

복합적층판의 층간파괴에 미치는 충격하중속도의 효과

최 낙 삼* · Kinloch, A.J.**

(1998년 7월 10일 접수)

Effects of Impact Loading Rate on the Delamination Behavior of Composite Laminates

Nak-Sam Choi and Anthony Kinloch

Key Words : Impact Test Under Low and High Rates(저속 및 고속충격시험), Multidirectional Laminates(다방향 적층판), Mode I Delamination(모드 I 층간파괴), Modified Beam Analysis(수정된 보해석), Fracture Energy(파괴에너지), Crack Velocity(균열속도), Crack Jumping(균열전이)

Abstract

The delamination behavior of multidirectional carbon-fiber/epoxy composite laminates under low, intermediate and high rates of test, up to rate of about 11.4m/s has been investigated using the double cantilever beam specimens. The mode I loading under rates above 1.0m/s showed considerable dynamic effects on the load-time curves and thus higher values of the average crack velocity than that expected from a simple proportional relationship with the test rate. The modified beam analysis utilizing only the opening displacement and crack length exhibited an effective means for evaluating the dynamic fracture energy G_{IC} . Based on the assumption of constant flexural modulus, values of G_{IC} at the crack initiation and arrest were decreased with an increase of the test rate up to 5.7m/s, but the maximum G_{IC} was increased at 11.4m/s.

1. 서론

복합재료가 기계, 선박, 항공우주선, 스포츠용품의 구조물에 적용되어 기기의 고속화, 경량화에 기여하게 됨에 따라 고속하중 하의 복합재료 판의 변형 및 파괴거동이 연구관심사로 부각되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 복합적층판(composite laminate)의 경우에는 층간분리(delamination)를 개선하기 위한 노력의 하나로, 중·고속 하중에서의 층간파괴에너지를 정확하고 정량적으로 해석평가 하고자 하는 연구는 특히 중요하다고 볼 수 있다.

저속의 정적하중하에서의 적층판의 층간파괴에

너지평가를 위해서는 주로 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics)을 기초로 한 임계변형에너지방출률(critical strain energy release rate) G_c 를 구하고 있다. 섬유강화 복합적층판의 경우에 층간파괴는 여러 가지 모드의 파괴형태로 나타나는데 이중에서 모드 I(열림형)의 층간파괴 에너지값이 다른 모드보다 훨씬 작으므로 모드 I의 층간파괴시험연구가 많이 행해지고 있다.^(7,8)

중·고속 충격하중하에서의 적층판의 층간파괴에너지 평가에 관한 연구는 그다지 많지 않지만 보고된 결과도 서로 상반되기도 한다. Smiley와 Pipes⁽¹⁾는 하중속도가 4.2×10^{-6} m/s에서 0.67m/s로 증가함에 따라 일방향 탄소섬유(CF)강화 고분자수지의 G_{IC} 값이 저속시보다 약 25%수준으로 크게 감소했으며 수지가 열경화성 에폭시(EP)나 열가소성 폴리에틸에틸케톤(PEEK)일 때 연성/취성 천이영역이 존재한다고 했다. 그러나 Beguelin 등⁽²⁾의 결과에 따르면 위와 비슷한 고속하중에서

* 회원, 한양대학교 기계공학과

** Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, U.K.

G_{IC} 가 약 80%수준으로 되어 약간의 감소만이 보였다. 반면에 Aliyu와 Daniel⁽³⁾은 CF/EP의 G_{IC} 값이 시험속도의 증가에 따라 오히려 증가했다고 보고했다. 최근 Blackman 등⁽⁴⁾이 고속도카메라를 이용하여 양 외팔보(DCB) 시험편의 개구변위 (opening displacement δ)와 균열길이(a)를 측정함으로써 일방향 적층판의 G_{IC} 를 구한 결과, CF/EP의 G_{IC} 값은 시험속도의 증가에 따라 별로 변화가 없었으며 CF/PEEK는 5m/s 이상의 속도에서 약간 감소했다고 한다.

본 연구의 목적은 고속도카메라 촬영법을 이용하여 다방향 복합적층판의 층간파괴에너지를 평가하고 충격하중속도의 효과를 살펴보고자 하는 것이다. 파괴시험속도를 $8.33 \times 10^{-6} \text{m/s} \sim 11.4 \text{m/s}$ 의 범위로 할 때, 하중-시간곡선, 균열속도, G_{IC} , 파괴진행형태에 미치는 시험속도의 영향을 연구한다. 본 논문에서는 G_{IC} 의 평가를 위해 탄성계수를 시험속도에 따라 일정하다고 가정하였으나 필자의 다음 논문⁽⁹⁾에 섬유가교와 유효탄성계수가 G_{IC} 값에 미치는 효과를 검토한다.

2. 이론 해석의 고찰

정적시험시에 비선형거동이 그다지 크지 않을 경우 적층판의 모드 I 층간파괴에너지는 ASTM 표준(10)에 근거하여 선형파괴역학을 기초로 한 임계에너지해방률 G_{IC} 로서 구한다. 이를 위해 Fig. 1과 같은 쌍외팔보형(DCB)시험편을 파괴시험에 이용하는데 정적하중하에서는 시험편이 갖는 두 개의 외팔보가 정반대 방향의 동일 크기의 굽힘하중(모멘트)을 받게 된다. DCB시험편은 수정된 선형보 이론(modified linear beam analysis)(4,7,8)을 이용한 다음식 (1), (2), (3)으로써 G_{IC} 를 구할 수 있다.

$$G_{IC} = \frac{12FP^2(a + \chi_i h)^2}{B^2 h^3 E_{II}} \quad (1)$$

$$G_{IC} = \left(\frac{F}{N}\right) \frac{3P\delta}{2B(a + \chi_i h)} \quad (2)$$

$$G_{IC} = \left(\frac{F}{N^2}\right) \frac{3h^3 \delta^2 E_{II}}{16(a + \chi_i h)^4} \quad (3)$$

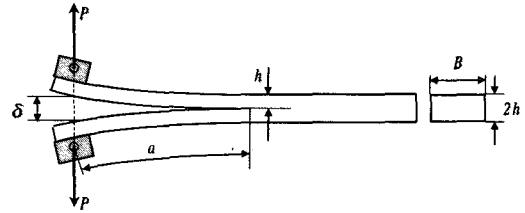


Fig. 1 The double cantilever beam (DCB) laminate specimen.

$$E_{II} = \left(\frac{P}{\delta}\right) \frac{8N(a + \chi_i h)^3}{Bh^3} \quad (4)$$

여기서 a : 균열길이, P : 하중, δ : 변위, E_{II} : 시험편의 길이방향 탄성계수, h : 외팔보의 두께(시험두께의 1/2), B : 시험편의 폭, F : 변위가 커짐에 따른 보의 유효길이 보정계수, N : 금속블록의 부착으로 인한 강성효과(stiffening effect)의 보정계수, χ_i : 균열선단의 회전과 처짐으로 인한 균열길이 보정계수이다. 식 (4)를 통해서 식 (1), (2), (3)은 모두 동일한 식임을 알 수 있다. 탄성계수 E_{II} 과 보정계수 F , N , χ_i 는 정적시험에 의해 이 연구에서 사용한 동종의 시험편으로 구한 값()을 이용한다. 이들 계수는 시험속도의 증가에 따라 값의 변화가 없다고 가정한다.

만일 시험편의 형상(a , h , B)과 탄성계수(E_{II}), 보정계수(F , N , χ_i)의 값들을 알고 있으면 하중 P , 변위 δ 를 측정함으로써 G_{IC} 를 구할 수 있는 것이다.

P 가 충격하중으로 시험편에 작용하면 동적 PZT로드셀에 의해 검출되는 하중은 여러가지 충격응력파의 영향을 받아 심하게 진동할 것이고 따라서 균열 개시시나 정지시의 정확한 하중을 구하기 어렵게 된다. 이 경우에는 P 가 필요 없는 식 (3)을 이용하는 것이 동적파괴시험의 해석에 유효하다고 볼 수 있다. 즉, 식 (3)은 시험편 주변의 부하장치와 고정구에서 발생 또는 전파하는 응력파와는 전혀 무관하므로 동적인 G_{IC} 값의 산출에 상당히 효과적일 수 있다. (부하위치에서의 충격적 변위속도, 시험편내를 전파하는 굽힘응력파, 시험편의 동적파괴거동이 균열선단부의 변형

및 균열진전거동에 적지않은 영향을 미칠 수 있으나 식 (3)에는 이들의 영향이 고려되어 있지 않다는 점이 아직 문제점으로 남는다.)

3. 실험방법

3.1 다방향적층시험편

일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그 테이프 (Fibredux 6376C, 영국 Ciba Geigy plc 제)를 적층한 다방향 복합적층판 (multidirectional composite laminate) $(-45^\circ / 0^\circ / +45^\circ)_2s(+45^\circ / 0^\circ / -45^\circ)_2s$ 을 본 연구에서 이용했다. 두께 $12.5 \mu\text{m}$ 의 얇은 테프론 필름을 적층판 가운데면에 삽입하여 적층하였으며 프리프레그 공급사가 제시하는 경화조건에 따라 오토클레이브내에서 제작했다. 이 얇은 필름으로 층간파괴시험시의 초기균열(starter crack)을 시험편에 형성시켰다. 제작된 적층판의 섬유체적함유율과 두께는 각각 약 65%, 3.4mm였다.

이 적층판을 절단하여 폭 24.5mm, 길이 130 ~ 150mm의 DCB 시험편을 만들었다. 시험편의 길이 방향은 적층판내의 0° 층의 섬유방향과 일치시켰다. 파괴시험시에 균열 선단의 위치를 쉽게 관찰하기 위해 시험편의 한쪽 가장자리면을 타자기용 흰색 수정액으로 피막처리했으며 일정 간격으로 눈금을 그려 균열길이 측정을 쉽게 했다. DCB 시험편에 하중을 가할 수 있도록 양 외팔보의 끝부위에 알루미늄 블록을 접착시켜 시험편을 완성했다.

3.2 저속 파괴시험

위의 DCB 시험편을 모드 I의 하중조건에서 0.5mm/min, 5mm/min의 변위속도로 정적인 시험을 실시했다. 나사구동식 인장시험기를 이용한 시험중에는 하중-변위 곡선을 레코더에 기록하였고, 이동식 광학 현미경을 이용하여 균열길이를 일정간격으로 하중-변위 곡선상에 표시하였다. 각 표시된 지점은 하중-변위-균열길이 가 서로 대응하여 측정되므로 식 (1), (2), (3)에 의거 GIC를 구할 수 있다. 초기 균열 길이는 시험이 끝난 후 시험편의 파면을 관찰하여 정확히 실측함으로써 시험중에 의견상 측정된 균열길이를 시험후에 보정했다.

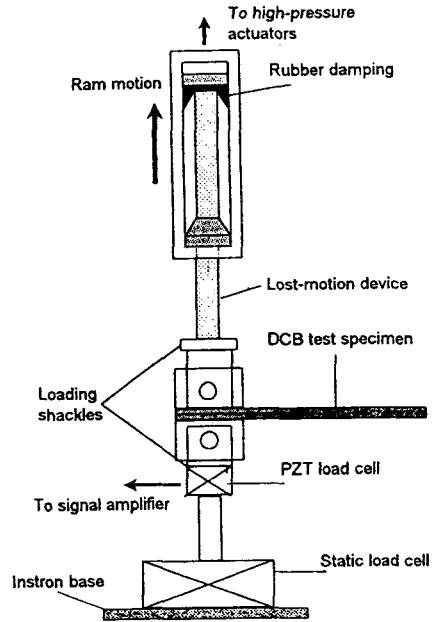


Fig. 2 Loading rigs for the DCB test.

3.3 중·고속 파괴시험

중속 및 고속파괴시험은 고속유압시험기(Instron Model 1343)를 이용하여 실시하였다. 이 시험기의 램(ram)의 변위는 LVDT 센서와 디지털 오실로스코프(20MHz Gould series)를 통해 변위-시간 곡선을 획득하여 측정한다. Fig. 2에 고속 파괴시험을 위한 시험편 부하장치의 개략도를 나타낸다. DCB시험편의 알루미늄 블록을 고정편에 의해 잡아주는 티타늄 소재의 족쇠(shackle)가 있으며 하부의 족쇠와 시험기 기저부 사이엔 PZT 로드셀(PCB model 208A03)이 장착되어 시험편에 걸리는 동적하중을 측정할 수 있다. 상부의 족쇠와 시험기의 램 사이에는 길이 약 30cm의 티타늄 소재 연결보(lost-motion device)가 있는데, 램은 이 연결보의 일정 위치에 독립적으로 있다가 시험개시 신호에 의해 윗 방향으로 가속 운동을 하다가 등속운동영역에 들어가 연결보의 끝단 돌출부에 타격을 줌으로써 시험편에 인장형 변위속도가 일정하게 작용하게 한다. 이때 연결보 끝단의 돌출부에는 두께 1mm의 고무층이 접착되어 있어 램과의 고속충돌시에 탄성적 튀어오름(elastic bouncing)과 고주파의 충격파발생을 완화시킨다.

시험은 변위속도 $1.0 \times 10^{-2} \sim 11.4\text{m/s}$ 의 범위에

서 실시하였으며 고속도 카메라(16mm Photec IV, Hadland)를 이용하여 시험편의 변형 및 파괴 과정을 촬영하였다. 여기서 1.0×10^{-1} m/s까지의 시험속도를 증속, 1.0m/s이상을 고속이라고 한다. 이 카메라는 촬영속도가 최대 40,000 화면/초(frames/s)이며 직경 45mm, f2.8 렌즈와 회전식 프리즘을 장착하고 있다. 사용되는 필름은 16mm 필름(7250 Eastman)으로 고해상도를 가진다. 또한 고속촬영을 위해서 텅스텐 스포트라이트가 시험편을 비추게 된다. 시험중에는 PZT 로드셀로부터의 하중신호와 LVDT센서로부터의 램변위 신호가 디지털 오실로스코프에 획득된다. 시험후 필름을 현상하고 프로젝터를 통해 시험편 크기의 10배 정도로 확대함으로써 개개 화면(frame)에서의 시험편 변위 δ 와 균열길이 a 를 측정했다.

이 시험의 결과데이터로서 램의 변위, 동적 하중, 고속도 카메라에 의한 시험편의 변위, 균열길이 측정되며 램의 변위와 카메라에 의해 측정되는 변위는 5m/s 이상의 변위속도에서 상당한 차이가 있었다. 시험편의 변위 속도(필름상의 변위속도)는 램의 변위속도보다 빨랐는데, 이는 램과의 고속충돌에 의해 시험편 연결보가 가속적으로 뒤틀렸기 때문으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 고속도카메라의 필름상의 변위를 실제 변위로 간주하여 식 (3)에 대입하고 G_{IC} 를 구했다.

3.4 파면 관찰

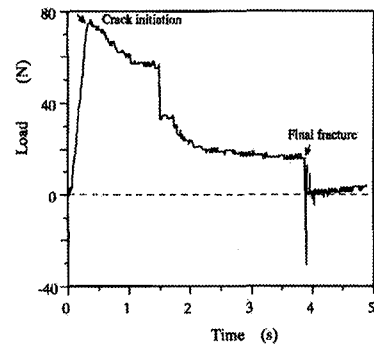
층간파괴형태를 연구하기 위해 접사식 광학카메라를 이용하여 파단면 전체를 촬영하고 균열전 이상태를 관찰했다. 또한 주사형 전자현미경(SEM)으로 파단면의 미세적 관찰을 실시하고 섬유와 수지의 파괴양상을 검토했다.

4. 실험결과 및 고찰

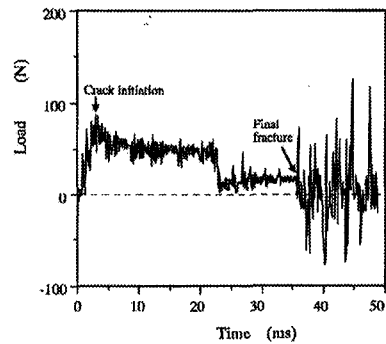
4.1 하중-시간 곡선

Fig. 3(a)-(d)은 본 연구에서 저속 및 중·고속 시험속도로 다방향적층 DCB시험편에 대해 구한 하중(P)-시간(t)곡선들을 나타낸다. 이들 곡선은 시험속도에 따라 다음의 특징적 거동이 보인다.

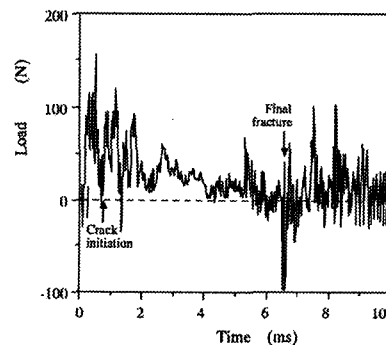
첫째, 1.0×10^{-2} m/s 이하의 저속 시험의 경우 (Fig. 3(a)) 균열개시전까지 δ 의 증가와 함께 P 가 선형적으로 증가하였으나 층간균열진전의 초



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Typical load(P)-displacement(δ) curves of the DCB multidirectional laminates under test rates of (a) 1.0×10^{-2} m/s, (b) 1.0m/s and (c) 5.7m/s.

기단계에서 P 가 점차적으로 약간 감소하다가 일정하게 유지되었다. 이때에는 균열선단부에서 섬유의 가교현상(fiber bridging)^(7,8)이 발생하여 균열

진전을 방해하면서 외적하중을 지탱하는 역할을 하였다. 그 후 균열의 급속한 진파와 함께 하중이 갑자기 떨어졌으며, 다시 균열이 조금씩 진전함에 따라 하중의 완만한 감소를 보였다. 즉, 섬유가교에 의해 균열 성장에 필요한 에너지보다 더 큰 탄성에너지가 안정적으로 축적되었다가 섬유가교의 풀림 혹은 깨짐에 의해 잉여 에너지(excess energy)만큼 운동에너지(kinetic energy)로 소산시켜 불안정하게 균열이 전파함으로써 균열의 고착-활강거동(stick-slip behavior)^(4,7,8)이 발생했던 것이다. 이때 균열 진전은 균열면의 인접층(+45°, -45°)내 및 0° 층내로 전이과정(crack jumping process)을 갖는 파괴거동으로 나타났다.

둘째, $1.0 \times 10^{-1} \text{m/s}$ 의 시험속도로 구한 P-t 곡선에서 많은 미세한 폭의 진동(oscillation)이 보였으며 시험속도가 1.0 m/s의 경우(Fig. 3(b)) 진동 폭은 상당히 커졌다. 이 진동은 균열진전에 따라 발생하는 동적효과(dynamic effects)가 드러난 것이며 FFT해석결과 주파수 대역은 4kHz 이내에 있었다. 이들 진동하중신호 중에서 어느 신호가 시험편에 대해 유효한 진짜 동적하중(effective dynamic loads)을 나타내는 것인지 알 수 없기 때문에 실험시에 인위적인 주파수여과(frequency filtering)를 가하지 않았다.

여기서 동적효과로는 (1) 충격하중이 가해지는 초기에 발생하는 시험편과 족쇠의 질량에 의한 관성효과(inertia effect)가 있으며 Fig. 3(c)에서 하중초기의 강도높은 첫번째 펄스가 이에 해당한다고 본다. 또한 (2) 이 큰 펄스와 함께 오는 작은 진폭의 많은 진동은 시험편과 족쇠에 전파하는 다양한 응력파로 볼 수 있다. 우선, 굽힘응력파(flexural stress waves)가 DCB시험편에서 주요 모드로 나타날 것으로 생각되는데, 이 파의 속도(wave speed)는 균열길이의 함수가 되며, 100-1200m/s의 영역에 있고 2차 모드의 주파수까지 감안하면 약 7kHz이내의 주파수를 갖게 된다고 판단된다. 이외에 전단응력파를 들 수 있는데, 이 파의 속도는 약 3000m/s이므로 주파수가 20-35kHz영역으로 전파하게 된다. 그러나 이 파는 측정신호의 FFT해석결과인 4kHz 범위 밖에 있으므로 동적효과에 별 영향을 미치지 않은 것으로 추정된다. 또한 본 실험에서 사용한 PZT로드셀의 공진 주파수가 70kHz 임을 감안할 때 전단응력파는 로드셀의 공진특성에 거의 영향을 주

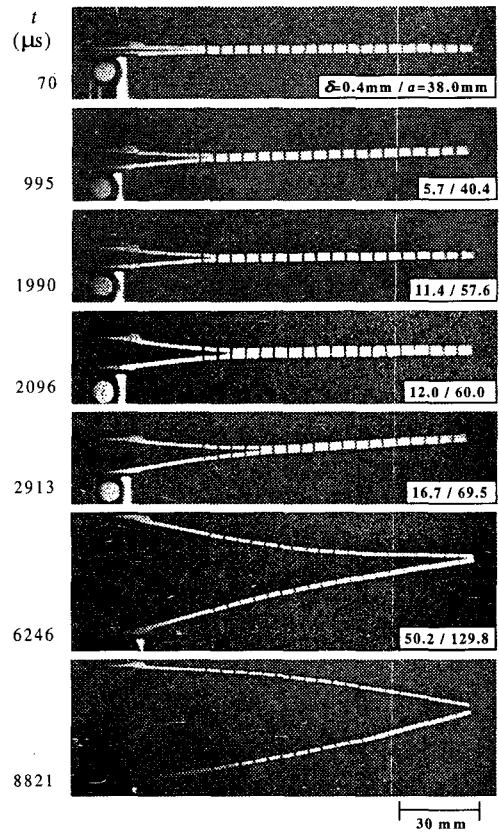


Fig. 4 High speed film photographs of a DCB specimen tested at a rate of 5.7m/s.

지 않았으며 따라서 실험에서 구한 하중-시간 곡선의 진동거동은 로드셀의 공진과 관련이 없었다고 생각된다. 한편 Fig. 3(b)에서 시험편의 최종파괴가 일어난 직후에 상당 시간동안 큰 폭의 진동신호가 보이는데 이는 PZT로드셀에 부착된 차지앰프(charge amplifier)특성에 의한 과잉응답(overshoot/undershoot)현상이 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 3(c)는 5.7m/s의 시험속도로 구한 P-t 곡선이며, 동적신호의 강도(intensity)가 매우 커서 균열진전개시점에서의 동적하중이 오히려 크게 작아졌으며 균열개시점과 파단점을 이 곡선만으로는 찾기 어렵다.

이상과 같이 다양한 동적효과가 P-t 곡선에 내포되어 있으므로 시험편의 변형거동에 대응하는 유효하중만을 구분해내기 어렵고 따라서 1m/s 이

상의 고속충격 시험에서는 하중 P 를 이용하여 충간파괴에너지 G_{IC} 를 정확히 구하기란 매우 어렵다. 이 경우에는 식 (3)에 의거 고속도카메라로 측정된 변위 δ 로써 G_{IC} 를 구하는 것이 유효성이 없는 동적하중효과로 발생하는 실험오차를 평균적으로 줄일 수 있다고 생각한다.

Fig. 4는 5.7m/s의 시험속도에서 촬영한 시험편의 변형 및 균열진전거동의 일례를 나타낸다. 이 경우의 촬영속도(framing rate)는 8,000화면/초였다. 필름에는 흰색 원형표시가 등시간 간격 (5ms)으로 찍히도록 되어있기 때문에 화면간의 시간 (0.125ms)을 확인할 수 있다. 각 화면에서 균열선단의 위치(균열길이 a)와 하중점간의 간격(개구 변위 δ)을 비교적 선명히 측정할 수 있다. 또한 양팔보의 변형 현상은 보의 굽힘 진동시의 1차 모드에 주로 해당하므로 δ 의 크기가 균열선단의 개구력(opening load)에 직접적이고 주된 영향을 미치는 것으로 생각되며 식(3)에 의한 G_{IC} 의 측정은 이 시험속도에서 타당할 것으로 추정된다.

4.2 균열진전거동과 균열속도

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 Fig. 3(a)와(c)에 대응하며 1.0×10^{-2} m/s, 5.7m/s의 시험속도에서 촬영한 시험편의 파괴거동을 관찰함으로써 균열길이 a 및 균열속도 \dot{a} 를 시간의 함수로 구한 결과이다. 그림에서 \dot{a} 값을 1.0×10^{-2} m/s의 시험속도에서 54ms의 시간 간격으로, 5.7m/s에서 141 μ s의 시간간격의 평균으로 구했다. 양 시험속도에서 균열은 안정적인 진전과 불안정한 진전 및 균열정지(crack arrest)를 반복하는 고착-활강거동(stick-slip behavior)을 나타냈다. 따라서 균열진전에 따른 a 의 증가와 함께 \dot{a} 는 크게 변동하고 있었다. 시험편 전체균열길이에 대한 평균 속도 \dot{a}_{avg} 는 시험속도 1.0×10^{-2} m/s에서는 0.23m/s, 5.7m/s에서는 13.6m/s로서 시험속도의 비율에 근접하였으며, 균열진전 최대속도는 각각 0.36m/s, 51.3m/s를 나타냈다.

Fig. 6은 시험속도 $\dot{\delta}$ 로 정규화한 평균균열속도 \dot{a}_{avg} 를 각 시험속도별로 구하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 주목해야 할 것은 1.0×10^{-1} m/s 이하의 저속 및 중속시험에선 시험속도 $\dot{\delta}$ 와

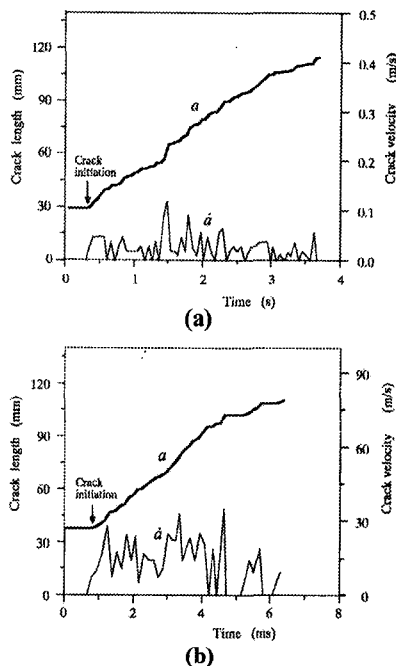


Fig. 5 Crack length (a) and the corresponding crack velocity(\dot{a}) versus time traces of specimens tested at rates of (a) 1.0×10^{-2} m/s and (b) 5.7m/s.

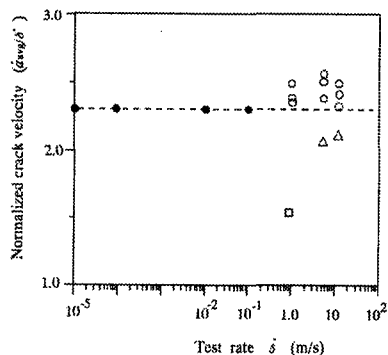


Fig. 6 Average crack velocity (\dot{a}_{avg}) over the whole propagation length as a function of test rate.

\dot{a}_{avg} 는 단순비례관계(점선 참조)를 보였으나 1.0m/s이상의 고속시험에선 \dot{a}_{avg} 값이 단순비례 관계보다 다소 크게 나타났던 점(○표시 참조)이다. 즉, 고속시험속도에서는 δ 의 크기에 단순비례하는 \dot{a} 값에 더하여 균열속도의 추가증가분이 발생하며 이는 시험편 양팔보의 충격변위때문에 발생하는 굽힘응력파의 진폭 및 재료 파괴거동의 변화, 고속파괴에 의한 제2의 굽힘 응력파의 발생과 전파에 의거한다고 생각한다. 한편 그림에서 □ 표시는 단순비례관계보다 아래에 있는데, 파편검사결과 이 시험편에서는 여타 시험편에 보이는 균열의 전이거동(crack jumping)이 발생하지 않고 최종파괴때까지 섬유가교효과가 지속되어 균열진전속도가 둔화된 것이다. 위의 결과는 초기 균열길이 a_i 가 29 ~ 38mm의 경우였는데, a_i 를 길게하여 61mm로 한 결과(△표시) \dot{a} 값이 상당히 낮아졌다. 이는 초기 균열길이 가 길수록 충격하중에 의한 굽힘응력파의 영향을 작게 받고 양팔보의 굽힘강성(bending stiffness)의 감소로 인하여 균열선단부의 변형속도가 느려지고 개구변위가 커진 상태에서 균열이 진전하였으므로, 균열의 가속효과가 낮아져서 평균균열진전 속도가 둔화되었다고 생각된다.

4.3 층간파괴에너지의 평가

Fig. 7(a)와 (b)는 각각 Fig. 3(a)와 (c) 또는 Fig. 5(a)와 (b)에 대응하는 시험편들의 파괴에너지 G_{IC} 및 균열속도 \dot{a} 를 a 의 함수로서 구한 결과를 보여준다. 여기서 언급해야 할 것은 첫째, 균열개시시의 G_{IC} 값($G_{IC,i}$)은 1.0×10^{-2} m/s의 시험속도에서 약 0.46 kJ/m^2 이었으나 5.7m/s 에서는 그보다 작아졌다는 점이다. 둘째, 양 시험속도에서 균열의 진전에 따른 G_{IC} 의 증가, 즉 '파괴에너지 증대곡선'(rising R-curve)⁽⁷⁾이 잘 나타났다. 또한 균열진전의 고착-활강 거동이 때로는 미소하게 때로는 크게 나타나면서 G_{IC} 의 값은 균열진전에 따라 변동했다. 파괴에너지의 증대는 섬유가교(fiber bridging)의 정도가 커짐을 의미하며, 원래의 균열면은 +45°/-45°의 층간에 있었으나 균열진전에 따라 인접층에 전이되어 균열선단부의 후방에 섬유가교가 형성됨으로써 균열진전이

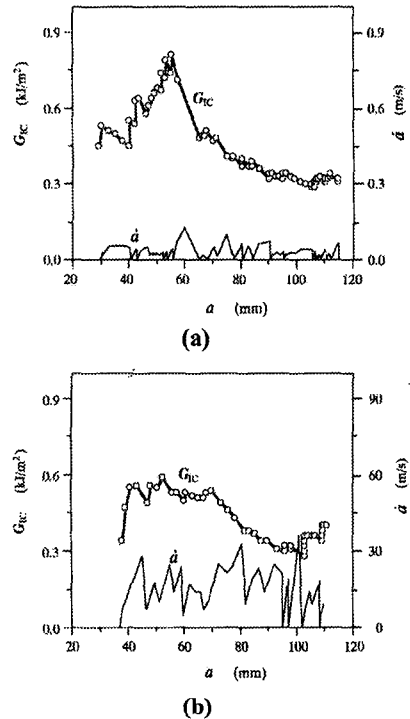


Fig. 7 Fracture energy (G_{IC}) and the corresponding \dot{a} versus crack propagation length (a) of specimens tested at rates of (a) 1.0×10^{-2} m/s and (b) 5.7m/s.

억제된 것이다(4.4절 참조). 1.0×10^{-2} m/s의 시험속도에서 파괴에너지 곡선이 점차적으로 증대하여 균열진전량이 약 25mm 되었을 때 최대값에도달했으나, 5.7m/s에서는 약 16mm의 짧은 균열진전으로 최대값이 되었다. 셋째, 1.0×10^{-2} m/s의 시험속도에서 최소 G_{IC} 값 ($G_{IC,arrest}$)은 $a \cong 105$ mm 근처에서 균열전이가 완결되었을 때 약 0.32 kJ/m^2 으로 나타났으며 고속시험은 이보다 약간 더 낮은 값을 보여줬다.

Fig. 8은 $a_i=29 \sim 38$ mm의 시험편을 이용하여 측정된 결과로서 시험 속도에 따른 G_{IC} 값의 변화를 나타낸다. 이 결과는 첫째, 각 시험속도에서 $G_{IC,i}$ 는 $G_{IC,arrest}$ 보다 다소 큰 값을 보여주었다. 이는 +45°/-45°층의 층간에서의 균열개시시 G_{IC} 가 균열전이 완결 후의 0°층에서의 G_{IC} 보다 다소 크다는 것이다. 둘째, 시험 속도의 증가에 따

라 $G_{IC,i}$ 와 $G_{IC,arrest}$ 값은 점차적으로 작아졌다. 이 원인은 에폭시 수지의 연성/취성 천이거동에 따른 것으로 생각된다. 일방향 CF강화 에폭시의 경우, Blackman등⁽⁴⁾은 시험속도의 증가에 따라 $G_{IC,i}$ 값이 일정하다고 보고했으나, Smiley와 Pipes⁽¹⁾, Beguelin등⁽²⁾은 EP의 연성-취성 천이거동에 의해 $G_{IC,i}$ 값이 감소한다고 했다. 본 연구결과는 다방향 복합적층판에 해당하지만 후자의 결과에 유사하다고 볼 수 있겠다. 셋째, 시험속도 1m/s에서 섬유가교효과가 시험편의 완전분리시까지 지속된 경우(□표시)에 큰 $G_{IC,max}$ 값이 나타났으며 이는 Fig. 6의 □표시와 같이 평균균열속도의 둔화를 초래한 것이다. 넷째, 시험속도 5.7m/s에서 $G_{IC,max}$ 값은 감소하였으나 11.4m/s에서 크게 증가하였다. 최대 파괴에너지는 주로 섬유가교효과와 관련되므로 11.4m/s의 충격하중은 5.7m/s이하의 충격하중에서 발생하는 섬유가교거동과는 다른 섬유가교의 형성기구를 초래하였다고 생각된다. 이를테면, DCB시험편의 한쪽 블록을 고정된 상태에서 다른 쪽 블록을 고속으로 잡아당기므로 Fig. 4에서와 같이 $t=2096\mu s$ 이후에 시험편의 상하대칭이 깨져 균열선단부에 모드II의 하중이 다소 작용하게 되는데, 변위속도가 11.4m/s로 커짐에 따라 이 충격부하의 비대칭성이 심화되어 모드II의 하중이 좀더 커져 균열선단부에서 모드I+II의 혼합형 충격하중이 작용함으로써 섬유가교효과와 $G_{IC,max}$ 를 크게 증대시켰던 것으로 추측된다.

4.4 파괴기구

5mm/min의 속도로 시험한 시험편의 초기균열선단 근처의 파단면을 광학카메라 및 SEM으로 촬영하여 각각 Fig. 9(a)와 (b)에 나타낸다. +45° / -45° 층간에서 균열이 개시하고 인접한 +45° 층으로 균열전이가 진행하여 0° 층내까지 진전하였다(Fig. 9(a)). 이 균열전이과정 동안 균열선단부는 미세하게 갈라져(crack-tip splitting) 3차원적으로 복잡한 형상을 나타냈을 것이며 섬유의 가교(fiber bridging)가 균열선단의 후방에서 많이 생성되었을 것이다. 균열개시영역에서의 층간파괴형태를 보면(Fig. 9(b)) 수지가 비교적 연성적으로 파괴했다.

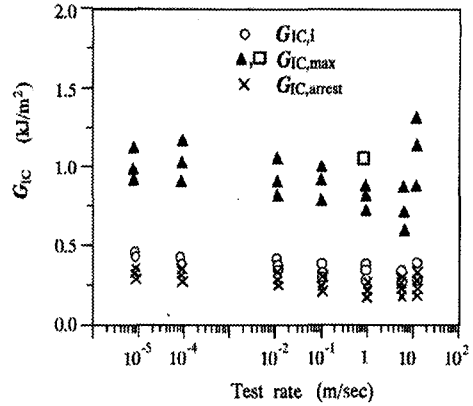


Fig. 8 G_{IC} as a function of test rate.

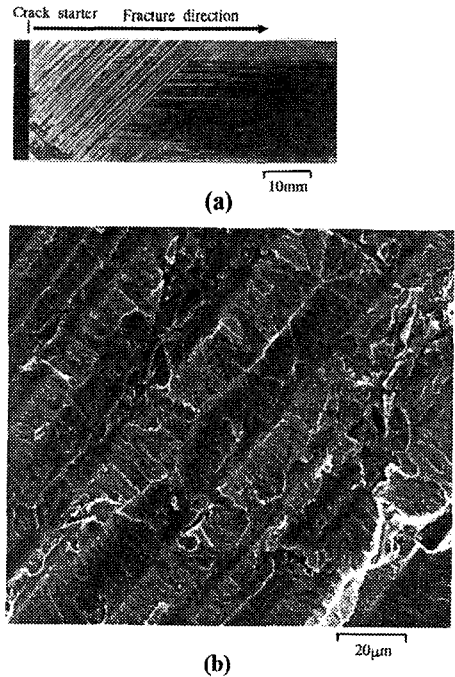


Fig. 9 Optical(a) and SEM(b) photographs taken from the fracture surface of specimen tested at 1.0×10^{-2} m/s.

한편, Fig. 10은 11.4m/s의 시험속도로 생긴 파단면을 보여준다. 균열개시단계에서 균열선단은 +45° / -45° 층간에 있었으나, 3~5mm의 균열

진전초기에 균열은 $+45^\circ$ 층내(Fig. 10(a)의 A영역)로 일시적으로 5mm 정도 진전하였다가 다시 -45° 층내(B영역)로 진입하는 복잡한 진전거동을 나타냈다. 균열전이가 최종전이방향과 일시적으로 다르게 일어나는 현상은 저속부터 5.7m/s의 시험속도까지는 발생하지 않았던 것이다. 이와 같이 층간파괴의 복잡한 진전은 아마도 고속 충격하중에 의한 굽힘 응력파가 균열개시시에 크게 영향을 주었기 때문으로 생각된다. 이것은 $G_{IC,max}$ 가 11.4m/s의 시험속도에서 증가하는 특징(Fig. 8)을 부분적으로 설명해 준다. 즉, 강력한 충격부하는 Fig. 4에서 보인바와 같이 상하 비대칭형 부하를 유발시키고 이에 더하여 충격굽힘파가 균열개시전에 균열선단부위의 인접층을 미시적으로 손상시킴으로써 균열개시직후에 섬유가교의 정도를 크게 했다고 추론할 수 있다. 그 후 균열전이는 -45° 층에 인접한 0° 층(C영역)까지 진전하였다. 균열개시 직후의 파단면을 SEM 관찰한 결과(Fig. 10(b)) 수지부가 Fig. 9(b)와 비교하여 취성적으로 파괴했으며, 섬유가교로 인한 섬유의 횡방향 파단이 일어났다. 시험속도의 증가에 따른 수지부의 취성적파괴는 균열개시시와 균열정지시의 G_{IC} 값을 저하시킬 수 있으며 이는 Fig. 8의 경향과 일치한다.

5. 결 론

탄소섬유강화 에폭시 복합재료인 다방향적층판(multidirectional laminate)의 층간파괴거동에 미치는 하중속도의 효과를 연구했다. 양 외팔보(double cantilever beam)시험편을 이용하여 8.33×10^{-6} m/s ~ 11.4m/s의 시험속도범위에서 파괴시험을 실시하였다.

(1) 하중-시간곡선을 관찰한 결과, 시험속도 1.0×10^{-1} m/s 이하는 정적파괴시험으로 간주할 수 있으나, 1.0m/s 이상에서는 동적 관성효과 및 충격응력파의 영향이 나타났으므로 파괴에너지평가를 위해서는 하중변수가 없는 산출식을 이용하는 것이 유효했다.

(2) 대부분의 시험편에서는 초기 층간균열이 인접층에 전이하였으며 고착-활강거동을 보이며 진전하였다. 이때, 섬유가교효과에 의한 파괴에너지 증대곡선이 나타났다.

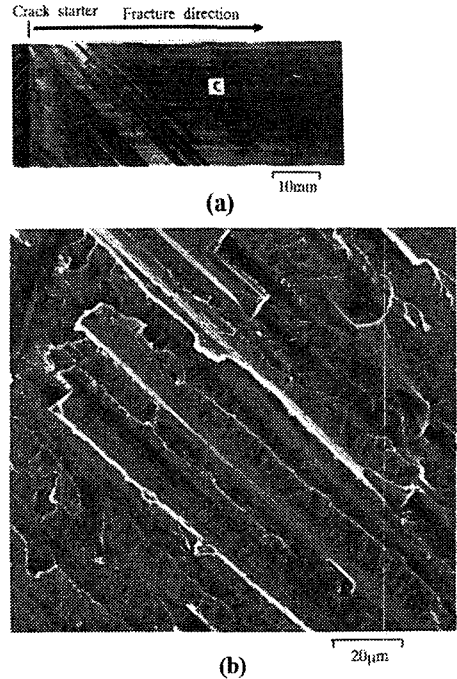


Fig. 10 Optical(a) and SEM(b) photographs taken from the fracture surface of specimen tested at 11.4m/s.

(3) 초기 균열길이가 일정할 경우, 1.0×10^{-1} m/s 이하의 시험속도에서는 균열진전의 평균속도가 시험속도에 단순비례하였으나, 1.0m/s 이상에서는 단순비례관계보다 크게 나타났다.

(4) 층간파괴에너지를 굽힘탄성계수가 일정하다고 가정하여 산출한 결과, 시험속도가 증가함에 따라 균열개시시와 균열정지시의 파괴에너지는 다소 저하하는 경향을 보였다. 또한 최대 파괴에너지는 5.7m/s의 시험속도에서 최소값으로 감소하였으나 11.4m/s에서는 증가하였다.

(5) 파단면 관찰결과, 시험속도의 증가에 따라 수지부의 파괴는 취성적으로 변하며 섬유가교의 정도가 균열진전 초기단계에서 바뀌므로, 다방향적층판의 층간파괴에너지에 미치는 시험속도의 효과는 재료파괴거동의 변화에 상당히 의존했다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 (전 교육부 기계공학 분야) 연구비(과제번호 ME 96-C-25)에 의해 수행

되었습니다.

참고문헌

- (1) Smiley, A. J. and Pipes, R. B., 1987, "Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 670~687.
- (2) Beguelin, Ph., Barbezat, M. and Kausch, H. H., 1991, "Mechanical Characterization of Polymers and Composites with a Servohydraulic High-Speed Tensile Tester," *Journal de Physique III France*, pp. 1867~1880.
- (3) Aliyu, A. A. and Daniel, I. M., 1985, "Effects of Strain Rate on Delamination Fracture Toughness of Graphite/Epoxy," in *Delamination and Debonding of Materials*, ASTM STP876, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 336~348.
- (4) Blackman, B. R. K., Dear, J. P., Kinloch, A. J., Macgillivray, H., Wang, Y., Williams, J. G. and Yayla, P., 1995, "The Failure of Fiber Composites and Adhesively Bonded Fiber Composites under High Rates of Test Part I: Mode I Loading-Experimental Studies," *Journal of Materials Science*, Vol.30, pp. 5885~5900.
- (5) Im, K. -H., Kim, J. -H. and Yang, I. -Y., 1998, "A Study on Residual Fatigue Bending Strength and Damage Behavior of CFRP Composites Subjected to Impact Loadings," *KSME International Journal*, Vol. 12, pp. 50~57.
- (6) Yoon, S. H., Kwon, Y. W. and Clawson Jr., L. A., 1997, "Experimental Investigation on Low Energy Impact Behavior of Foam Cored Sandwich Composites," *KSME International Journal*, Vol. 11, pp. 136~142.
- (7) 최낙삼, Kinloch, A. J., 1998, "모드I 하중조건 하에 있는 다방향적충복합재료의 층간파괴거동," 대한기계학회논문집A권, 제22권 제3호, pp. 611~623.
- (8) Hashemi, S., Kinloch, A. J. and Williams, J. G., 1990, "Mechanics and Mechanisms of Delamination in a Poly(ether sulphone)-Fiber Composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 37, pp. 429~462.
- (9) 최낙삼, Kinloch, A. J., "충격하중하의 다방향 복합적충판의 층간파괴에너지에 미치는 굽힘탄성계수와 섬유가교의 효과," 한국복합재료학회지 (투고중)
- (10) 1978, *ASTM standard E-399*, American Society for Testing and Materials.