

# 고압환경에서 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축거동에 대한 연구-변형률 속도 영향

이지훈\*, 이경엽#

## Compressive Behavior of Carbon/Epoxy Composites under High Pressure Environment-Strain Rate Effect

Ji Hoon Lee\*, Kyong Yop Rhee#

### ABSTRACT

It is well-known that the mechanical behavior of fiber-reinforced composites under hydrostatic pressure environment is different from that of atmospheric pressure environment. It is also known that the mechanical behavior of fiber-reinforced composites is affected by a strain rate. In this work, we investigated the effect of strain rate on the compressive elastic modulus, fracture stress, and fracture strain of carbon/epoxy composites under hydrostatic pressure environment. The material used in the compressive test was unidirectional carbon/epoxy composites and the hydrostatic pressures applied was 270 MPa. Compressive tests were performed applying three strain rates of 0.05 %/sec, 0.25 %/sec, and 0.55 %/sec. The results showed that the elastic modulus increased with increasing strain rate while the fracture stress was little affected by the strain rate. The results also showed that the fracture strain decreased with increasing strain rate.

**Key Words** : Hydrostatic pressure (정수압력), Strain rate (변형률 속도), Compressive elastic modulus (압축탄성계수), Fracture stress (파괴응력), Fracture strain (파괴변형률)

### 1. 서론

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 PMC 에 대한 재료특성 (강도, 파괴, 피로) 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 온도, 해수, 수분 등 다양한 환경조건에서의 PMC 에 대한 재료특성

이해는 항공우주 및 조선해양 산업에 PMC 를 적용하기 위한 필수 불가결한 것으로서 위 환경조건하에서의 강도 및 파괴인성 변화에 대한 연구가 이루어지고 있다.<sup>1-3</sup> 또한, 잠수함 및 해저탐사선과 같은 해저구조물의 일부를 PMC 로 제작하기 위해 정수압 환경에서의 PMC 에 대한 재료특성 변화에 대한 연구결과가 발표되고 있다. 1975년에 Weaver<sup>4</sup> 등은 정수압을 500 MPa 까지 증가시켜 탄소섬유/에폭시 복합재의 변형형태에 대해

\* 접수일: 2003년 11월 4일; 게재승인일: 2004년 2월 20일

\* 경희대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자 : 경희대학교 테크노공학대학

Email : rhecky@khu.ac.kr Tel. (031)201-2565

연구하였으며 80년대 들어 Parry<sup>5,6</sup> 등은 압출된 유리섬유/에폭시 복합재 및 탄소섬유/에폭시 복합재를 이용하여 정수압 환경에서 인장과 압축시험을 시행함으로써 정수압이 PMC 복합재의 인장 및 압축탄성계수에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 90년대 들어 정수압이 섬유강화 적층복합재의 물성특성에 미치는 연구가 활발히 이루어졌다. Shin<sup>7,8</sup> 등은 얇은 두께를 갖는 원통형의 전단시편을 적용 정수압 환경에서 섬유강화 적층복합재의 전단특성에 대해 연구하였다. 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 대한 정수압 환경에서 압축특성에 대한 연구는 Pae<sup>9,10</sup> 등에 의해 심도있게 연구되었으며 결과로서 압축파괴응력과 압축파괴변형률은 정수압 증가에 따라 선형적으로 증가하는데 비해 압축탄성계수는 정수압이 200 MPa를 중심으로 서로 다른 기울기로 증가한다는 것이 밝혀진 바 있다. Zinoviev<sup>11</sup> 등은 정수압이 탄소섬유/에폭시 복합재의 인장특성 (탄성계수, 강도)에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

한편 대기압에서 변형률 속도가 섬유강화 복합재의 인장 및 압축특성에 영향을 준다는 사실은 잘 알려져 있지만 정수압 환경에서 변형률 속도가 섬유강화 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 극히 미진한 상태이다. 다만 최근에 Pae<sup>12</sup> 등에 의해 정수압 환경에서 변형률 속도에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재에 대한 압축특성 연구가 이루어진 바 있다.

본 논문에서는 정수압을 받는 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 변형률 속도 변화에 따른 압축특성 변화에 대해 연구하였다. 즉 [0°]<sub>64</sub>로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 대해 대기압 환경 및 270 MPa의 정수압을 가한 상태에서 변형률 속도를 세 단계로 변화시켜 압축시험을 수행하였으며 이로부터 변형률 속도 변화에 따른 압축탄성계수, 압축파괴응력, 압축파괴변형률의 변화를 검토하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 (주)S.K chemical에서 생산하는 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (USN 150B)를 사용하였다. USN 150B 프리프레그는 열경화성 복합재로 탄소섬유 함유율은 약 64%이다. 시편제작을 위해 프리프레그를 300 × 200 mm 크기로 절단한 후 이

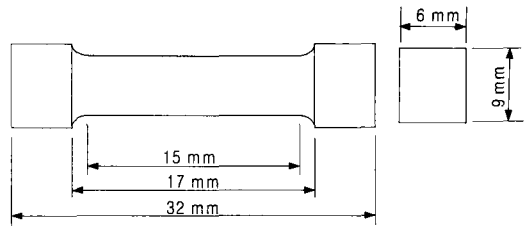


Fig.1 Configuration of test specimen

를 0° 단일방향으로 64 플라이 적층하였다. 성형은 오토클레이브 (autoclave) 내에서 (주)SK Chemical에서 제시하는 성형방법에 따라 열과 압력을 가함으로써 완성하였다. 성형된 판의 두께는 약 9 mm이다. 시편은 압축력에 따른 끝단에서의 파괴 (end-crushing)가 발생하지 않도록 도그본 (dog-bone) 형태로 가공하였다. 시편의 모양과 크기는 Fig. 1에 나타나 있다. 시편의 표면은 시험장치 내의 압력매체인 실리콘 오일에 의한 흡수효과를 최소화하기 위해 방수막으로 처리하였다.

압축시험은 정수압 환경에서 변형률 속도에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축특성 변화를 해석하기 위해 700 MPa까지 정수압을 가할 수 있는 고압 인장-압축 장비를 이용하여 270 MPa의 정수압을 가한 상태에서 세 단계의 변형률 속도를 적용하여 시행하였다. 적용된 변형률 속도는 0.05 %/sec, 0.25 %/sec, 0.55 %/sec이다. 압축시험에 따른 하중 및 변형 데이터는 IBM PC에 설치된 LABTECH NOTEBOOK (version 6.3) 프로그램을 이용 취합 해석하였다. 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번 이상의 시험을 각각의 같은 변형률 속도 조건하에서 반복하여 시행하였다. 정수압 환경에서 결정된 압축특성은 대기압환경에서 결정된 압축특성과 비교하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 고압 인장-압축 장비를 나타낸다.

## 3. 결 과

변형률 속도 및 정수압이 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축특성에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 우선적으로 정수압 환경에서 변형률 속

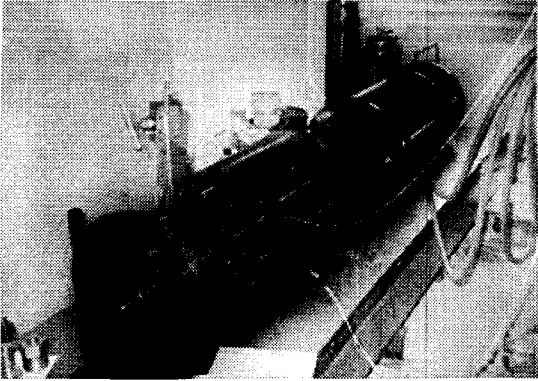


Fig. 2 Photograph of high pressure tension-compression apparatus

도 변화에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축응력-압축변형률 선도 측정을 필요로 한다. 또한 대기압에서의 변형률 속도 변화에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축응력-압축변형률 선도 측정이 필요하다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 각각 대기압 및 270 MPa 정수압에서 세 경우 변형률 속도에 대한  $[0^\circ]_{64}$  의 적층순서를 갖는 탄소섬유/에폭시 복합재의 전형적인 압축응력-압축변형률 선도를 나타낸다. 그림에 나타나 있듯이 대기압 및 정수압에 상관없이 응력은 변형률 증가에 대해 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 압축탄성계수, 압축과괴강도, 압축과괴변형률 등이 변형률 속도에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

변형률 속도 및 정수압이 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축탄성계수에 미치는 영향을 이해하기 위해 대기압 및 정수압 경우 변형률 속도 증가에 따른 압축탄성계수를 결정하였다. 각 변형률 속도에 대한 압축탄성계수는 두 경우 모두 인장시험시 탄성계수를 결정하는 방법을 적용 압축응력-압축변형률 선도로부터 원점을 통과한 기울기를 측정함으로써 결정하였다. Fig. 5 는 대기압 및 270 MPa 의 정수압 환경에서 변형률 속도 변화에 따른 압축탄성계수의 변화를 나타낸다. Fig. 5 에 나타나 있듯이 두 가지 사실을 알 수 있다. 첫째, 같은 변형률 속도에 대해 정수압이 작용한 경우가 대기압 경우보다 압축탄성계수가 더 크다는 것이다. 즉, 정수압이 작용하면 압축탄성계수가 증가한다는 것이다. 정수압 환경에서 탄성계수의 증가는 다양한 원인에 기인하지만 특히 정수압이 시편표면에 압

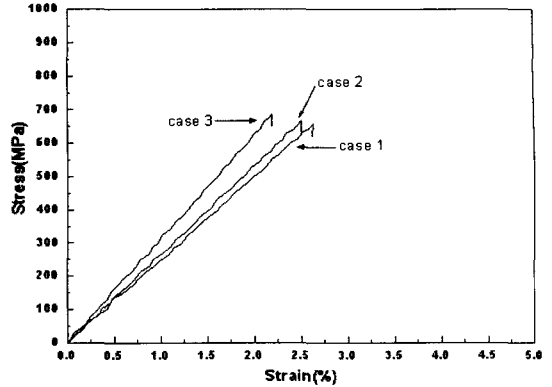


Fig. 3 Typical compressive stress-strain curves of  $[0^\circ]_{64}$  carbon/epoxy composites for three strain rates, 0.05 %/sec (case 1), 0.25 %/sec (case 2), and 0.55 %/sec (case 3) at atmospheric pressure

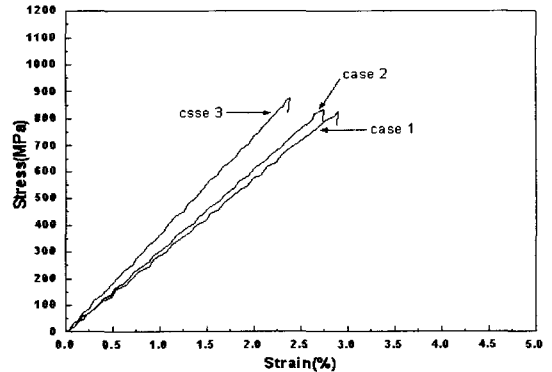


Fig. 4 Typical compressive stress-strain curves of  $[0^\circ]_{64}$  carbon/epoxy composites for three strain rates, 0.05 %/sec (case 1), 0.25 %/sec (case 2), and 0.55 %/sec (case 3) at 270 MPa hydrostatic pressure

축력으로 작용해 층간분리 및 미소균열 발생이 억제되는데 주원인이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>10</sup> Fig. 5 에서 알 수 있는 두 번째 사실은 대기압 환경이든 정수압 환경이든 변형률 속도가 증가함에 따라 압축탄성계수가 증가한다는 것이다. 이와 같은 현상은 Pae 와 Carlsson 이 발표한 다층방향으로 적층된 복합재 경우와도 일치되는 현상이다.<sup>12</sup> 구체적으로 변형률 속도가 낮을

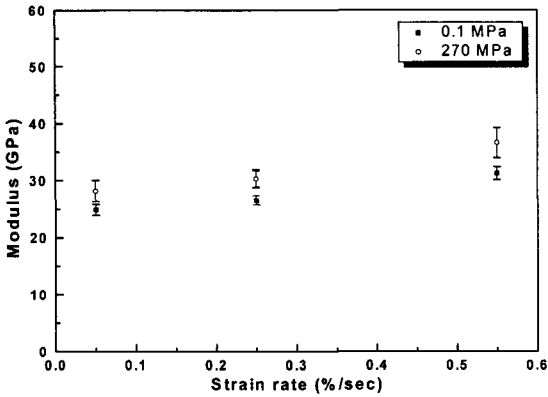


Fig. 5 Effect of strain rate on the elastic modulus under atmospheric pressure and hydrostatic pressure

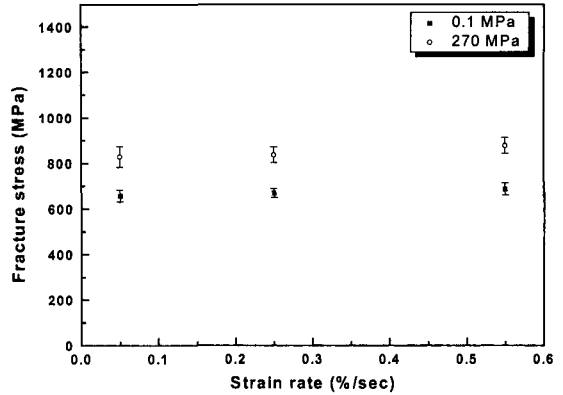


Fig. 6 Effect of strain rate on the fracture stress under atmospheric pressure and hydrostatic pressure

0.05 %/sec 의 경우 대기압에서 평균압축탄성계수는 24.3 GPa 이며 270 MPa 의 정수압에서 평균압축탄성계수는 28.2 GPa 이다. 즉, 정수압이 270 MPa 로 증가함에 따라 압축탄성계수는 약 15 % 정도 증가하게 된다. 변형률 속도가 높은 0.55 %/sec 의 경우 대기압에서 평균압축탄성계수는 30.4 GPa 이며 270 MPa 의 정수압에서 평균압축탄성계수는 35.7 GPa 로서 정수압이 270 MPa 로 증가함에 따라 압축탄성계수는 약 17 % 이상 증가하게 된다.

정수압 환경에서 변형률 속도가 압축파괴응력에 미치는 영향을 이해하기 위해 변형률 속도 증가에 따른 파괴응력의 변화를 나타내었다. 파괴응력은 압축응력-압축변형률 선도에서 최대응력으로 결정하였다. Fig. 6 은 대기압 및 270 MPa 의 정수압 환경에서 변형률 속도변화에 따른 파괴응력의 변화를 나타낸다. 그림에 나타나 있듯이 정수압이 작용할 경우 파괴응력은 대기압에서보다 크다는 것을 알 수 있다. 정수압이 증가함에 따라 파괴응력이 증가한다는 것은 잘 알려진 사실로서 파괴응력이 정수압에 대해 선형적으로 증가한다는 것이 여러 연구자에 의해 밝혀진 바 있다.<sup>9,10</sup> 한편 Fig. 6 에 나타나 있듯이 파괴응력은 대기압 및 정수압 환경에서 변형률 속도가 증가에 대해 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7 은 대기압 및 270 MPa 의 정수압 환경에서 변형률 속도변화에 따른 파괴변형률의 변화를 나타낸다. 본 연구에서 파괴변형률은 파괴응력에 해당하는 변형률로 결정하였다. Fig. 7 에서 나타나

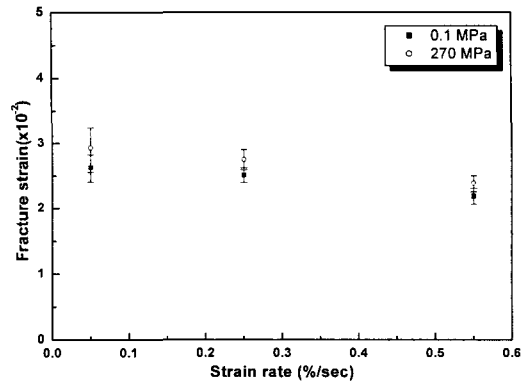


Fig. 7 Effect of strain rate on the fracture strain under atmospheric pressure and hydrostatic pressure

있듯이 정수압이 작용할 경우 파괴변형률은 대기압에서보다 크다는 것을 알 수 있다. 파괴응력과 마찬가지로 일반적으로 정수압이 증가함에 따라 파괴변형률이 증가한다는 것은 여러 연구자에 의해 밝혀진 바 있다.<sup>9,10</sup> 변형률 속도가 낮은 0.05 %/sec 의 경우 대기압에서 평균 파괴변형률은 2.63 이며 270 MPa 의 정수압에서 평균 파괴변형률은 2.93 이다. 즉, 정수압이 270 MPa 로 증가함에 따라 파괴변형률은 약 11 % 정도 증가하게 된다. 변형률 속도가 높은 0.55 %/sec 의 경우 대기압에서 평균 파괴변형률은 2.19 이며 270 MPa 의 정수압에서 평균 파괴변형률은 2.39 로서 정수압이 270 MPa 로 증가함에 따라 파괴변형률

은 약 9 % 정도 증가하게 된다. Fig. 7 에서 또한 알 수 있는 것은 대기압 및 정수압 환경에서 변형률 속도가 증가함에 따라 파괴변형률이 감소한다는 것이다. 변형률 속도가 증가함에 따라 파괴변형률이 감소하는 것은 낮은 변형률 속도에서는 기지재가 연성변형이 증가하는데 비해 높은 변형률에서는 기지재의 연성이 감소하며 기계적 연동 (mechanical interlocking)이 증가해 기지재 파괴가 주 파괴원이 되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 정수압 환경에서 변형률 속도 증가에 따른 파괴변형률의 감소 원인을 정확히 규명하기 위해서는 이에 대한 심도 있는 연구가 필요한 상태이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 변형률 속도가 압축특성에 미치는 영향에 대해 다루었다. 즉, 대기압 환경 및 270 MPa 의 정수압을 가한 상태에서 변형률 속도를 세 단계로 변화시켜 변형률 속도 변화에 따른 압축탄성계수, 압축파괴응력, 압축파괴변형률의 변화를 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 압축탄성계수에 대한 변형률 속도 영향은 대기압보다 정수압 환경에서 더 크다.
- 2) 대기압 및 정수압 환경에서의 파괴응력은 변형률 속도에 의해 크게 영향을 받지 않는다.
- 3) 대기압 및 정수압 환경에서 변형률 속도가 증가함에 따라 파괴변형률은 감소한다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R05-2003-000-12306-0)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

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 Engineering Materials*, Vol. 37, pp. 199-208, 1989.
2. Hooper, S. J. and Subramanian, R., "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. 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.
5. 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.
6. Wronski, A. S. and Parry, T. V., "Compressive Failure and Kinking in the Uniaxially Aligned Glass-Resin Composite under Superimposed Hydrostatic Pressure," *J. of Materials Science*, Vol. 20, pp. 3656-3662, 1982.
7. 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, pp. 462-485, 1992.
8. 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, pp. 828-868, 1992.
9. 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.
10. Pae, K. D., "Influence of Hydrostatic Pressure on Mechanical Behavior and Properties of Unidirectional Graphite/Epoxy Matrix Thick-Composites," *Composites*, Vol. 27, pp. 599-606, 1996.
11. Zinoviev, P. A., Tsvetkov, S. V. "Mechanical Properties of Unidirectional Organic-Fiber-Reinforced Plastics under Hydrostatic Pressure," *Composite Science and Technology*, Vol. 58, pp. 31-39, 1998.

12. 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, pp. 49-67, 1998.