

## 정수압력에 따른 해수흡수된 Carbon/Epoxy 복합재의 압축 및 파괴특성에 대한 연구

이지훈\*(경희대 대학원 기계공학과), 이경엽\*(경희대 테크노공학대학), 김현주(한국해양연구원)

Compressive and Fracture Characteristics of Seawater-abrobed Carbon-Epoxy Composite under Hydrostatic Pressure Environment

J. H. Lee(Mecha. Eng. Dept. KHU), K. Y. Rhee(College of Advanced Tech., KHU), H. J. Kim(KORDI)

### ABSTRACT

In this study, we investigated compressive characteristics of seawater-absorbed carbon-epoxy composite under hydrostatic pressure environment. The hydrostatic pressures applied were 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, and 270 MPa. The results showed that the compressive elastic modulus increased about 10 % as the hydrostatic pressure increased from 0.1 MPa to 200 MPa. The modulus increased 2.3 % more as the pressure increased to 270 MPa. Fracture strength and fracture strain increased with pressure in a linear fashion. Fracture strength increased 28 % and fracture strain increased 8.5 % as the hydrostatic pressure increased from 0.1 MPa to 270 MPa.

**Key Words** : Carbon/Epoxy Composites (탄소섬유/에폭시 복합재), Hydrostatic Pressure (정수압력), Delamination (층간 분리), Fracture Mode (파괴 형태), Compressive Property (압축특성)

### 1. 서론

구조물의 재료로서 PMC(고분자기지 복합재)의 적용은 현재 계속적으로 증가하고 있다. 특히 고분자기지 복합재는 금속재의 비해 해수 부식특성이 우수하기 때문에 해양산업 및 국방산업 등에서 그 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나 고분자기지 복합재를 해저 구조물로 적용하기 위해서는 해수흡수 및 정수압력 작용에 따른 물성특성 변화에 대한 이해가 필수적이다.

일반적으로 고분자기지 복합재가 수분을 흡수할 경우 기지재의 온도변화와 유리전이온도(glass transition temperature)의 변화로 인한 강성도 및 강도의 손실이 수반되며 섬유비틀림과 초기파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 PMC의 압축, 인장, 전단특성에 따른 수분흡수의 영향은 수많은 연구자들에게 의해 조사되었다.<sup>(1-3)</sup> 또한 PMC의 기계적 특성은 정수압력에 의해 영향을 받는다. Pac et al.<sup>(4,5)</sup>은 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축 및 전단특성에서 정수압력의 영향을 광범위하게 연구하였다. 정수압력 환경하에서 탄소섬유/에폭시 복합재의 인장특성은 Parry et al.<sup>(6)</sup>과 Zinoviev et al.<sup>(7)</sup>에 의해 연

구되어졌다. 한편 해수가 흡수된 정수압력하의 PMC 재료의 기계적 특성의 영향에 대한 연구는 극히 미진한 상태이다. 그러므로 본 논문에서는 정수압 환경에서 해수가 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재시편을 사용하여 실험을 수행하였다. 이로부터 해수가 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축탄성계수, 압축파괴응력 및 압축파괴변형률의 변화를 연구 및 검토하였다.

### 2. 실험방법

CFRP 프리프레그 테이프는 25 cm × 30 cm 로 절단한 후  $[0^{\circ}]_{64}$  수직 단일방향으로 적층하였으며, 0.5 MPa의 압력 및 130°C의 온도로 오토클레이브 내에서 성형하였다. 다음으로 판은 50°C에서 4 시간 동안 후처리 하였다. 제작된 판은 도그본 시편으로 제작되었고, 시험전 최소의 수분흡수를 위해 건조기에 저장하였다. 시편의 크기는 길이 15 mm × 폭 10 mm × 두께 6 mm 이다. 도그본 시편은 Fig. 1에 나타나 있다.

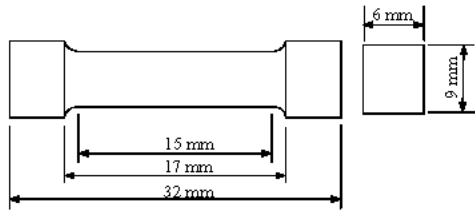


Fig. 1 Configuration of dogbone CFRP-Epoxy composite specimen

정수압력 환경에서 해수가 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축시험은 700 MPa 까지 정수압력을 가하여 시편의 시험이 가능한 인장-압축 시험기를 이용하였다. 압축시험은 대기압력(0.1 MPa) 및 100 MPa, 200 MPa, 270 MPa 의 정수압력에서 0.25 %/sec 의 일정한 변형률로 시행하였다. 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 네 번 이상의 실험을 각 압력단계에 대해 수행하였다.

### 3. 결과 및 토의

해수흡수는 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 해수흡수 전후의 시편무게를 측정하여 탄소섬유/에폭시 복합재의 해수흡수율  $C$  를 식 (1)로부터 측정하였다.

$$C = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots(1)$$

식 (1)에서  $W_w$  와  $W_d$  는 각각 해수가 흡수된 시편과 건조시편의 무게를 나타낸다. Fig. 2 는 시간의 평방제곱근에 따른 해수흡수율의 결과를 보여주는 그림이다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 본 연구에 사용된 탄소섬유/에폭시 복합재 시편의 경우 해수흡수는 6 개월 정도 지나 포화상태였으며, 해수흡수율은 대체로 Fickian 법칙과 해수흡수도에 따라 시편무게의 약 1.2 %였다.

하중-변위 곡선은 탄성계수, 파괴응력 및 파괴변형률을 결정하기 위한 필수요소이다. 정수압력하에서 압축탄성계수, 파괴응력 및 파괴변형률의 효과를 결정하기 위해 대기압력과 다양한 정수압력에서의 하중-변위 곡선을 비교하였다. Fig. 3 은 여러 단계의 정수압력에서 얻어진 단일방향 탄소섬유/에폭시 복합재의 전형적인 하중-변위 곡선을 보여준다. 그림에서 보여진 바와 같이 시편은 취성파괴에 의한 선형탄성 양상을 나타내었다. 100 MPa 이하의

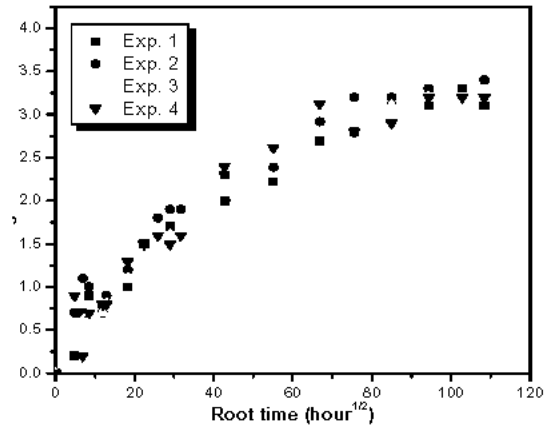


Fig. 2 Experimental data of moisture absorption against root time for carbon/epoxy composite in seawater

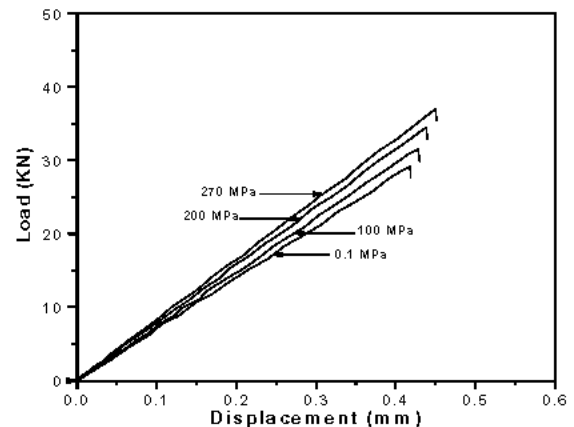


Fig. 3 Typical compressive load-displacement curves for various hydrostatic pressure

정수압력 상태에서 시편은 파괴가 일어나기 전에 비선형적인 변형곡선을 보여주었다. 또한 그림에서 정수압력의 증가는 탄성계수, 파괴응력, 파괴변형률이 증가하는 원인이 된다.

Fig. 4 는 정수압 증가에 따른 압축탄성계수의 변화를 나타낸다. 압축탄성계수는 압축응력-압축변형률 선도로부터 원점을 지나는 직선의 초기 기울기를 측정함으로써 결정하였다. Fig. 4 의 에러바는 적어도 4 개의 시편에서 결정된 압축탄성계수의 최대, 최소값을 나타낸다. 비록 압축탄성계수의 실험값들이 흩어져 있지만 그것은 쌍일차 형태의 압력에 의해 압축탄성계수가 증가하고 200 MPa 의 압력에서 두 선형직선구간을 나타낸다. 적용전 정수압

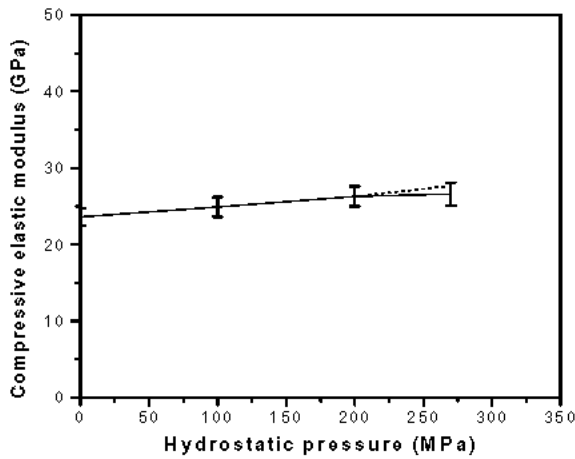


Fig. 4 Elastic modulus variation of seawater-absorbed carbon-epoxy composite as a function of hydrostatic pressure

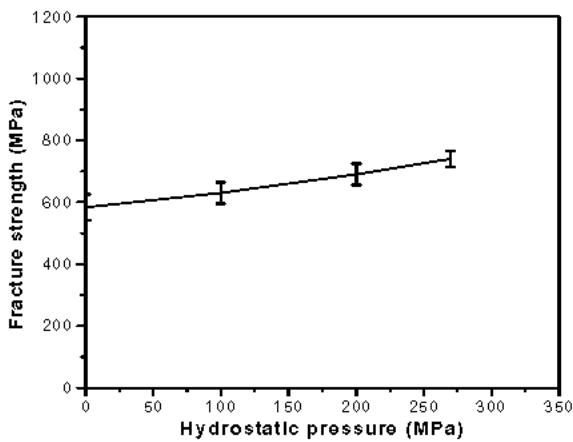


Fig. 5 Fracture strength variation of seawater-absorbed carbon-epoxy composite as a function of hydrostatic pressure

력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가함에 따라 평균 압축탄성계수는 약 10 % 200 MPa의 압력에서 두 선형직선구간을 나타낸다. 적용전 정수압력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가함에 따라 평균압축 탄성계수  $E_{ave}$ 는 약 10 % 증가하였다. 그리고  $E_{ave}$ 는 압력이 270 MPa로 증가함에 따라 약 2.3 %가 더 증가하였다. 가해진 정수압이 200 MPa를 전후로 압축탄성계수가 쌍일차로 변하는 현상은 건조 탄소섬유/에폭시 복합재 시편에서도 관찰된 바 있다.<sup>(5)</sup>

Fig. 5는 일정 압력에서 압축파괴응력이 적용된 정수압력의 작용으로써 압축파괴응력의 변화는 이에 상응하는 응력-변형률 선도에서 최대응력으로

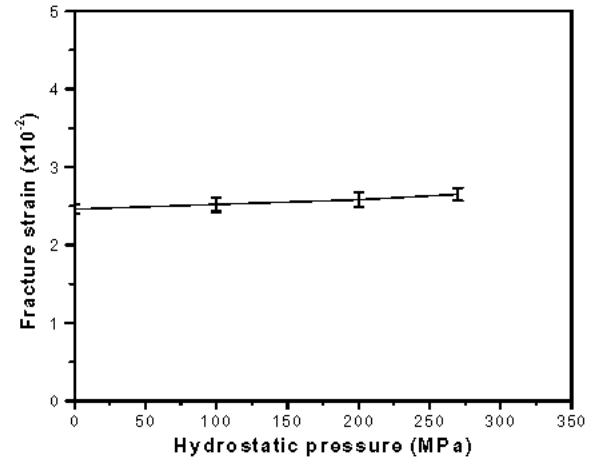


Fig. 6 Fracture strain variation of seawater-absorbed carbon-epoxy composite as a function of hydrostatic pressure

써 결정되었음을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 실험값들은 상당히 흩어져 있으나 정수압이 증가함에 따라 압축파괴응력은 증가한다. 또한, 압축파괴응력은 정수압에 따라 선형적으로 증가한다. 대기압에서 평균압축응력은 584 MPa 이었고 270 MPa의 압력에서는 750 MPa 이었다. 즉, 평균압축응력은 적용정수압이 0.1 MPa에서 270 MPa로 증가함에 따라 28 %가 증가하였다.

Fig. 6은 적용정수압에 따라 압축파괴변형률이 파괴응력에 상응함으로써 결정되는 압축파괴변형률의 변화를 보여준다. 압축파괴응력의 결과와 유사한 압축파괴변형률은 정수압에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다. 적용정수압이 0.1 MPa에서 270 MPa로 증가할 때, 평균압축파괴변형률은 8.5 % 증가하였다. 대기압에서의 파괴변형률은 2.46 %이고 270 MPa에서는 2.67 %였다. 초기연구들은 파괴응력과 파괴변형률이 건조한 탄소섬유/에폭시 복합재에서 정수압력이 가해짐에 따라 선형적으로 증가한다는 것을 보여주었다. 정수압 환경에서 탄소섬유/에폭시 복합재의 강화메카니즘은 다음과 같다. 정수압력은 시편표면과 시편의 초기크랙의 진전 및 내성의 증가를 일으키는 평균압축 응력요소로 작용한다. 정수압력은 섬유와 기지재의 반지름방향(반경)의 압축응력을 이끌어내며, 섬유-기지재 계면에서의 마찰력을 증가시키는 원인이 된다. 증가된 마찰력은 섬유계면에서의 이탈과 접촉력을 억제시킨다. 정수압은 제한된 불연속(이탈 및 단절 또는 텅 빈공간이나 공동)에서의 소성변형 원인이 되고 미세크랙의 기계적 치료와 국부적인 층간분리 및 공간이나 구멍의 collapse를 발생시킨다. 따라서 정수압이 증가함에 따라 파괴응력 및 파괴변형률은 증

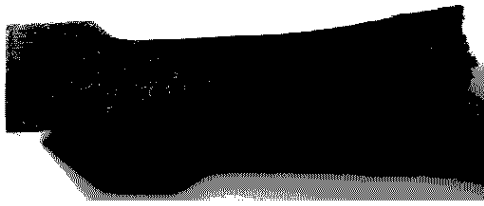


Fig. 7 Photograph of fractured specimen tested at atmospheric pressure

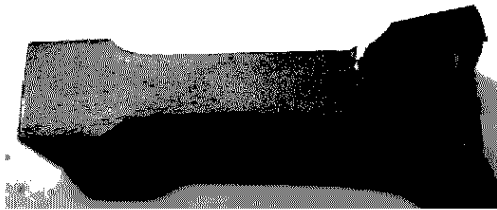


Fig. 8 Photograph of fractured specimen tested at hydrostatic pressure

가하게 된다. 실험된 시험편은 탄소섬유/에폭시 복합체의 파괴형태에서 정수압력의 효과를 연구하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 대기압과 270 MPa의 정수압력에서 파괴된 시험편의 형태를 보여준다. 도그본 시험편은 예상과 대조적으로 길이방향에서 보다 끝단에서의 파괴가 발생하였다. 그러나, 전형적인 압축파괴형태는 섬유버클링과 층간분리가 모든 압력단계에서 발생되었다. 대기압과 낮은 압력에서 다양한 층간분리가 시험편의 끝단에서 발생하였고 시험편의 길이방향을 따라 진전되었다. 270 MPa의 압력에서 파괴형태는 대기압과 유사한 형태를 보였다. 그러나 층간분리는 상당히 두드러지게 억제되었고 파괴진전도 감소하였음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

심해환경에서 탄소섬유/에폭시 복합체의 압축특성을 연구하기 위해 해수가 흡수된 시험편을 적용 270 MPa까지의 정수압력에서 압축시험을 수행하였다. 결과로서 압축탄성계수는 200 MPa에서 쌍일차로 증가하였다. 압축탄성계수의 증가율은 약 200 MPa 범위에서 10%였고, 270 MPa까지 압력을 증가함으로써 2.3%가 더 증가하였다. 파괴응력과 파괴변형률은 선형적인 형태의 압력과 함께 증가하였다. 정수압력이 대기압에서 270 MPa까지 증가함으로써 파괴응력은 28% 증가하였고 파괴변형률은 8.5%가

증가하였다. 실험에 따른 파괴형태를 보면 정수압력이 버클링 및 층간분리 현상을 현저히 감소시키는 요인이 된다는 것을 알 수 있다.

#### 후기

본 연구는 2004년도 해양수산부의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. A.J. Russell and K.N. Street, 1989, "Moisture and Temperature Effect on the Mode I and Mode II interlaminar Fracture of Graphite/Epoxy Fracture of Graphite/Epoxy Composites", Key Eng. Mater., Vol. 37, No. 199
2. M.L. Karasek, L.H. Srait, and M.F. Amateau, 1992, "Effects of Seawater Immersion on the Impact Resistance of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites", J. Compos. Technol. Research, Vol. 26, No. 14
3. K. Ogi and N. Takeda, 1997, "Effects of Moisture Content on Nonlinear Deformation Behavior of CF/Epoxy Composites", J. Compos. Mater. Vol. 31, No. 530
4. E.S. Shin and K.D. Pae, 1992, "Effect of Hydrostatic Pressure on the Torsional Shear Behavior of Graphite/Epoxy Composites", Compos. Mater., Vol. 26, No. 462
5. K.D. Pae and K.Y. Rhee, 1995, "Effect of Hydrostatic Pressure on the Compressive Behavior of Thick Laminated 45° and 90° Unidirectional Graphite-Fiber/Epoxy Matrix Composites", Compos. Sci. Technol., Vol. 53, No. 281
6. T.V. Parry and A.S. Wronski, 1981, "The Effect of Hydrostatic Pressure on the Tensile Properties of Pultruded CFRP", J. Mater. Sci., Vol. 17, No. 2141
7. P.A. Zinoviev, S.V. Tsvetkov, G.G. Kulish, R.W. Van den Berg and L. Van Schepdael, 1998, "Mechanical properties of unidirectional organic-fiber-reinforced plastics under hydrostatic pressure", Vol. 58, No. 31-39
8. J.B. Enns, J.K. Gilham, 1983, "Time-Temperature-Transformation(TTT) Cure Diagram : Modeling the Cure Behavior of Thermoset", J. of Applied Polymer Science, Vol. 28, No. 2567
9. T.S. Grant, W.L. Bradley, 1994, "In-situ Observations in SEM of Degradation of Graphite/Epoxy Composite Materials Due to Seawater Immersion", J. of Composite Materials, Vol. 29, No. 7