

論文

흑연/에폭시 복합재료의 층간파괴인성치에 대한 하중 속도의 영향

염영진* · 유 희**

Loading Rate Effect on Interlaminar Fracture Toughness of Carbon/Epoxy Composite

Young-Jin Yum* and Hee You**

ABSTRACT

Fracture test was performed for the Carbon/Epoxy DCB(Double Cantilever Beam) specimens to investigate the effect of loading rate on the interlaminar fracture toughness of composite laminate. New technique was proposed from which many crack propagation lengths could be measured in one specimen during high rate test. Fracture toughness showed little change up to 2 mm/sec of loading rate, however, 40% increase above 20 mm/sec.

It was shown that nonlinear beam analysis was possible from the relationship of displacement and crack length and that conventional linear analysis underestimated the fracture toughness to the amount of 12%. Critical crack propagation speed was found to be 25 mm/sec from the change of fracture toughness for crack propagation speeds.

초 록

복합적층판의 층간파괴인성치에 미치는 하중속도의 영향을 고찰하기 위하여 흑연/에폭시 쌍외팔보 시편에 대한 파괴시험을 수행하였다. 고속시험시 한 시편에서 여러 개의 균열 진전길이를 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 하중속도가 2 mm/sec까지는 파괴인성치의 변화가 거의 없었으며 20 mm/sec 이상의 속도에서는 파괴인성치가 40% 이상 증가함을 알 수 있었다.

변위와 균열길이의 관계로부터 비선형해석이 가능함을 보였고, 기존의 선형해석방법은 파괴인성치를 12% 정도 과소평가함을 확인하였다. 균열 진전속도에 따른 파괴인성치의 변화를 보임으로써 정적하중속도와 고속하중속도의 임계 균열진전속도가 25 mm/sec임을 알 수 있었다.

1. 서 론

섬유강화 복합재료로 이루어진 구조물이 많아짐에 따라 이에 대한 안정성 평가의 중요성도 점차 커지고 있다. 구조물의 안정성과 직접 관련된 파괴 현상은 일반적으로 재료 내부에 존재하거나 외부 하중에 의해 발생하는 균열의 진전에서 비롯되고

그 양상도 매우 다양하다. 특히 복합재료는 재료 자체의 이방성 때문에 파괴 거동이 매우 복잡하고 이론적인 해석도 등방성 재료에 비해 훨씬 까다롭다. 이에 따라 연구자에 따라 등방성 재료의 결과를 복합재료에 그대로 적용하기도 하고 또는 복합재료의 이방성을 고려한 이론 해석 방법 및 실험 방법 등을 새로이 고안하기도 한다. 등방성 재료에서 볼

* 울산대학교 공과대학 기계공학과

** 울산대학교 대학원 기계공학과

수 없었던 복합재료의 특이한 파괴 양상 중 하나는 적층판의 층과 층 사이에 생긴 결함이 진전할 때 생기는 층간 분리현상이다. 층간 분리시 층간 파괴인성치는 매우 낮기 때문에 복합재료 구조물의 안정성에 지대한 영향을 미치므로 이에 따라 층간 분리현상에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다.

복합적층판의 층간 파괴인성치를 측정하는 것은 시편 제작이 용이한 쌍의팔보(Double Cantilever Beam) 실험을 통하여 많은 연구[1~7]가 이루어지고 있고 실험 결과에 대한 해석방법으로는 단순 선형보 이론, 면적법, 일반케적법 및 유한요소법 등이 있다. 쌍의팔보 실험이 일반적인 정량적 실험방법으로 정립되기 위해서는 실험 결과에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 완전하고 체계적인 연구가 필요하다고 본다. 이러한 인자들로서 기지와 섬유의 종류, 온도, 하중속도 및 결과 해석 방법 등을 들 수 있다. 이 중에서 하중속도가 쌍의팔보 시편의 층간분리에 미치는 영향과 새로운 해석 방법을 제안하는 것은 흥미로운 분야라고 생각된다. 일반적으로 복합재료를 구성하고 있는 기지의 기계적 거동은 하중속도의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 복합재료의 파괴인성치도 하중속도에 따라 정적 하중 상태에서의 인성치 값과 차이가 나게된다. 이에 대한 연구[8~12]는 그다지 많이 수행되어 있지 않고 문헌에 따라 일관된 경향을 보여주고 있지 않다. Hunston과 Bascom[8]은 하중속도가 모두 거의 정적으로, 속도가 증가함에 따라 G_{IC} 값이 약간 증가하였다. Aliyu와 Daniel[9]은 흑연/에폭시 시편에 크로스헤드 속도(cross-head speed)를 0.0085 mm/sec에서 8.47 mm/sec 까지 변화 시키면서 파괴인성치를 구하였는데 균열 진전속도가 빨라짐에 따라 198 J/m²에서 254 J/m² 까지 대수적으로 비례하여 증가함을 보였다. Mall 등[10]은 흑연/피이크(graphite/PEEK) 시편에 대한 하중속도의 영향을 조사하였는데 크로스헤드 속도가 0.05 cm/min으로부터 100 cm/min까지 증가함에 따라 층간파괴인성치가 65% 정도 감소하는 것을 관찰하였다. 그 밖에 Smiley와 Pipes[11]는 APC-2와 AS4/3501-6에 대한 실험을 하여 두 경우 모두 균열선단 열림율이 증가할수록 층간파괴인성치가

감소함을 보였으며, Hashemi등[12]은 0.2 mm/min에서 20 mm/min까지 작은 범위에서 하중속도를 변화시켜 파괴인성이 거의 차이가 없음을 알았다. 위의 논문들로부터 하중속도가 증가함에 따라 층간파괴인성치가 증가한다는 결과가 있는 반면 그 반대로 감소한다는 결과도 있다. 또한 하중속도의 범위가 그다지 넓지 않아 층간파괴인성치에 대한 하중속도의 영향을 올바르게 판단했다고 볼 수 없다. 해석 방법에 있어서는 기존의 논문들은 대부분 선형 이론에 치우쳐 있어 인성치를 과소 평가하는 경향이 있다.

따라서 본 연구에서는 흑연/에폭시 쌍의팔보 시편을 제작하여 하중속도를 정적인 하중으로부터 고속하중까지의 넓은 범위에 걸쳐 파괴시험을 수행하고 고속 시험시의 가장 큰 문제점인 균열 길이 측정 방법을 제안한다. 그리고 선형 및 비선형 거동까지 고려하여 하중속도와 균열 진전속도에 대한 층간파괴인성치의 변화를 알아보려고 한다.

2. 이 론

파괴인성은 아래와 같이 정의 되어진다.

$$G = \frac{1}{B} \left(\frac{dU_e}{da} - \frac{dU_s}{da} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$U_e = \int \delta dP$: 균열이 진전하는 동안에 외부에서 한 일

$U_s = \int P d\delta$: 변형에너지

a : 균열길이, δ : 변위, P = 하중, B : 시편 폭

변위 δ 가 일정한 경우 위의 식은 아래와 같이 된다.

$$G = - \frac{1}{B} \frac{dU_s}{da} \dots\dots\dots (2)$$

선형 이론에 근거하여 식(2)를 풀면 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$G_{IC} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_C \delta}{Ba} = \frac{9EI}{4B} \frac{\delta^2}{a^4} \dots\dots\dots (3)$$

(2)식에 $U_s = \int P d\delta$ 를 대입하여 풀면 아래와 같다.

$$G_{IC} = - \frac{1}{B} \frac{dU_s}{da} = - \frac{1}{B} \frac{d}{da} (\int P d\delta)$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{B} \frac{d(P \delta)}{d\delta} \frac{d\delta}{da} \\
 &= -\frac{P_c}{B} \frac{d\delta}{da} \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

이 결과 식으로부터 변위 δ 와 균열 진전길이 a 사이의 관계만 알면 선형, 비선형에 관계없이 파괴인성을 구할 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험

3-1. 시편제작

한국화이버(주) 흑연/에폭시 프리프레그를 가로 460 mm, 세로 190 mm로 제단한 후 일방향으로 12겹 적층하고 50 mm 깊이까지 테프론 필름을 삽입한 후 다시 12겹을 적층하여 시편 중앙에 인위적인 초기균열을 만들었다. 총 24겹 프리프레그를 오토 클레이브(autoclave)에서 주어진 경화 사이클에 따라 경화하고 2 mm 두께로 된 적층판을 다이아몬드 커터로 절단하여 길이 230 mm, 두께 2 mm, 폭 20 mm의 쌍외팔보 시편을 제작하였다. 굽힘모우멘트가 발생하지 않도록 시편 상하면에 접착제로 힌지 탭을 붙이고 하중 증가에 따른 균열 진전길이를 측정하기 위하여 시편 옆면 즉 균열이 진전하는 부위에 흰색 수정액으로 코팅을 하고 눈금이 있는 종이 자를 뒷면에 붙였다. 시편의 형상은 Fig.1에 나와 있다. 힌지탭으로부터 시편의 총길이는 210 mm이고 초기균열을 만들기 위하여 삽입된 테프론 테입까지의 길이는 30 mm이다. 시편의 두께는 2 mm이다. 균열길이는 힌지탭에 하중이 가하여지는 부분부터 측정되어지는데 즉 Fig.1의 a에 해당한다.

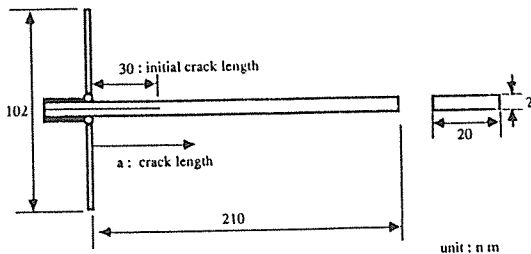


Fig. 1. Geometry of double cantilever beam specimen

3-2. 시험

전기유압식 재료시험기 MTS 819에서 변위 제어 모우드로 크로스헤드 속도를 0.02 mm/sec, 0.2 mm/sec, 2 mm/sec, 20 mm/sec, 120 mm/sec까지 다섯 단계로 변화시키면서 각 속도별로 3개 이상의 시편에 인장하중을 가하였다. 테프론 필름으로 생성된 균열 부위는 수지과다(resin rich)를 이루고 있으므로 본 시험에 들어가기 전에 초기 하중을 가하여 테프론 필름 끝에서부터 10 mm 이상되는 초기균열을 생성시켰다. 0.02 mm/sec에서 2 mm/sec까지의 속도에서는 균열 진전길이를 눈으로 확인할 수 있으므로 시간 확인(time check) 회로를 구성하여 균열이 10 mm/sec 증가할 때마다 하중-변위 선도에 전압차를 표시하였다. 고속인 경우 20 mm/sec 이상의 속도에서는 균열진전 길이를 가시적으로 측정할 수 없다. 따라서 시편에 스트레인 게이지나 은 착색(silver paint)으로 회로를 구성하여 균열 길이를 측정하는 방법이 제안되었으나[9] 스트레인 게이지로 측정하는 방법은 한 시편에서 균열길이를 2~3 군데만 측정할 수 있어 시편의 낭비가 심하며 일관성 있는 실험데이터 습득이 힘들고 은 착색방법으로 회로를 구성하여 시험하여 본 결과 시편이 전도성이기 때문에 회로를 구성하는데 상당한 어려움이 있을 뿐만 아니라 결과에 대한 신빙성이 떨어짐을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 보완할 수 있는 방법으로 저속에서 시험한 결과를 바탕으로 변위가 변함에 따라 균열 길이가 상관 관계를 가짐을 파악하고 변위를 일정한 위치에서 정지하도록 한 후 정지 상태에서 균열길이를 측정하는 방법을 고안하였다. MTS는 구간을 정하여 크로스헤드 속도를 조정할 수 있는 기능을 가지고 있는데 즉 시험기의 RATE1에서는 원하는 변위만큼 크로스헤드 속도를 가진 후 RATE2에서는 더 이상 변위가 증가하지 않고 정지되게 할 수가 있다. 이러한 기능을 이용하여 크로스헤드 속도와 정지 위치 변위만 달리하여 균열진전길이와 하중값을 정량적으로 구할 수 있었다. 이렇게 하여 얻은 데이터들은 변위가 일정한 위치에 정지한 상태에서 구하여지기 때문에 저속시험에서

얻은 데이터의 오차와 특별한 차이를 보이지 않고 있다. 이러한 방법으로 시험을 함으로써 시편마다 10군데 이상의 균열 진전길이를 가지적으로 정확하게 측정할 수 있었고 하중과 변위는 A/D 변환기와 상용프로그램인 global lab을 이용하여 초당 1000개 이상의 데이터를 수집할 수 있었다. 대표적인 하중-변위 그래프와 시간 확인 회로를 이용하여 측정된 균열 진전길이가 Fig. 2에 나와 있다. 이 그림은 크로스헤드 속도가 0.02 mm/sec인 경우이며 직선으로 꺾어져 연결되어 있으면서 1에서 10까지 번호가 붙어있는 것은 시간확인 회로를 이용하여 균열길이가 10 mm씩 진전함에 따라 전압을 1.5볼트, 3.0볼트로 변화시킴으로써 나타나는 그림이다. 이 전압차는 균열의 진전을 가지적으로 보면서 시간확인 회로에 구성되어 있는 스위치를 누름으로써 나타난다.

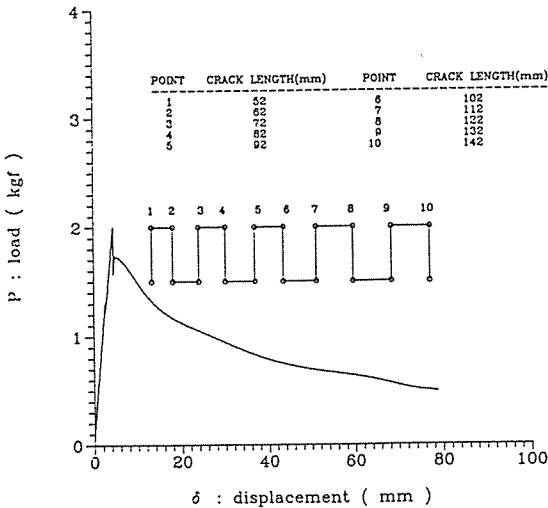


Fig. 2. Load-displacement graph for DCB specimen (crosshead speed : 0.02 mm/sec)

4. 결과 및 토론

식(3)으로부터 알 수 있는 것은 만약 시편이 선형 거동을 한다면

$$\delta = C a^2, \quad C = \sqrt{\frac{4G_{IC}B}{9EI}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

와 같이 δ 는 a 의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

그러나 Fig. 3에 나온 δ 와 a 에 대한 전대수(Log-Log) 그래프를 보면 크로스헤드 속도에 관계없이 기울기가 1.8인 직선에 가까움을 알 수 있다. 즉 선형거동일 때의 기울기가 2인 점을 감안하면 쌍의팔보시편은 비선형 거동을 함을 알 수 있다. 따라서 기존 문헌들에서 결과 해석에 적용한 선형이론은 파괴인성치를 과소평가하고 있다고 판단된다.

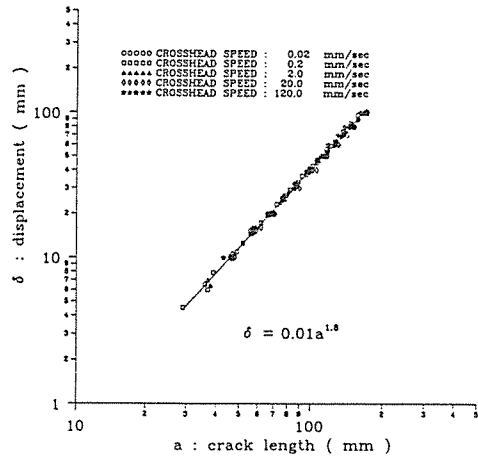


Fig. 3. Displacement versus crack length for crosshead speed

Fig. 3의 결과에서

$$\delta = 0.01 a^{1.8} \quad \dots\dots\dots (6)$$

이 되고 이 실험식으로부터 아래와 같은 파괴인성식이 유도될 수 있다.

$$G_{IC} = -\frac{P_c}{B} \cdot \frac{d\delta}{da} = -\frac{P_c}{B} \cdot 0.018 a^{0.8} \quad \dots\dots (7)$$

이 식으로부터 구한 파괴인성치와 선형이론에 근거한 식(3)을 이용하여 구한 파괴인성치가 Table 1과 Fig. 4에 나와 있다. 이들로부터 파괴인성치는

Table 1. G_{IC} as a function of crosshead speed

crosshead speed (mm/sec)	G_{IC} (J/m ²)	
	present theory	linear theory
0.02	236	210
0.2	247	220
2.0	234	210
20.0	324	254
120.0	355	307

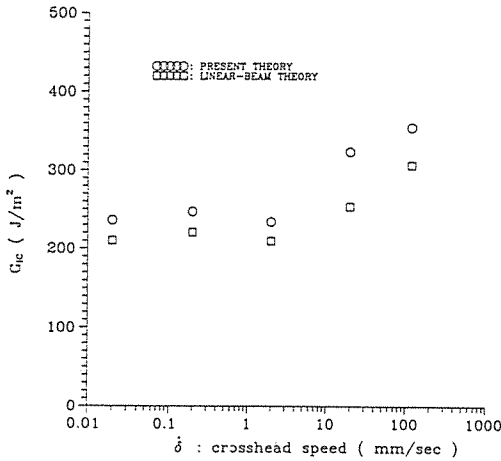


Fig. 4. Variation of G_{IC} with crosshead speed

크로스헤드 속도가 2mm/sec까지는 거의 일정하다가 20mm/sec 이상에서는 약 40% 이상 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 일반적으로 금속재료의 고속 시험시 파단 하중이 증가하는 경향과 일치함을 보여준다. 또한 선형 이론에 바탕을 두고 계산된 파괴인성치는 비선형 거동임을 고려한 값보다 약 12% 작음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 참고문헌[11]의 데이터를 이용하여 본 이론을 적용시켜 본 것이다. 재료는 APC-2, 크로스헤드 속도는 0.004mm/sec로 일정한 경우이며 위 참고문헌은 파괴인성치를 선형으로 해석하였다. Fig. 5에서 각 데이터 점들은 참고문헌의 값들을 인용한 것이며 직선은 이 값들을 선형화한 것이다. 변위와 균열길이의 관계는 $\delta = 0$.

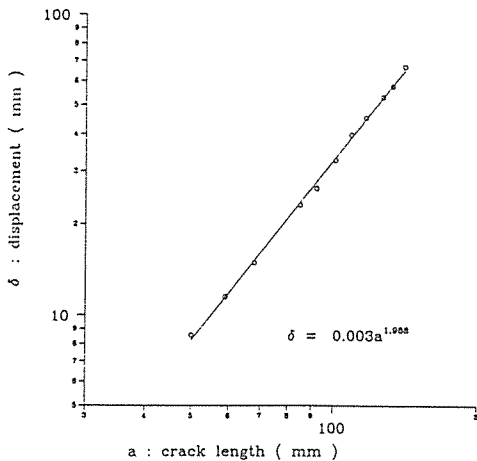


Fig. 5. Displacement versus crack length(Ref. 11)

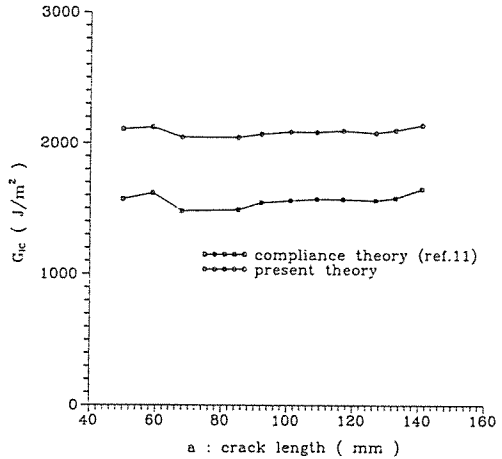


Fig. 6. Comparison between compliance theory and present theory(Ref. 11)

003 $a^{1.988}$ 로 전대수 그래프상으로 거의 직선에 가까움을 알 수 있어 본 이론의 적용 가능성을 확인할 수 있다. 이 변위와 균열 길이의 관계를 이용하여 본 이론에 적용시켜 파괴인성치를 구한 결과가 Fig. 6이다. 이 그래프로부터 파괴인성치를 선형해석 방법으로 구하는 것이 과소 평가됨을 재확인할 수 있었고 편차도 본 이론을 이용하여 구한 것 보다 심함을 알 수 있다. 따라서 본 이론을 이용하여 파괴인성치를 구하는 것이 쌍외팔보시편의 비선형 거동을 해석할 수 있기 때문에 선형해석시의 오차를 줄일 수 있다고 판단된다.

크로스헤드 속도가 일정하다더라도 변위가 증가함에 따라 균열 진전속도는 점차 감소한다. 따라서 하중속도의 변화와 아울러 균열 진전속도에 따른 파괴인성치의 변화를 알아 보는 것도 중요하다. 식(6)을 미분하여 정리하면 크로스헤드 속도에 따른 균열 진전속도를 알 수 있는데 아래와 같다.

$$a = 12.8 \delta^{0.55} \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{a} &= \frac{da}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \frac{d(12.8 \delta^{0.55})}{d\delta} \cdot \dot{\delta} \\ &= 7 \delta^{-0.45} \cdot \dot{\delta} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

크로스헤드 속도는 한 시편에 대해서는 일정하게 작용하지만 변위가 변함에 따라 균열 진전속도는 식(9)와 같이 변하게 된다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 변위가 증가함에 따라 균열 진전속도는 처음에는

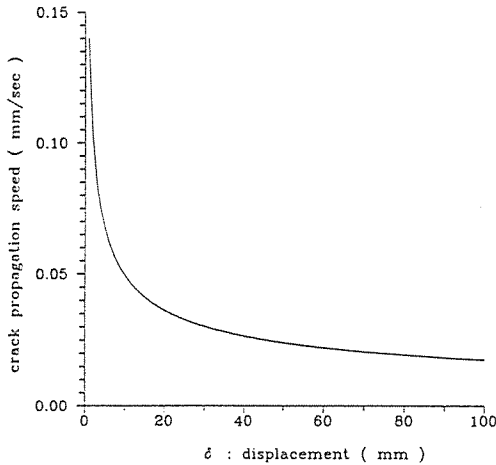


Fig. 7. Typical graph of crack propagation speed vs. displacement

급격히 감소하다가 후에는 서서히 감소함을 알 수 있다. 따라서 쌍외팔보시편을 제작하여 하중속도의 영향을 무시하고 저속 실험을 할 경우에도 초기 균열길이에 따라 파괴인성치는 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Hashemi등[12]의 논문과 일치하고 있으며 본 쌍외팔보시편에서는 변위가 20mm 이상되는 지점 즉 초기 균열길이가 최소 50mm 이상은 되어야 크로스헤드 속도가 일정함에 따라 파괴인성치도 일정한 값을 구할 수 있다.

식(6)~(9)로부터 구한 균열 진전속도에 따른 파괴인성치의 변화가 Fig. 8에 나와 있다. 크로스헤드 속도가 일정한 하나의 시편에 대해서도 균열 길이가 증가함에 따라 균열진전 속도가 변하고 있기 때문에 이 그래프는 균열진전에 따른 파괴인성치의 변화를 알아보는데 유용하다고 볼 수 있다. 이 그래프로부터 균열 진전속도가 25 mm/sec 부근에서 크로스헤드 속도가 일정함에도 불구하고 파괴인성이 크게 변함을 알 수 있다. 따라서 이 균열 진전속도 주위가 파괴인성치가 거의 일정한 정적하중 속도와 파괴인성치가 급격히 증가하는 고속하중 속도의 임계범위가 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

흑연/에폭시 쌍외팔보 시편을 제작, 실험하여 층간 파괴인성치에 미치는 하중속도의 영향을 연

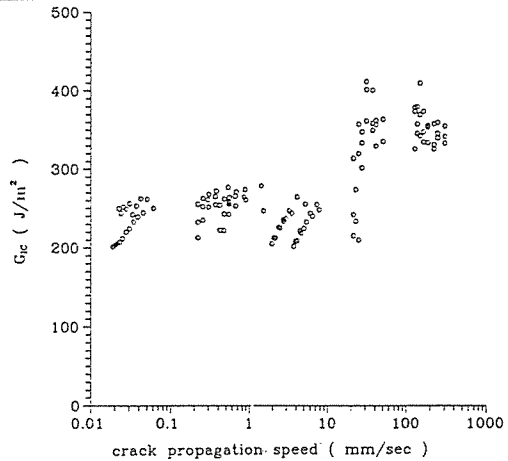


Fig. 8. Variation of G_{IC} with crack propagation speed

구하였다. 하중 속도가 2 mm/sec까지는 파괴인성치의 변화가 거의 없었으며 20 mm/sec 이상의 속도에서는 파괴인성치가 약 40% 이상 증가함을 알 수 있었다. 파괴인성치를 구하기 위하여 고속 시험시 한 시편에서 여러 개의 균열길이를 정확하게 측정할 수 있는 새로운 방법으로 변위를 일정한 위치에 정지하여 균열길이를 측정하는 방법을 제안하였다. 변위와 균열길이와의 관계는 하중 속도에 영향을 받지 않음을 확인하였고 이들 상관관계를 실험을 통하여 구함으로써 비선형 해석이 가능하였다. 또한 선형해석은 비선형 해석에 의하여 구한 파괴인성치 보다 과소 평가되어 왔음을 알 수 있었다. 본 시편에 대해서는 약 12%정도 과소평가되었다. 균열 진전속도에 따른 파괴인성치의 변화를 파악함으로써 정적하중과 고속하중의 임계 균열 진전속도가 25 mm/sec 근처임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Wilkins, D.J., J.R.Eisenmann, R.A.Camin, W.S.Margolis and R.A.Benson, "Characterizing Delamination Growth in Graphite/Epoxy", ASTM STP 775, pp.168-183, 1982.

2. Rankumar, R.L. and J.D. Whitcomb, "Characterization of Mode I and Mixed-Mode Delamination Growth in T300/5208 Graphite/Epoxy", ASTM STP 876, pp.315-335, 1985.
 3. Whitney, J.M., "Stress Analysis of the Double Cantilever beam Specimen", Composites Science and Technology, Vol.23, pp.201-219, 1985.
 4. Rybicki, E.F., T.D. Hernandez, J.E. Deibler, R.C. Knight and S.S. Vinson, "Mode I and Mixed Mode Energy Release Rate Values for Delamination of Graphite/Epoxy Test Specimens", J. of Composite Materials, Vol.21, pp.105-123, 1987.
 5. Williams, J.G., "Large Displacement and End Block Effects in the 'DCB' Interlaminar Test in Modes I and II", J. of Composite Materials, Vol.21, pp.330-347, 1987.
 6. El-Zein, M.S. and K.L. Reifsnider, "Evaluation of G_{IC} of a DCB Specimen Using an Anisotropic Solution", J. of Composites Technology and Research, Vol.10, No.4, pp.151-155, 1988.
 7. Hwang, W. and K.S. Han, "Interlaminar Fracture Behavior and Fiber Bridging of Glass-Epoxy Composite Under Mode I Static and Cyclic Loadings", J. of Composite Materials, Vol.23, pp.396-430, 1989.
 8. Hunston, D.L. and W.D. Bascom, "Effects of Lay-up, Temperature, and Loading Rate in Double Cantilever Beam Tests of Interlaminar Crack Growth", Composites Technology and Review, Vol.5, pp.118-119, 1983.
 9. Aliyu, A.A. and I.M. Daniel, "Effects of Strain Rate on Delamination Fracture Toughness of Graphite/Epoxy", ASTM STP 876, pp.336-348, 1985.
 10. Mall, S., G.E. Law and M. Katouzian, "Loading Rate Effect on Interlaminar Fracture Toughness of a Thermoplastic Composite", J. of Composite Materials, Vol.21, pp.569-579, 1987.
 11. Smiley, A.J. and R.B. Pipes, "Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials", J. of Composite Materials, Vol.21, pp.670-687, 1987.
 12. S. Hashemi, A.J. Kinloch and J.G. Williams, "The Effects of Geometry, Rate and Temperature on the Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Interlaminar Fracture of Carbon-Fibre/Poly(ether-ether ketone) Composites", J. of Composite Materials., Vol.24, pp.918-955, 1990.
-