

# 정수압을 받는 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재의 파괴인성 결정을 위한 일인자 적용

이 경 업\*

## Application of Work Factor to Determine Fracture Toughness of Unidirectional Graphite/Epoxy Composites under Hydrostatic Pressure

Kyong Yop Rhee

**Key Words:** pressure, elastic work factor, delamination, toughness

### Abstract

In this paper, the validity of work factor approach was investigated to determine compressive fracture toughness of unidirectional graphite/epoxy composites under hydrostatic pressure environment. The elastic work factor was determined under various pressures as a function of delamination length. It was found that elastic work factor was not affected by hydrostatic pressure.

### 1. 서 론

구조물 재료로서 PMC (고분자기지 복합재)의 적용은 강성이 높은 섬유의 개발과 인성이 향상된 기지재가 개발됨에 따라 각종 산업에서 혁신적으로 증가하고 있다. 이와 비례해 새로이 개발된 PMC에 대한 재료특성 (강도, 파괴, 피로) 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 온도, 해수, 수분 등 다양한 환경조건에서의 PMC에 대한 재료특성 이해는 항공우주 및 조선해양 산업에 PMC를 적용하기 위한 필수 불가결한 것으로서 위 환경조건하에서의 강도 및 파괴인성 변화에 대한 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1-3)</sup> 최근에는 잠수함 및 해저탐사선과 같은 해저구조물의 일부를 PMC로 제작하기 위해 정수압 환경에서의 PMC에 대한 재료특성 변화에 대한 연구결과가 발표되고 있다.<sup>(1-5)</sup> 정수압 환경에서의 파괴인성 측정은 컴플

라이언스방법<sup>(6)</sup>으로부터 이루어지고 있으나 이를 위해서는 4-5개의 균열길이가 서로 다른 시편이 필요하며 특히 각 균열길이에 대해 정수압을 증가시켜 실험해야 불편함이 있다.

따라서 본 연구에서는 단일시편으로부터 파괴인성을 결정할 수 있는 일인자방법이 정수압을 받는 PMC의 파괴인성 결정에도 적용될 수 있는지 검토하였다. 이를 위해 네 단계 초기 균열길이를 갖는 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 대해 대기압, 70MPa, 140MPa, 200MPa 정수압 하에서의 파괴실험을 시행하였으며 이로부터 네 경우의 정수압에 대한 탄성일인자 (elastic work factor)를 균열길이의 함수로 결정 비교하였다.

### 2. 탄성일인자

선형 파괴거동을 나타내는 재료에 대해서는 에너지 방출률,  $G$ 는 탄성일인자,  $\eta_c$ 를 적용하였

\* 경희대학교 기계·산업시스템공학부

을 때 다음과 같이 결정될 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$G = \frac{\eta_{el}}{Bb} A_{el} \quad (1)$$

윗 식에서 "b"는 리가먼트이며 "B"는 두께를,  $A_{el}$ 은 하중(P)-변형(v) 곡선하의 면적이며  $\frac{Pv}{2}$ 와 같다. 한편 에너지 방출률은 컴플라이언스 방법을 이용하면 다음과 같이 구해진다.<sup>(6)</sup>

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2)$$

윗 식에서 "C"는 컴플라이언스이며 "a"는 균열길이를 나타낸다. 식 (1)와 식 (2)로부터 탄성일인자,  $\eta_{el}$ 은 다음과 같이 결정된다.<sup>(7)</sup>

$$\eta_{el} = \frac{b}{C} \frac{dC}{da} \quad (3)$$

CLS 시편의 경우 탄성일인자는 적층성에 대해 영향을 받지 않는다는 것이 발표된 바 있다. 따라서 본 연구에 사용된 시편에 있어 탄성일인자가 정수압에 대해 영향을 받지 않으며 단지 층간분리 길이만의 함수라 하면 파괴인성 값은 식 (1)을 이용해 하나의 시편으로부터 구할 수 있다.

### 3. 실험

정수압 하의 압축 파괴실험은 700MPa까지 정수압을 가할 수 있는 고압 인장-압축 기기를 이용하여 대기압 및 70MPa, 140MPa, 200MPa 크기의 정수압을 가한 상태에서 시행하였다. 파괴시편은 (주) 한국화이버에서 생산하는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(CU125NS)를 0° 단일방향으로 88층 적층하여 오토클레이브 내에서 성형하였다. 성형된 판의 두께는 약 10.8 mm이다. 탄성일인자를 균열길이의 함수로 결정하기 위해 네 단계의 초기 층간분리 길이를 갖는 시편을 제작하였으며 초기 층간분리는 44층과 45층 사이에 두께가 약 13μm 캡톤막을 삽입하여 형성하였다. 시편은 압축력에 따른 양단에서의 파괴가 발생하지 않도록 양끝은 직경이 10mm, 가운데 부분은 폭 및 두께가 각각

7mm인 도그본(dog-bone) 형태로 가공하였다. Fig.1은 본 연구에 사용된 시편의 모양, 크기, 네 단계의 초기 층간분리 길이를 나타내고 있다. 시편의 표면은 시험장치 내의 실리콘 오일에 의한 흡수효과를 최소화하기 위해 방수막으로 처리하였다. 압축 파괴실험은 1.0mm/min의 일정 변형률 속도 하에서 시행하였으며 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번의 실험을 각각의 같은 압력 조건하에서 반복하여 시행하였다.

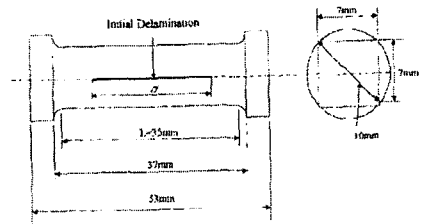


Fig.1 Dog-bone type test sample

### 4. 결과

Fig.2는  $a/L=0.34$  ( $L$ :게이지 길이)인 경우 네 정수압 하에서의 대표적인 압축응력-압축변형률 선도를 나타낸다.

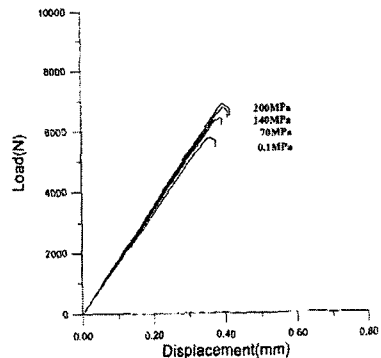


Fig.2 Typical load-displacement curves obtained at various hydrostatic pressures for  $a/L=0.34$

Fig.2 나타나 있듯이 정수압 변화에 상관없이 파괴거동은 선형적임을 알 수 있다. Fig.3은 정수압 및 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 나타내고 있다. 컴플라이언스는 변위를 하중으로 나눈 값으로서 각 정수압에 대한 하중-변위 선도의 기울기를 측정 이에 대한 역수를 취함으로써 결정하였다.

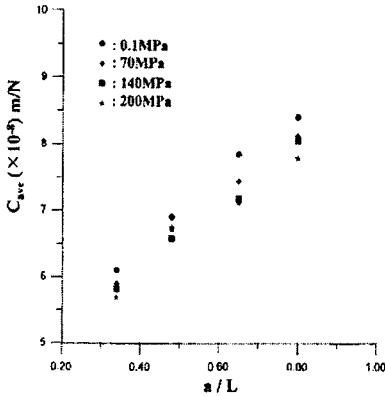


Fig.3 Compliance change as a function of delamination for each hydrostatic pressure

그림에 나타나 있듯이 각 정수압에 있어 층간분리가 증가함에 따라 컴플라이언스는 선형으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 최소 자승법을 이용해 각 정수압에 대한 평균 컴플라이언스의 층간분리에 대한 증가를 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C = 5.04 \frac{a}{L} + 4.45 \quad ; \quad 0.1\text{MPa} \quad (4)$$

$$C = 4.74 \frac{a}{L} + 4.35 \quad ; \quad 70\text{MPa} \quad (5)$$

$$C = 4.68 \frac{a}{L} + 4.24 \quad ; \quad 140\text{MPa} \quad (6)$$

$$C = 4.50 \frac{a}{L} + 4.19 \quad ; \quad 200\text{MPa} \quad (7)$$

정수압 증가가 탄성일인자에 미치는 영향을 이해하기 위해 네 경우 정수압에 따른 탄성일인자를 층간분리 길이의 함수로 나타내었다. 각 정수압에 따른 탄성일인자는 식 (4)-(7)로부터 컴플라이언스 및 그에 따른 도함수를 구하고 이를 식

(3)에 대입하여 결정하였다. Fig.4는 네 경우 정수압에 있어 층간분리 길이 증가에 따른 탄성일인자 변화를 나타낸다.

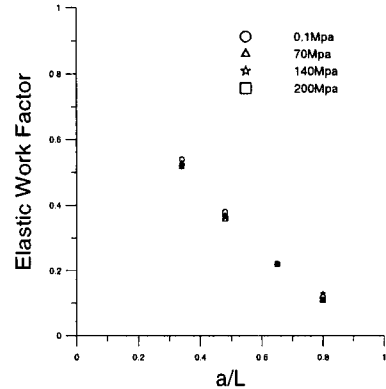


Fig.4 Variation of elastic work factor as a function of delamination for each hydrostatic pressure.

Fig.4에 나타나 있듯이 탄성일인자는 층간분리가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 또한 Fig.4는 탄성일인자가 정수압에 의해 영향을 받지 않음을 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 정수압이 탄성일인자에 미치는 영향을 검토하였다. 결론으로는 탄성일인자는 정수압에 의해 영향을 받지 않으며, 따라서 정수압을 받는 일방향 탄소섬유/에폭시 복합체의 파괴인성은 일인자방법을 적용해 한번의 파괴시험으로부터 결정될 수 있다.

## 6. 인용문헌

- (1) Russell, A.J. and Street, K.N., "Moisture and Temperature Effects on the Mode I and Mode II Interlaminar Fracture of Graphite/Epoxy Composites." Key Engin-

- Engineering Materials, Vol.37, pp.199-208, 1989
- (2) Hooper, S. J. and Subramanian, R., 1993, "Effects of Water and Jet Fuel Absorption on Mode I and Mode II Delamination of Graphite/Epoxy," ASTM STP 1156, pp.31-340, 1993
- (3) Uematsu, Y., Kitamura, T. and Ohtani, R., "Delamination Behavior of a Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Polymer at High Temperature," Composite Science and Technology, Vol.53, pp.333-342, 1995
- (4) Pae, K.D. and Carlson, K.S., 1998, The Combined Effects of Hydrostatic Pressure and Strain-Rate on the Compressive Properties of a Laminated, Multi-Directional Graphite/Epoxy Thick Composites," J. of Composite Materials, Vol.32, pp.49-67, 1998
- (5) Rhee, K.Y., "Hydrostatic Pressure Effect on the Fracture Toughness of Unidirectional(0-deg) Graphite/Epoxy Laminated Composites", J. of Composite Materials, Vol.34, pp.599-613, 2000
- (6) Broek, D., 1986, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Fourth Edition, Martinus Nijhoff Publishers
- (7) Rhee, K.Y. and Ernst, H.A., "Method for Computing Energy Release Rate Using the Elastic Work Factor Approach," J. of Composite Materials, Vol.26, pp.2028-2044, 1992