

# 정수압 조건에서 변형률 변화가 섬유강화 복합재의 층간분리인성에 미치는 영향에 대한 연구

하성록\*, 이경엽#, 김현주\*\*, 정동호\*\*

An investigation of the strain rate effect on the delamination toughness of fiber-reinforced composites in the hydrostatic pressure condition

Sung Rok Ha\*, Kyong Yop Rhee#, Hyeon Ju Kim\*\*, Dong Ho Jung\*\*

## ABSTRACT

It is generally accepted that fracture toughness of fiber-reinforced polymer composites is affected by strain rate in an atmospheric pressure condition. For a present study, the strain rate effect on the fracture toughness of fiber-reinforced laminated composites in the hydrostatic pressure condition was investigated. For this purpose, fracture tests have been conducted using graphite/epoxy laminated composites applying three steps of the strain rate at 270 MPa hydrostatic pressure condition. The strain rates applied were 0.05 %/sec, 0.25 %/sec, and 0.55 %/sec. Fracture toughness was determined from the work factor approach as a function of applied strain rate. The result showed that fracture toughness decreased as the strain rate increased. Specifically, the fracture toughness decreased 12% as the strain rate increased from 0.05 %/sec to 0.55 %/sec.

**Key Words** : Delamination (층간분리), Fracture Toughness (파괴인성), Graphite/Epoxy Composites (탄소섬유/에폭시 복합재), Hydrostatic Pressure (정수압력)

## 1. 서론

섬유강화 고분자기지 복합재가 금속재료에 비해 비강성 및 비강도가 우수하다는 것은 잘 알려진 사실로서 다양한 산업에서 사용이 급증하고 있다.

특히 섬유강화 고분자기지 복합재는 해수에 대한 부식특성이 우수해 석유시추를 위한 플랫폼 및 잠수함 등과 같은 해저구조물 제작에 적용성이 증가하고 있다. 이와 같은 섬유강화 고분자기지

복합재 중 탄소섬유/에폭시 복합재는 기계적 특성이 우수해 해저구조재로서 적용성이 유망한 구조재이다. 따라서 탄소섬유/에폭시 복합재를 해저구조재로 적용하기 위해 다양한 환경에서 기계적 특성변화에 대한 연구가 이루어졌다.<sup>1-4</sup> 이와 같은 환경영향에 대한 연구 중 하나가 정수압력이 가해진 상태에서의 기계적 특성 변화에 대한 연구이다.<sup>5-9</sup> 정수압력 환경에서 탄소섬유/에폭시 복합재에 대한 연구는 인장, 압축, 전단 특성분야로 이루어

접수일: 2005년 4월 12일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

\* 경희대학교 기계공학과

# 교신저자 : 경희대학교 테크노공과대학

E-mail rheeky@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2565

\*\* 한국해양연구원

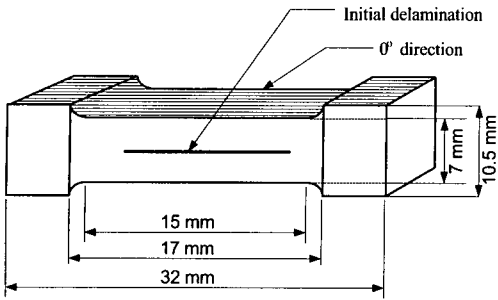


Fig. 1 Schematic diagram of compressive dogbone fracture specimen

어졌다. 결과로서 정수압력이 증가함에 따라 인장강도와 인장강성이 비례해 증가한다는 것이 알려져 있다. 전단 및 압축특성의 경우에도 강도는 정수압력에 비례해 증가하는 것으로 발표된 바 있다. 그러나 전단계수 및 압축탄성계수는 인장탄성계수와는 달리 200 MPa의 정수압력을 전후로서 다른 기울기로 증가한다는 것이 발표된 바 있다. 또한 200MPa를 중심으로 에폭시의 유리전이이 발생한다는 것으로 알려져 있다. 이에 비해 정수압력 환경에서 탄소섬유/에폭시 복합재의 파괴특성에 대한 연구는 소수만 이루어진 상태에서 정수압력이 대기압에서 300 MPa로 증가할 때 파괴인성은 36% 증가한다는 것이 Rhee 등에 의해 발표된 바 있다.<sup>10</sup> 한편 대기압 환경의 경우 변형률 속도에 의해 섬유강화 고분자기지 복합재의 파괴특성이 영향을 받는다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 정수압력 환경에서 변형률 속도가 섬유강화 고분자기지 복합재의 파괴인성에 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 본 논문에서는 정수압력을 받는 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 유리전이이 발생한 이후에 변형률 속도가 파괴특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이를 위해 두꺼운 두께로 적층된 탄소섬유/에폭시 적층복합재에 대해 270 MPa의 정수압력을 유지한 후 세 경우의 변형률 속도를 적용하여 파괴시험을 수행하였다. 이로부터 변형률 속도에 따른 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 파괴인성 변화에 대해 검토하였다.

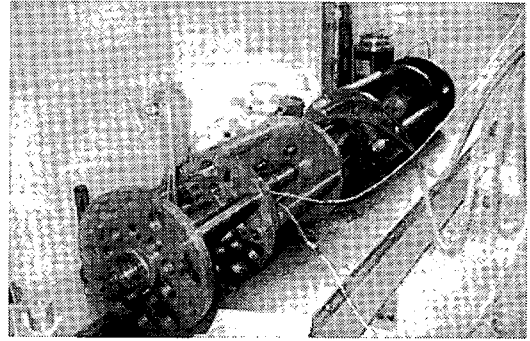


Fig. 2 Photograph of high pressure tension-compression apparatus

## 2. 시편제작 및 실험방법

본 연구에 사용한 파괴시편은 S.K Chemical에서 생산하는 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (USN 150B)를 사용하여 제작하였다. 시편제작을 위해 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 0° 단일방향으로 88 플라이 적층한 후 오토클레이브 내에서 열 및 압력을 가함으로써 성형하였다. 성형온도는 130 °C, 성형시간은 90 분으로, 성형압력은 0.5 MPa로 하였다. 초기 층간분리를 형성하기 위해서 적층시 알루미늄 포일 (두께: 약 13 μm)을 44 플라이와 45 플라이 사이에 삽입하였다. 성형이 끝난 적층판은 압축력에 따른 양단에서의 파괴가 발생하지 않도록 양 끝은 10.5 mm, 가운데 부분은 폭 및 두께가 각각 7 mm인 도그본(dog-bone) 형태로 가공하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 압축파괴 시편의 형상을 나타낸다.

압축실험은 정수압 환경에서 변형률 속도에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축특성 변화를 해석하기 위해 고압 인장-압축기기를 이용하여 270 MPa의 정수압을 가한 상태에서 세 단계의 변형률 속도를 적용하여 시행하였다. 적용된 변형률 속도는 0.05 %/sec, 0.25 %/sec, 0.55 %/sec 이다. 압축 실험에 따른 하중 및 변형 데이터는 IBM PC에 설치된 LABTECH NOTEBOOK (version 6.3) 프로그램을 이용 취합 및 해석하였다. 파괴시험 동안 시험장비 내의 압력매개체인 실리콘 오일이 시편 표면에 흡수되는 것을 최소화하기 위해 시편의 표면을 방수막으로 처리하였다. 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번 이상의 실험을 각각의 같은 변형률 속도 조건하에서 반복하여 시

행하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 고압 인장-압축장비를 나타낸다.

### 3. 일인자 방법

일반적으로 섬유강화 고분자기지 복합체에 있어 에너지 방출률은 컴플라이언스 방법을 적용해 측정된다. 한편 파괴가 발생하기까지 선형거동을 나타내는 재료에 있어 에너지 방출률은 일인자 방법을 적용하여 다음과 같이 결정될 수 있다.<sup>11</sup>

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

윗 식에서 "G"는 에너지 방출률을,  $\eta_{el}$  은 탄성 일인자를, "b"는 리가먼트를, "B"는 두께를 나타낸다.  $A_{el}$  은 하중-변형 선도의 면적을 나타낸다. 컴플라이언스를 이용하였을 때 탄성일인자,  $\eta_{el}$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$\eta_{el} = \frac{b}{C} \frac{dC}{da} \quad (2)$$

한편, Rhee 등은 본 연구에 적용된 탄소섬유/에폭시 시편의 경우  $\eta_{el}$  은 정수압 및 적층각에 의해 영향을 받지 않으며 단지 층간분리 길이만의 함수로 식 (3)으로 결정될 수 있음을 발표한 바 있다.<sup>12</sup>

$$\eta_{el} = 0.83 - 0.91 \frac{a}{L} \quad (3)$$

윗 식에서 "a"와 "L"은 각각 층간분리 길이와 시편의 게이지 길이를 나타낸다.

### 4. 결과 및 검토

탄소섬유/에폭시 복합체가 정수압력을 받을 경우 파괴인성이 증가한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 또한 변형률 속도에 따라 파괴특성이 달라지는 것으로 알려져 있다. 정수압 환경에서 변형률 속도가 파괴특성 중 하나인 컴플라이언스에 미치는 영향을 이해하기 위해 변형률 속도 변화에 따른 컴플라이언스 변화를 측정하였다. Fig. 3은 0° 단일방향 탄소섬유/에폭시 적층복합체에 있어 270 MPa의 정수압 환경에서 세 경우 변형률 속도 증

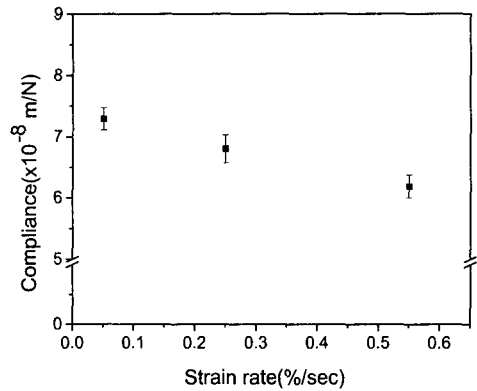


Fig. 3 Compliance change of graphite/epoxy composites as a function of strain rate at an hydrostatic pressure environment of 270 MPa

가에 따른 컴플라이언스 변화를 측정한 결과이다.

컴플라이언스는 변위를 하중으로 나눈 값으로서 각 변형률 속도에 대한 하중-변위선도의 기울기를 측정, 이에 대한 역수를 취함으로써 컴플라이언스를 결정하였다. Fig. 3에 나타나 있듯이 변형률 속도가 증가함에 따라 컴플라이언스는 감소함을 알 수 있다. 변형률 속도가 0.05 %/sec에서 0.55 %/sec로 증가함에 따라 평균 컴플라이언스는  $7.29 \times 10^{-8}$  m/N에서  $6.19 \times 10^{-8}$  m/N로 감소해 약 15%의 감소를 나타냈다.

일인자 방법을 적용해 파괴인성을 결정하기 위해서는 파괴가 발생할 때의 파괴하중 결정이 필요하다. 본 연구에서는 하중-변위 선도에서 하중이 증가하다 감소하기 시작하는 점의 하중, 즉 최대 하중값으로 결정하였다. 이는 세 경우 변형률 속도 경우 모두 선형적인 파괴거동을 나타냈기 때문이다. Fig. 4는 270 MPa 정수압에서 세 경우 변형률 속도에 따른 탄소섬유/에폭시 복합체의 파괴하중 값의 변화를 나타낸다. Fig. 4에 나타나 있듯이 변형률 속도가 증가함에 따라 파괴하중 값은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 구체적으로 변형률 속도가 작은 경우와 큰 경우의 파괴하중 값의 변화는 2% 이내로 실험에 따른 데이터의 분산성을 고려할 때 파괴하중은 변형률 속도에 의해 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

정수압력 환경에서 변형률 속도가 탄소섬유/에

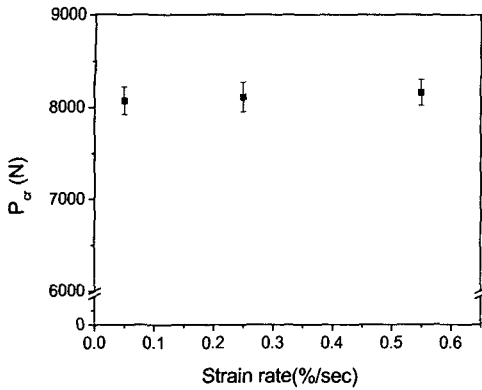


Fig. 4 Fracture load change of graphite/epoxy composites as a function of strain rate at an hydrostatic pressure environment of 270 MPa

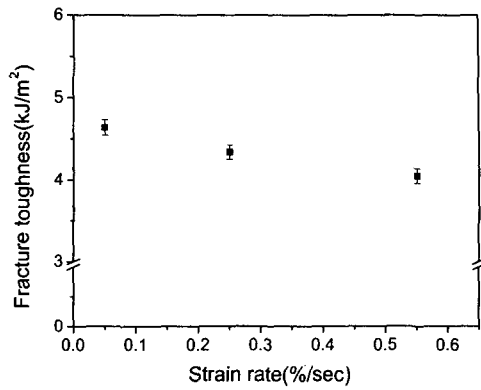


Fig. 5 Fracture toughness change of graphite/epoxy composites as a function of strain rate at an hydrostatic pressure environment of 270 MPa

폭시 복합재의 파괴인성에 미치는 영향을 알아보기 위해 세 경우 변형률 속도에 따른 파괴인성 변화를 측정하였다.

파괴인성의 측정은 컴플라이언스 방법대신 일인자 방법을 적용하여 결정하였다. 파괴인성 측정을 위해 컴플라이언스 방법 대신 일인자방법을 적용한 이유는 다음과 같다. 컴플라이언스 방법에서는 다양한 층간분리 길이를 갖는 시편에 대한 파괴시험이 필요한 반면에 일인자 방법에서는 단일 시편으로부터 한 번의 파괴시험을 적용해 파괴인성을 측정할 수 있기 때문이다.

그러나 정수압력 환경에서 파괴시험을 하기 위해서는 시험장치 내의 정수압을 정해진 압력까지 증가시키는데 상당한 시간이 요구될 뿐만 아니라 시편의 실리콘 오일에 의한 흡수를 최소화하기 위해 시편 표면을 방수막으로 처리하여야 하는 전처리 과정이 요구되기 때문이다. 따라서 식 (1)과 (3)으로부터 파괴인성,  $G_c$  를 다음과 같이 결정하였다.

$$G_c = \frac{(0.83 - 0.91 \frac{a}{L})}{Bb} A_c \quad (4)$$

윗 식에서 " $A_c$ "는 파괴가 발생할 때의 하중-변형 곡선하의 면적과 같다. Fig. 5는 270 MPa는 정수압 환경에서 변형률 속도 변화에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재의 파괴인성 변화를 나타낸 그림이다.

Fig. 5에 나타나 있듯이 가해진 변형률 속도가 증가함에 따라 파괴인성 값은 감소함을 알 수 있다. 변형률 속도가 0.05 %/sec에서 0.55 %/sec로 증가함에 따라 평균 파괴인성 값은 4.64 kJ/m<sup>2</sup>에서 4.05 kJ/m<sup>2</sup>로 감소해 약 13%의 감소를 나타냈다. 변형률 속도가 증가함에 따라 파괴인성이 감소하는 현상은 파괴하중이 변형률 속도에 의해 영향을 거의 받지 않는다고 가정할 때 변형률 속도 증가에 따른 컴플라이언스가 감소하는데 기인하는 것으로 판단된다. 크랙이 발생하지 않은 탄소섬유/에폭시 경우 변형률 속도가 0.05 %/sec에서 0.55 %/sec로 증가함에 따라 파괴변형률은 12% 이상 감소한다는 것이 Rhee 등에 의해 발표된 바 있다.<sup>13</sup> 변형률 속도에 따라 파괴인성이 변하는 현상은 탄소섬유보다는 에폭시의 영향에 의한 것으로 판단된다. 즉 변형률 속도가 증가함에 따라 에폭시의 변형이 연성에서 취성으로 반응함으로써 에폭시의 미소파괴가 증가하는데 기인하는 것으로 사료된다. 그러나 정수압력 환경에서 변형률 속도 증가가 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 파괴인성을 왜 감소시키는가를 정확히 해석하기 위해서는 파단면 분석을 통한 에폭시의 파괴기구 해석이 필요하다. 이에 대한 연구는 진행 중이며 결과는 추후의 논문에서 다룰 예정이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 정수압력 환경에서 변형률 속도가 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 파괴특성에 미치는 영향을 이해하기 위해 270 MPa의 정수압력을 유지한 후 세 경우의 변형률 속도를 적용하여 파괴시험을 수행하였다. 다음은 본 연구를 통해 얻은 결론이다.

- 1) 컴플라이언스는 변형률 속도에 의해 영향을 받으며 변형률 속도가 증가함에 따라 감소한다.
- 2) 파괴하중은 변형률 속도가 11배 증가함에 따라 변화율이 2% 이내로 변형률 속도에 의해 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.
- 3) 파괴인성은 변형률 속도가 증가함에 따라 감소한다.

## 후기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 “해양심층수 다목적 개발” 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Russell, A. J. and Street, K. N., “Moisture and Temperature Effects on the Mode I and Mode II Interlaminar Fracture of Carbon-Epoxy Fracture of Carbon-Epoxy Composites,” *Key Eng. Mater.*, Vol. 37, pp. 199-208, 1989.
2. Chiou, P. and Bradley, W. L., “Effect of Seawater Absorption on Fatigue Crack Development in Carbon /Epoxy EDT Specimen,” *Composites*, Vol. 26 No. 12, pp. 869-876, 1995.
3. Soutis, C. and Turkmen, D., “Moisture and Temperature Effect of the Compressive Failure of CFRP Uni -directional Laminates,” *J. Comp. Mat.*, Vol. 31, No. 8, pp. 832-849, 1997.
4. Ogi, K. and Takeda, N., “Effects of Moisture Content on Nonlinear Deformation Behavior of CF/Epoxy Composites,” *Compos. Mater.*, Vol. 31, pp. 530- 551, 1997.
5. Weaver, C. W. and Williams, J. G., “Deformation of Carbon-Epoxy Composite Under Hydrostatic

- Pressure,” *J. of Materials Science*, Vol. 10, pp. 1323-1333, 1975.
6. Parry, T. V. and Wronski, A. S., “The Effect of Hydrostatic Pressure on the Tensile Properties of Pultruded CFRP,” *J. of Materials Science*, Vol. 20, pp. 2141-2147, 1981.
7. Shin, E. S. and Pae, K. D., “Effects of Hydrostatic Pressure on the Torsional Shear Behavior of Graphite /Epoxy Composites,” *J. of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 462-485, 1992.
8. Rhee, K. Y. and Pae, K. D., “Effects of Hydrostatic Pressure on the Compressive Properties of Laminated 0° Unidirectional Behavior of Graphite Fiber/Epoxy Thick Composites,” *J. of Composite Materials*, Vol. 29, pp. 1295-1307, 1995.
9. Zinoviev, P. A., Tsvetkov, S. V., Kulish, G. G., Berg V. D. and Schepdael L. V., “Mechanical Properties of Unidirectional Organic-fiber-reinforced Plastics under Hydrostatic Pressure,” *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 58, pp. 31-39, 1998.
10. 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.
11. Rice, J. R., Paris, P. C. and Merkle, J. G., “Further Results on J Integral Analysis and Estimates,” *ASTM STP 536*, pp. 231-245, 1973.
12. Rhee, K. Y., Park, S. J., Lee, M. K. J. H., “On the Application of  $\eta$ -factor Approach to Determine Compressive Fracture Toughness of Fiber-Reinforced Composites under Hydrostatic Pressure Environment,” *Composite Science and Technology*, Vol. 63, pp. 829-837, 2003
13. Lee, J. H. and Rhee, K. Y., “Compressive Behavior of Carbon/Epoxy Composites under High Pressure Environment-Strain Rate Effect,” *J. Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 148-153, 2004.