

탄성일인자방법을 적용한 단일방향 탄소섬유/에폭시 DCB 시편의 파괴인성 결정

이 경 엽* · 이 중 희**

(1997년 4월 11일 접수)

G_{Ic} Determination of Unidirectional Graphite/Epoxy DCB Composites from the Elastic Work Factor Approach

K. Y. Rhee and Joong-Hee, Lee

Key Words : DCB Specimen(DCB 시편), Laminated Composites(적층복합재), Energy Release Rate(에너지방출률), Mode I Fracture Toughness(열림모드 파괴인성), Compliance(컴플라이언스), Elastic Work Factor Approach(탄성일인자방법), Compliance Calibration method(컴플라이언스 보정방법)

Abstract

Compliance calibration method is frequently used to determine G_{Ic} from the DCB composite specimen. However, the method requires at least 4 to 5 fracture test (loading-unloading) records. In this study, G_{Ic} of unidirectional graphite/epoxy DCB composites was determined from the elastic work factor approach which uses a single fracture test record. In order to inspect the validity of the elastic work factor approach, G_{Ic} determined from the elastic work factor approach was compared to that of determined from the compliance calibration method. It was shown that G_{Ic} determined from the elastic work factor approach was comparable to that determined from the compliance calibration method. That is, the elastic work factor approach can be used to determine G_{Ic} of unidirectional graphite/epoxy DCB specimen from a single fracture test record.

1. 서 론

최근 국내외적으로 항공기, 자동차, 에너지 등의 산업에서 금속재료의 대체 재료로서 섬유강화 적층복합재의 개발을 추구하고 있는 것은 자명한 사실이다. 왜냐하면 섬유강화 적층복합재를 이용함으로써 구조물의 경량화를 이룰 수 있으며, 따라서 에너지 경감을 가져올 수 있기 때문이다. 그러나 일반적으로 섬유강화 적층복합재는 층간분리라는 금

속재에서는 발생하지 않는 파괴가 발생하며, 이는 구조물의 피로수명 감소뿐 아니라 급격한 파괴도 야기시킬 수 있다. 따라서 적층복합재가 구조물 재료로 안전하게 이용되기 위해서는 층간분리에 대한 충분한 이해가 요구된다. 한편 열림모드 파괴형태는 복합재 구조물에 있어서 일반적이고 위험한 파괴형태로서 복합재를 적용한 구조물을 설계하기 위해서는 그 복합재의 열림모드 파괴특성과 파괴인성 값의 대한 데이터가 필수 불가결하다. DCB 시편은 순수 열림모드로 파괴가 발생하므로 복합재의 열림모드 파괴특성을 해석하기 위한 상당한 연구가 DCB 시편을 이용하여 이루어졌다.^(1~4)

*회원, 원광대학교 기계공학부

**전북대학교 신소재공학부

복합재 파괴역학에서 층간분리에 따른 파괴인성 값은 실험적으로 컴플라이언스방법⁽⁵⁾을 통해 결정되고 있다. 그러나 컴플라이언스방법은 최소한 4~5개의 각각 층간분리된 길이가 다른 시편 내지는 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 측정하기 위해 하중 및 제하하중(loading and unloading) 실험을 반복해야 하는 것으로서 시편 제작 및 실험의 불편함이 있다. 최근에 단일 DCB 시편으로부터 섬유강화 적층복합재의 열림모드 파괴인성, G_{Ic} 값을 결정하기 위한 시도로써 AS4/3501(graphite/epoxy) 적층복합재의 G_{Ic} 가 일인자방법(work factor approach)을 적용해 결정된 바 있다.⁽⁶⁾ 그러나 복합재 파괴역학에서 파괴인성을 측정하기 위해 일인자방법을 적용하는 연구는 초기 단계로서 일인자방법의 복합재 적용성에 대한 폭넓은 연구가 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 DCB 시편을 이용 한번의 파괴실험으로부터 G_{Ic} 값을 결정하기 위해 일인자방법을 적용하는 참고문헌(6)의 후속 연구로서 일인자방법을 탄소섬유/에폭시 DCB 시편에 적용하였다. 즉 0° 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 DCB 시편에 대해 파괴시험 수행 후 참고문헌(6)에서 유도한 탄성일인자를 이용하여 G_{Ic} 를 결정하였으며, 이를 컴플라이언스 보정방법(compliance calibration method)으로 결정한 G_{Ic} 와 비교하였다.

2. 시편제작 및 파괴실험

본 연구에서는 0° 단일방향의 24플라이로 적층

성형된 DCB 시편을 이용하여 파괴실험을 하였으며 이로부터 열림모드 파괴인성, G_{Ic} 를 결정하였다. 시편의 재료로서 열경화성 복합재인 CU125NS가 이용되었으며 이는 한국화이버 회사로부터 프리프레그형태로 제공되었다. CU125NS 복합재는 에폭시가 기지재료이며, 탄소섬유가 보강재로 배었다. CU125NS 프리프레그의 탄소섬유 함유율은 60%이다. 시편은 각개의 프리프레그를 금형 내에 같은 방향으로 적층한 후 오토클레이브 내에서 열과 압력을 가함으로써 성형되었다. 시편제작을 위하여 가해진 성형온도, 성형압력 및 성형시간은 Fig.1에 나타나 있다.

초기 층간분리는 정해진 층간분리 길이에($a=25$ mm) 따라 12번째 플라이와 13번째 플라이 중간에 캡톤(kapton) 막을 삽입함으로써 만들었다. 성형이 끝난 적층판은 커터를 이용하여 DCB 시험편(폭: 25 mm, 길이: 230 mm)으로 가공하였다. 시편의 한쪽 면은 층간분리 진전에 따른 길이의 측정을 위해 수정액을 바른 후 얇은 펜을 이용해 4 mm 간격으로 선을 그었다. 파괴실험은 용량이 2톤인 Zwick 파괴시험기를 사용하여 변위조정을 통한 일

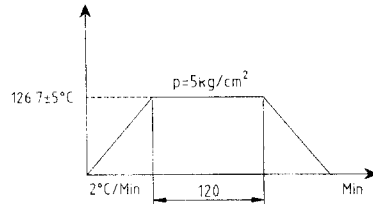


Fig. 1 Illustration of consolidation cycles.

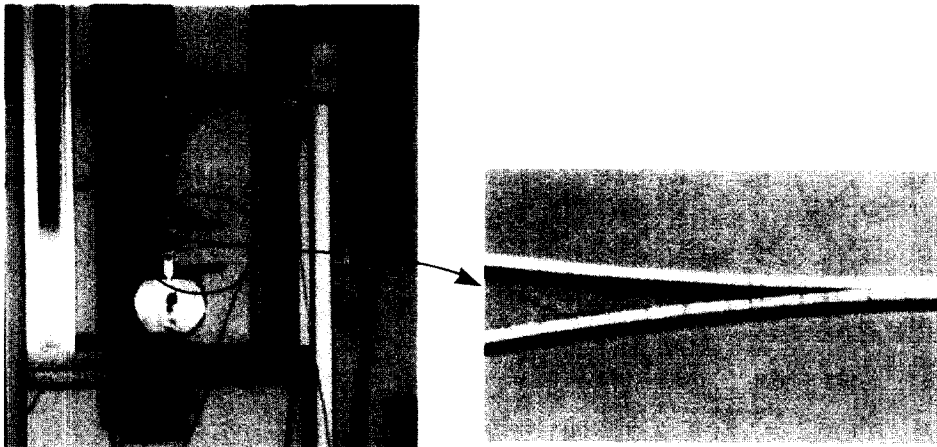


Fig. 2 Configuration of test apparatus and DCB specimen.

정변형률(3.5 mm/min) 하에 시행하였으며, 하중이 가해지는 점의 변형은 Zwick에 부착된 LVDT를 이용 10^{-3} mm 까지 측정하였다. Fig. 2는 본 연구에 이용된 파괴시험기와 DCB 시편을 나타낸다.

하중 증가에 따른 층간분리 진전은 이동현미경과 시편에 표시된 눈금을 이용해서 측정하였다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 층간분리 진전에 따른 G_{Ic} 값의 변화를 두 방법으로 결정하였다. 첫째는 ASTM-Standard D5528⁽⁷⁾에 명시된 컴플라이언스 보정방법에 따라 다음의 식을 이용해 결정하였다.

$$G_{Ic} = \frac{nP_{cr}\delta}{2Wa} \quad (1)$$

윗 식에서 W 는 DCB 시편의 폭을 나타내며 본 연구의 경우에는 $W=25$ mm이다. 또한 임계하중, P_{cr} 과 변위, δ 는 층간분리가 a 에서 $a+\Delta a$ 로 증가할 때의 임계하중과 변위를 나타낸다. 식 (1)에서 n 값은 층간분리 길이에 따른 컴플라이언스 값을 대수값으로 변환해 선형모사(linear fitting) 하였을 때 기울기 값을 나타낸다. 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 결정하기 위해서는 각 층간분리 길이에 대한 하중-변위선도가 필요하다. 층간분리 진전에 따른 하중-변위선도를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서처럼 층간분리가 시작하기 전까지는 하중은 변위에 대해 선형적으로 증가하다가 층간분리가 진행되기 시작하면 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 각 층간분리 길이에 대한 P_{cr} 은 하중

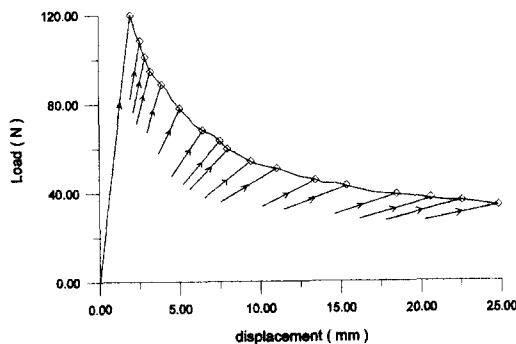


Fig. 3 Typical load (P) against displacement (δ) diagrams for delamination growth.

-변위선도에서 하중이 최고점에서 감소하기 시작하는 하중으로 결정하였다. 또한 컴플라이언스는 변위값을 그에 대한 P_{cr} 값으로 나눔으로써 측정하였다.

Fig. 4는 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스의 변화율 대수값으로 변환해 플로팅한 것을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 초기구간을 제외하면 컴플라이언스는 층간분리에 대해 선형적으로 증가한다. 층간분리의 초기단계에서 컴플라이언스가 비선형적으로 증가하는 것은 단일방향으로 적층된 DCB 시편의 경우 발생하는 현상으로 층간분리 후단에서의 섬유연결에 기인하는 것으로 고려된다. 본 연구에서는 Fig. 4에서 초기구간을 제외한 선형구간에 대해 최소오차자승법을 이용하여 n 값을 결정하였으며, 하중-변위선도의 P_{cr} 값을 적용하여 각 층간분리에 대한 G_{Ic} 값을 식 (1)을 이용해 계산하였다. 층간분리 진전에 따른 G_{Ic} 값의 변화는 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서처럼 열림모드 파괴인성치는 층간분리 증가에 따라 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

두번째 방법으로는 탄성일인자(elastic work factor) η_{el} 을 이용해 G_{Ic} 값을 결정하였다. 탄성일인자를 이용하여 파괴인성을 측정하는 방법의 장점은 층간분리에 따른 컴플라이언스의 변화를 측정하기 위해 하중-제하하중 실험을 반복해야 하는 불편함 없이 한번의 파괴실험으로 파괴인성 값을 결정할 수 있다는 것이다. DCB 시편의 경우 η_{el} 은 다음과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$\eta_{el} = 3 \left(\frac{L}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

윗 식에서 a 는 층간분리 길이를 L 은 DCB 시편

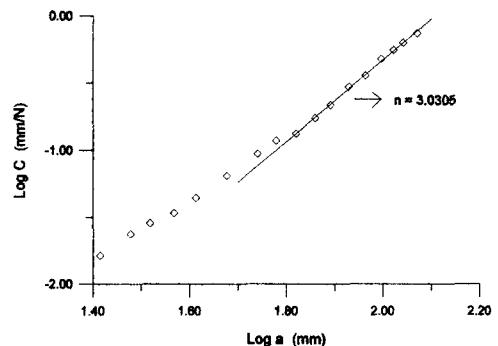


Fig. 4 Compliance variation against delamination increase in a log-log scale.

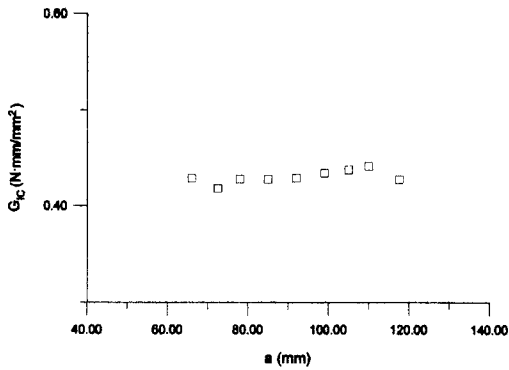


Fig. 5 G_{Ic} variation against delamination increase (compliance calibration method).

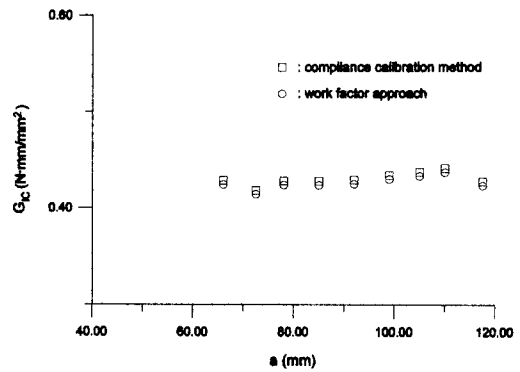


Fig. 7 Comparison of G_{Ic} determined from two ways: the work factor approach and the compliance calibration method.

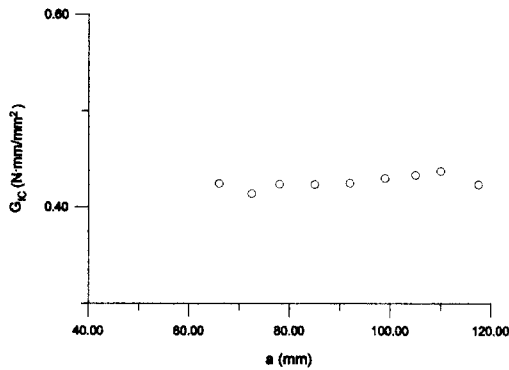


Fig. 6 G_{Ic} variation against delamination increase (work factor approach).

의 길이를 나타낸다. 식 (2)의 η_{el} 을 이용하였을 때 G_{Ic} 값은 다음과 같이 결정된다.⁽⁶⁾

$$G_{Ic} = \frac{3\left(\frac{L}{a} - 1\right)}{Wb} A_c \quad (3)$$

식 (3)에서 b 는 시편길이에서 층간분리 길이를 뺀 리가먼트, $(L-a)$ 를 나타내며, A_c 는 Fig. 3의 층간분리에 따른 하중(P)-변위(δ)곡선 하의 면적으로 $\frac{1}{2}P_{cr}\delta$ 로 계산된다. Fig. 6에는 탄성일인자를 적용하여 G_{Ic} 를 결정하였을 때 층간분리 길이에 따른 G_{Ic} 값의 변화를 나타내었다.

탄성일인자, 즉 식 (3)을 이용하여 결정한 파괴인성 값의 검증을 위하여 이를 컴플라이언스 보정 방법으로 결정한 파괴인성 값과 비교하였다. Fig. 7은 두 방법으로 결정한 파괴인성 값의 비교를 나타내고있다.

탄성일인자를 적용하여 측정하였을 때 G_{Ic} 값은 컴플라이언스 보정방법을 적용하였을 때보다 낮게 측정됨을 알 수 있다. 이는 컴플라이언스 보정방법 적용시 n 값이 3.03에(Fig. 4 참조) 기인한다. 그러나 Fig. 7에서처럼 두 방법은 최고 3.5%이내의 차이를 나타내고 있다. 즉, 이는 DCB 시편을 적용한 열림모드 파괴인성 값의 측정은 식 (3)을 이용해 한 번의 파괴실험으로부터 이루어질 수 있음을 보여준다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 0° 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재의 열림모드 파괴인성 값을 컴플라이언스 보정방법과 일인자방법을 적용해 결정 비교한 결과 두 방법은 비슷한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 즉 열림모드 파괴인성 값은 참고문헌 (6)에서 유도한 탄성일인자를 이용해 하중-제하하중 실험의 불편함없이 단일의 파괴실험으로부터 결정될 수 있다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 : ME 96-C-17)에 의하여 연구되었으며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- (1) Charentenay, F. X., Harry, J. M., Prel, Y. J.

- and Benzeggagh, M. L., 1984, "Characterizing the Effects of Delamination Defect by Mode I Delamination Test," *ASTM STP 836*, pp. 84~103.
- (2) Huang, X. N and Hull, D., 1989, "Effects of Fiber Bridging on G_{Ic} of a Unidirectional Glass/Epoxy Composites," *Composite Science and Technology*, Vol. 35, pp. 283~299.
- (3) Hu, X. Z and Mai, Y. W., 1993, "Mode I Delamination and Fiber Bridging in Carbon-Fiber/Epoxy Composites With and without Pval Coating," *Composite Science and Technology*, Vol. 46, pp. 147~156.
- (4) Charalambides, M. N. and Williams, J. G., 1994, "Fracture Toughness Characterization of Phenolic Resin and Its Composites," *Polymer Composites*, Vol. 16, pp. 17~28.
- (5) Griffith, A. A., 1920, "The Phenomena of Rupture and Flaw in Solids," *Transactions, Royal Society of London*, A-221.
- (6) 이경엽, 고승기 1996, "섬유강화 복합재의 G_{Ic} 결정을 위한 일인자방법" 대한기계학회논문집 (A), 제20권, 제11호, pp. 3491~3497.
- (7) ASTM D5528-94a, "Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites," *ASTM Standards*, Vol. 14.02, pp. 280~288.