

## 論文

정수압 환경에서 압축하중을 받는 Graphite/Epoxy 적층복합재의  
탄성일인자 결정

신명근\*, 이경엽\*\*, 이중희\*\*\*

Determination of Elastic Work Factor of Graphite/Epoxy Composites Subjected to  
Compressive Loading under Hydrostatic Pressure Environment

Myung Keun Shin\*, Kyong Yop Rhee\*\*, Joong Hee Lee\*\*\*

## ABSTRACT

In the present study, we investigated the effects of hydrostatic pressure and stacking sequence on the elastic work factor to determine compressive fracture toughness of graphite/epoxy laminated composites in the hydrostatic pressure environment. The stacking sequences used were unidirectional,  $[0^\circ]_{88}$  and multi-directional,  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{115}$ . The hydrostatic pressures applied for a  $[0^\circ]_{88}$  case were 0.1MPa, 70MPa, 140MPa, and 200MPa. The hydrostatic pressures applied for a  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{115}$  case were 0.1MPa, 100MPa, 200MPa, and 300MPa. It was found that the elastic work factor was not affected by the hydrostatic pressure and the stacking sequence. Also, it was found that the elastic work factor decreased in a linear fashion with delamination length.

## 초 록

본 논문에서는 정수압 환경에서 파괴인성 측정을 위한 일인자방법의 적용성을 검토하기 위해 단일방향 및 준등방성으로 적층된  $[0^\circ]_{88}$  및  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{115}$ 의 탄소섬유/에폭시 적층복합재에 있어 네 단계 정수압에 대해 탄성일인자를 층간 분리 길이의 함수로 결정 정수압 및 적층각이 탄성일인자에 미치는 영향을 검토하였다.  $[0^\circ]_{88}$  경우에는 0.1MPa, 70MPa, 140MPa, 200MPa의 정수압력을 적용하였으며  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{115}$  경우에는 0.1MPa, 100MPa, 200MPa, 300MPa의 정수압력을 적용하였다. 결과로서 탄성일인자는 정수압 및 두 경우 적층각에 의해 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 또한 탄성일인자는 층간분리가 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

최근 들어 잠수함 및 해저탐사선과 같은 해저구조물의 일부를 탄소섬유/에폭시 복합재로 제작하기 위해 정수압 환경에서 탄소섬유/에폭시의 재료특성 변화에 대한 연구결과가 발표되고 있다[1-8]. 정수압 환경에서 탄소섬유/에폭시 복합재에 대한 재료특성 변화에 대한 연구는 정수압이 인장[1-2], 압축[3-4], 비틀림[5-6] 특성에 미치는 영향에 대한 것이 주로 이루어졌다. 그러나 정수압 환경에서 탄소섬유/

에폭시 복합재에 대한 압축 파괴특성 변화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태이다. 최근에 단일방향과 준등방성으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 정수압 환경이 압축 파괴인성에 미치는 영향에 대한 논문이 발표된 바 있다[7-8].

정수압 환경에서 섬유강화 적층복합재의 파괴인성 값은 컴플라이언스 방법을 적용해 결정되고 있다. 그러나 파괴인성을 측정하기 위해 컴플라이언스 방법을 적용하는 데는 균열길이 증가에 따른 컴플라이언스의 변화를 측정하기 위

\* 경희대학교 기계공학과 대학원

\*\*+ 경희대학교 기계산업시스템공학부, 교신저자(E-mail: rheeky@khu.ac.kr)

\*\*\* 전북대학교 신소재공학과

해 균열길이가 서로 다른 4-5개의 시편이 요구되는 단점이 있다. 특히 본 연구에서처럼 다양한 정수압에서 파괴시험을 하기 위해서는 시험장치 내의 정수압을 정해진 압력까지 증가시키는데 상당한 시간이 요구될 뿐만 아니라 시편의 실리콘 오일에 의한 흡수효과를 최소화하기 위해 시편 표면을 방수막으로 처리하여야 하는 불편함이 있다. 따라서 정수압이 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축 파괴특성에 미치는 영향에 대한 활발한 연구를 위해서는 최소한의 시편을 적용해 정수압 환경에서 파괴인성을 측정할 수 있는 방법 개발이 필요하다. 정수압 환경이 아닌 대기압 환경의 경우 일인자 방법을 적용해 한 번의 파괴시험으로부터 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 압축 파괴인성을 결정할 수 있음이 발표된 바 있다[9].

본 논문에서는 정수압 환경에서도 일인자 방법을 적용해 압축 파괴인성을 측정할 수 있는가를 연구하기 위해 정수압 및 적층각이 탄성일인자에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해  $[0^\circ]_{88}$ 의 단일방향 및  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]_{11s}$ 의 준등방성으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 네 단계 정수압에 대해 탄성일인자를 층간분리 길이의 함수로 결정 정수압 및 적층각이 탄성일인자에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 압축파괴시편 제작

압축 파괴시편은 (주)한국카본에서 생산하는 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (CU125NS)를 사용하여 제작하였다. CU125NS 프리프레그의 탄소섬유 함유율은 약 64%이다. 시편 성형은 88층의 프리프레그를 45 cm × 25 cm 크기의 금형 내에  $[0^\circ]_{88}$  및  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$ 로 적층한 후 오토클레이브 내에서 성형하였다. 성형된 판 두께는 약 10.8mm이다. Fig. 1은 탄소섬유/에폭시 복합재 성형에 이용된 성형온도 및 압력을 나타낸다.

정수압 및 층간분리 증가에 따른 탄성일인자를 결정하기 위해 4 단계의 초기 층간분리 길이를 갖는 시편을 제작하였으며 초기 층간분리는 44층과 45층 사이에 두께가 약 13μm 캡톤 막을 삽입하여 형성하였다. 시편은 압축력에 따른 양단에서의 파괴(end-crushing)가 발생하지 않도록 양 끝은 직경이 10mm, 가운데 부분은 폭 및 두께가 각각 7mm인 도그본(dogbone) 형태로 가공하였다. 시편의 모양 및 크기는 Fig. 2에 나타나 있다. 시편표면은 시험장치 내의 실리콘 오일에 의한 흡수효과를 최소화하기 위해 방수막으로 처리하였다.

### 2.2 정수압 환경에서의 압축파괴 시험

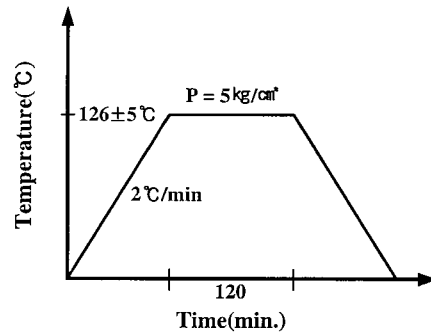
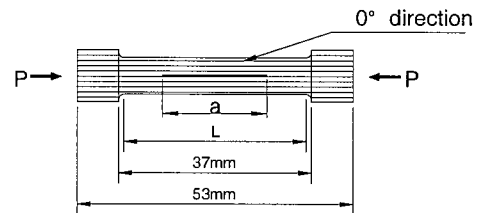


Fig. 1 Illustration of consolidation cycle.



a : initial crack length (12, 17, 23, 28 mm)  
L : gauge length (35mm)  
b : remaining ligament (L-a)  
B : specimen thickness (7mm)

Fig. 2 Schematic diagram of test sample.

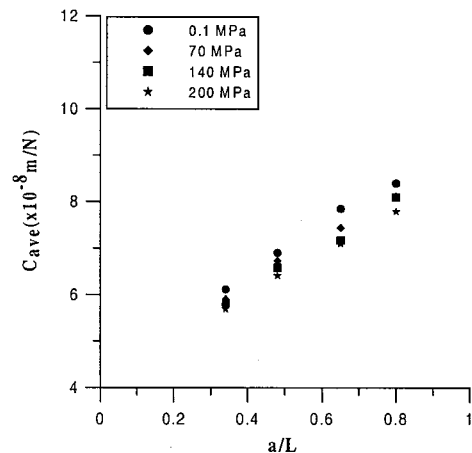


Fig. 3 Average compliance change as a function of delamination at each hydrostatic pressure for a  $[0^\circ]_{88}$  case.

압축 파괴시험은 700 MPa까지 정수압을 가할 수 있는 고압 인장-압축 기기를 이용하여  $[0^\circ]_{88}$ 인 경우에는 대기압

(0.1 MPa) 및 70 MPa, 140 MPa, 200 MPa 크기의 정수압을 가한 상태에서 시행하였으며  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$ 인 경우에는 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa 크기의 정수압을 가한 상태에서 시행하였다. 고압 인장-압축 기기의 개략도는 참고문헌[8]에 나타나 있다. 압축 파괴실험은 1.0 mm/min의 일정 변형률 속도 하에서 시행하였으며 실험에 따른 하중 및 하중점의 변형 데이터는 LABTECH NOTEBOOK (version 6.3) 프로그램을 이용 취합 및 해석하였다. 파괴실험은 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번의 실험을 각 압력에 대해 수행하였다.

### 3. 탄성일인자

선형 파괴거동을 나타내는 재료에 있어 에너지 방출률은 탄성일인자,  $\eta_{el}$ 을 적용하였을 때 다음과 같이 결정될 수 있다[10].

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

윗 식에서 “G”는 에너지 방출률을, “b”는 리가먼트를, “B”는 두께를 나타낸다. 또한  $A_{el}$ 은 하중(P)-변형( $\nu$ ) 곡선하의 면적이며  $\frac{P\nu}{2}$ 와 같다. 한편 에너지 방출률은 컴플라이언스 방법을 이용하면 다음과 같이 구해진다[11].

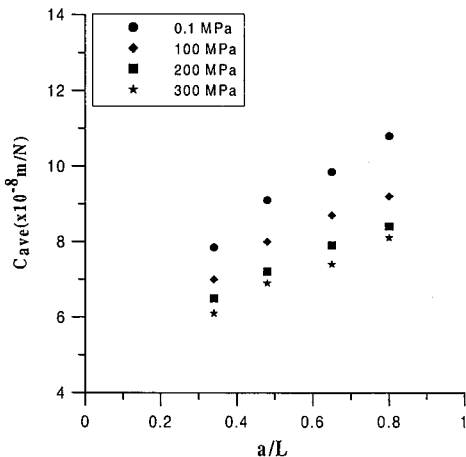


Fig. 4 Average compliance change as a function of delamination at each hydrostatic pressure for a  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$  case.

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

윗 식에서 “C”는 컴플라이언스이며 “a”는 균열길이를 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)로부터  $\eta_{el}$ 은 다음과 같이 결정된다 [10].

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

대기압 환경에서 CLS 시편의 경우  $\eta_{el}$ 은 적층각에 대해 영향을 받지 않는다는 것이 발표된 바 있다[9]. 만약 본 연구에 사용된 시편 경우  $\eta_{el}$ 이 정수압 및 적층각에 의해 영향을 받지 않으며 단지 층간분리 길이만의 함수라 하면 정수압 환경에서도 파괴인성 값은 식 (1)을 이용해 한 번의 파괴시험으로부터 결정할 수 있다.

### 4. 결과 및 고찰

탄성일인자를 결정하기 위해서는 식 (3)에 나타나 있듯이 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화가 결정되어야 한다. 정수압 및 적층각이 탄성일인자에 미치는 영향을 결정하기 위해 두 적층각 경우에 대해 정수압 및 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 결정하였다. 컴플라이언스는 변위를 하중으로 나눈 값으로서 각 정수압에 대한 하중-변위 선도의 기울기를 측정 이에 대한 역수를 취함으로써 결정하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 두 경우 적층각을 갖는 시편에 있어 정수압 및 층간분리 증가에 따른 최소 및 최대 컴플라이언스를 평균한 평균 컴플라이언스 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타나 있듯이 두 경우 모두 각 정수압에 있어 층간분리가 증가함에 따라 평균 컴플라이언스는 선형으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 최소 자승법을 이용해 각 정수압에 대한 평균 컴플라이언스의 층간분리에 대한 증가를 1차식으로 나타내면  $[0^\circ]_{88}$ 의 경우 다음과 같다[7].

$$C_{ave} = 4.45 + 5.04 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 0.1 MPa \quad (4)$$

$$C_{ave} = 4.35 + 4.74 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 70 MPa \quad (5)$$

$$C_{ave} = 4.24 + 4.68 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 140 MPa \quad (6)$$

$$C_{ave} = 4.19 + 4.50 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 200 MPa \quad (7)$$

또한  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$  경우의 평균 컴플라이언스는 다음과 같다[8].

$$C_{ave} = 5.73 + 6.01 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 0.1 MPa \quad (8)$$

$$C_{ave} = 5.33 + 5.23 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 100 MPa \quad (9)$$

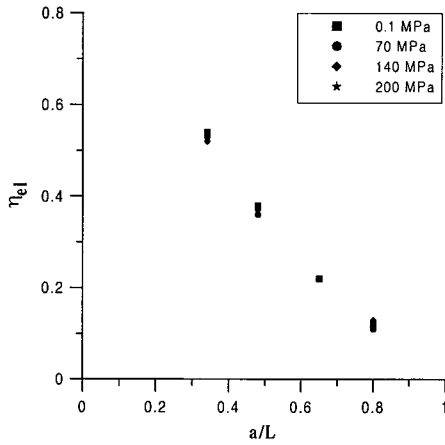


Fig. 5 Variation of elastic work factor as a function of delamination at each hydrostatic pressure for a  $[0^\circ]_{88}$  case.

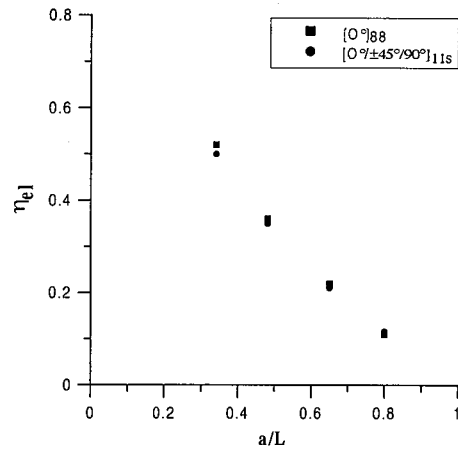


Fig. 7 Comparison of elastic work factor of  $[0^\circ]_{88}$  case with that of  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$  case for a 200MPa hydrostatic pressure.

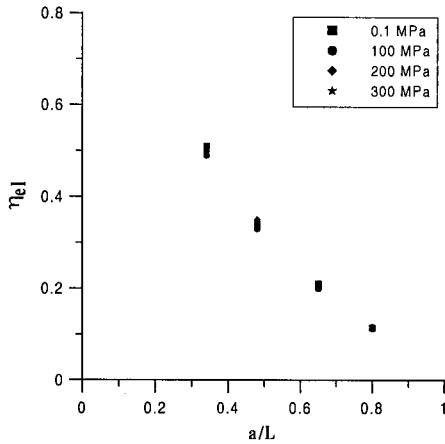


Fig. 6 Variation of elastic work factor as a function of delamination at each hydrostatic pressure for a  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$  case.

$$C_{ave} = 4.97 + 4.87 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 200MPa \quad (10)$$

$$C_{ave} = 4.75 + 4.60 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 300MPa \quad (11)$$

식 (4)-(11)에서  $C_{ave}$ 는 평균 컴플라이언스를, “a”는 층간 분리 길이를, “L”은 게이지 길이를 나타낸다.  $[0^\circ]_{88}$ 의 경우 각 정수압 및 층간분리 길이에 따른 탄성일인자는 식 (4)-(7)로부터 컴플라이언스 및 그에 따른 도함수를 구하고 이를 식 (3)에 대입하여 결정하였다. Fig. 5는 네 경우 정수압에 있어 층간분리 길이 증가에 따른 탄성일인자 변화를 나타낸다. Fig. 5에 나타나 있듯이 탄성일인자는 층간분리 길이가 일정할 경우 정수압 증가에 의해 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5는 층간분리 길이가 증가함에

따라 탄성일인자는 선형적으로 감소함을 나타내고 있다.

$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$  경우도 각 정수압 및 층간분리 길이에 따른 탄성일인자는 식 (8)-(11)로부터 컴플라이언스 및 그에 따른 도함수를 구하고 이를 식 (3)에 대입하여 결정하였다. Fig. 6은 네 경우 정수압에 있어 층간분리 길이 증가에 따른 탄성일인자 변화를 나타낸다. Fig. 6에 나타나 있듯이 탄성일인자는  $[0^\circ]_{88}$ 의 경우와 같이 층간분리 길이가 일정할 경우 정수압에 의해 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서 탄성일인자는 층간분리 길이가 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

적층각이 탄성일인자에 미치는 영향을 해석하기 위해 두 경우 적층각에 대한 탄성일인자를 비교하였다. 두 적층각 모두 탄성일인자는 정수압에 의해 영향을 받지 않음으로 200MPa 정수압 경우에 대한 탄성일인자를 비교하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다. 그럼에 나타나 있듯이 각 층간분리 길이에 있어 두 적층각 모두 탄성일인자는 거의 같은 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 탄성일인자가 두 경우 적층각에 영향을 받지 않음을 나타낸다 하겠다. 또한 탄성일인자는 층간분리가 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 최소 자승법을 이용해 탄성일인자를 층간분리 길이에 대해 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\eta_{el} = 0.83 - 0.91 \frac{a}{L} \quad (12)$$

## 5. 결 론

본 연구에서는 압축하중을 받는 탄소섬유/에폭시 적층복

합재에서 정수압 및 적층각이 탄성일인자에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 즉  $[0^\circ]_{88}$  및  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{115}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시에 있어 네 단계 정수압에 대해 탄성일인자를 층간분리 길이의 함수로 결정하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다. 첫째, 탄성일인자는 정수압과 두 경우 적층각에 의해 영향을 받지 않는다. 둘째, 탄성일인자는 층간분리가 증가함에 따라 선형적으로 감소한다.

*J. of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 2028-2044.

- 10) Rice J.R., Paris P.C. and Merkle J.G. Some Further Results of J-integral Analysis and Estimates. ASTM STP 536 1973 231-235.
- 11) Broek, D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics," Fourth Edition, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

## 참고문헌

- 1) Wronski, A.S. and Parry, T.V., "Compressive Failure and Kinking in the Uniaxially Alligned Glass-Resin Composite under Superimposed Hydrostatic Pressure," *J. of Materials Science*, Vol. 20, 1982, pp. 3656-3662.
- 2) Zinoviev P.A., Tsvetkov S.V. "Mechanical properties of unidirectional organic-fiber-reinforced plastics under hydrostatic pressure," *Compos. Sci. Technol.* Vol. 58, 1998, pp. 31-39.
- 3) K.Y. Rhee and K.D. Pae, "Effects of Hydrostatic Pressure on the Compressive Properties of Laminated  $0^\circ$  Unidirectional Behavior of Graphite Fiber/Epoxy Thick Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 29, 1995, pp. 1295-1307.
- 4) Pae, K. D. and Carlson, K. S., "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, 1998, pp. 49-67.
- 5) Shin, E. S. and Pae, K. D., "Effects of Hydrostatic Pressure on the Torsional Behavior of Graphite/Epoxy Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 462-485.
- 6) Shin, E. S. and Pae, K. D., "Effects of Hydrostatic Pressure on In-Plane Shear Properties of Graphite/Epoxy Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 828-868.
- 7) Rhee, K.Y., "Hydrostatic Pressure Effect on the Fracture Toughness of Unidirectional ( $0^\circ$ -deg) Graphite/Epoxy Laminated Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 34, 2000, pp. 599-613.
- 8) 이경엽, 박대순, 김상녕, 이중희, "준등방성 적층복합재에 있어 압력이 압축 파괴인성에 미치는 영향에 대한 연구," *한국복합재료학회지*, 제14권 제3호, 2001, pp. 51-56.
- 9) Rhee, K.Y. and Ernst, H.A. "Method for Computing Energy Release Rate Using the Elastic Work Factor Approach,"