------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|------------------------------|
| 0.2 | 26.52 | 8386 | 64 | 39.1 | 12533 | 97 | 45.42 | 12884 | 99.8 |
| 0.3 | 26.94 | 7320 | 60 | 39.03 | 10153 | 86 | 45.71 | 12121 | 99.5 |
| 0.4 | 26.47 | 6148 | 58 | 38.01 | 8081 | 76 | 45.96 | 9962 | 94.5 |
| 0.5 | 28.89 | 5246 | 64 | 37.27 | 7167 | 88 | 43.08 | 8057 | 99.4 |

합체에 의한 모재균열 성장 등을 고려하지 않게 되므로 AE법과 비디오 마이크로스코프등으로 규명한 파괴기구를 기초로 하여 평가한 균열성장개시점의 응력확대계수, $27.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 보다 30%이상 과대평가될 수 있다.

후 기

본 논문은 1996년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Srawley, J.E., "Plane Strain Fracture Toughness", Fracture M. Liebowitz, Ed., Academic Press, 1969, pp.45-69.
- (2) Owen, M.J., Bishop, P.T., "Crack-Growth Relationships for Glass Reinforced Plastics and their Application to Design", J. Phys. D: Appl. Phys. V7, 1974, pp.1214-1224.
- (3) Harris, C.F. and Morris, D.H., "Effect of Laminate Thickness and Specimen Configuration on the Fracture of Laminated Composites", ASTM STP 631, 1986, pp.310-330.
- (4) 김광수, 김상태, "직물 탄소섬유강화 복합재료의 파괴특성에 관한연구", 대한기계학회논문집, 제16권, 제3호, 1992, pp.497-505.
- (5) Gaggar, S., and Broutman, L.J., "Crack Growth Resistance of Random Fiber Composites", J. Composite Materials, Vol.9, 1975, pp. 216-227.
- (6) Morris, D.H., and Hahn, H.T., "Fracture Resistance Characterization of Graphite/Epoxy Composites", ASTM STP 617, 1977, pp.5-17.
- (7) Gaggar, S., Broutman, L.J., "Fracture Toughness of Random Glass Fiber Epoxy Composites : An Experimental Investigation", Flaw Growth and Fracture, ASTM STP 631, 1977, pp.310-330.
- (8) Gaggar, S., and Broutman, L.J., "Effect of Crack Tip Damage on Fracture of Random Fiber Composite", Mat. Sci. Eng.21, 1975, pp.177-183.
- (9) Enoki, M., Kishi, T., "Theory and Analysis of deformation Moment Tensor due to Microcracking", International Journal of Fracture 38, 1988, pp.295-310.
- (10) 이유태, 김상태, 이택순, 외 2명, "AE에 의한 SiC/SiC세라믹 복합재료의 파괴기구평가", 대한기계학회논문집 제 19권 제 10호, 1995, pp.2421-2430.
- (11) 志波 光晴, 夏學, 岸 輝雄, "GFRP의 負荷-保持, 負荷-除荷의 AE特性", 日本複合材料學會誌, 14, 2, 1988, pp.63-72.
- (12) Pluvinaige, P., Quenisset, J.A., "Numerical Simulation of the tensile Behavior of 2D-SiC/SiC Cross-Ply Laminates, Journal of Composite Materials, Vol. 27, No. 2, 1993, pp.152-194.
- (13) 이유태, 김상태, 이택순, 외 2명, "탄소섬유 강화 복합재료의 반복하중에 의한 손상과 파괴에서의 AE특성", 한국복합재료학회지, 제 8권, 제 2호, 1995, pp.40-51.
- (14) 津田 浩, 岸 輝雄, "AEによる Nicalon/PYREX 複合材料の破壊過程の評價", 1993 National Conference on Acoustic Emission, 社團法人 日本非破壊検査協會, 1993, pp.169-174.
- (15) 高島 和希, Bowen, P., "SiC/Ti合金複合材料の破壊および疲勞に伴う AE解析", 1993 National Conference on Acoustic Emission, 社團法人 日本非破壊検査協會, 1993, pp.211-214.
- (16) 夏學, 岸 輝雄, 木原 淳二, "微小變形による モーメントテンソルの理論的解析法とその微視割れへの適用" 日本金屬學會誌, 52, No.4, 1988., pp. 405-413.