

해수흡수된 두께가 두꺼운 카본/에폭시 복합재의 정수압 증가에 따른 파괴인성에 대한 실험적 연구 An Experimental Study on the Fracture Toughness of Seawater-absorbed Thick Carbon/epoxy Composite in the Hydrostatic Pressure Environment

하성록* · 이경엽**
Sung Rok Ha* and Kyong Yop Rhee**

요 지 : 해저환경에서 PMC(고분자기지 복합재)는 금속재 구조물에 비해 부식성이 우수한 것으로 알려져 있다. 해저환경에서 고분자기지 복합재의 파괴특성에 대한 이해는 증가하는 해저구조물 제조에 반드시 필요하다. 본 연구에서, 파괴시험은 해수흡수 된 카본/에폭시 복합재에 대해 정수압을 네단계(0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, and 270 MPa)로 증가시켜 수행하였다. 파괴인성은 정수압에서의 일인자방법을 적용하였다. 파괴거동은 모든 정수압에서 선형적이었고 파괴인성은 정수압이 증가할수록 증가하였다.

핵심용어 : 탄소섬유/에폭시 복합재, 층간분리, 파괴인성, 정수압력

Abstract : It is well-known that the corrosive behavior of PMC (polymer matrix composite) structure is much better than the metal structure in the marine environment. The understanding of fracture behavior of PMC in the deep-sea environment is essential to expand its use in the marine industry. For a present study, fracture tests have been performed under four different pressure levels such as 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, and 270 MPa using the seawater-absorbed carbon/epoxy composite samples. Fracture toughness was determined from the work factor approach as a function of hydrostatic pressure. It was found that fracture behavior was a linear elastic for all pressure levels. The fracture toughness increased with increasing pressure.

Keywords : carbon/epoxy composite, delamination, fracture toughness, hydrostatic pressure

1. 서 론

고분자기지 복합재는 금속재 구조물에 비해 무게를 50% 이상 줄일 수 있으며 하중환경에 따라 보강재와 지지재를 적절히 조합함으로써 파괴저항성 및 피로특성을 상당히 향상시킬수 있는 장점이 있다. 또한 해수에 대한 부식성이 금속에 비해 우수해 지난 10 년간 해양구조물 재료로 사용이 급증하고 있다. 최근 들어서는 석유 시추관, 심층수 취수관과 같은 해저구조물 제조에 사용이 증가하면서 해저환경에 따른 고분자기지 복합재에 대한 물성특성 연구가 광범위하게 이루어졌다. 현재까지 에폭시를 기지

재료하는 복합재에 대한 해저환경에서의 물성특성에 대한 연구는 크게 에폭시 복합재가 해수를 흡수하였을 경우의 강도특성 변화와 정수압력이 작용하였을 경우의 기계적 특성 변화에 대한 연구로 이루어졌다(Karasek et al., 1992; Ogi and Takeda, 1997; Tucker and Brown, 1998; Grant and Bradley, 1995; Parry and Wronski, 1981; Wronski and Parry, 1982; Shin and Pae, 1992; Rhee and Koh, 1999) 해수흡수에 대한 연구결과로서 에폭시가 해수를 흡수할 경우 유리전이온도가 낮아지며 소성화가 발생돼 결국 에폭시 복합재의 강도 및 강성이 저하되는 것으로 알려져 있다. 정수압력에 대한 연구결과로서 에폭시 복합재

*경희대학교 기계공학과 (Graduate School of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea)

**경희대학교 테크노공학대학 (Corresponding author: Center for media transport system, School of mechanical and industrial system engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea. rheeky@khu.ac.kr)

가 정수압력을 받을 경우 강성 및 강도가 모두 정수압력 증가에 따라 증가한다는 것이 알려져 있다. 한편 해수흡수가 에폭시 복합재의 파괴인성에 미치는 영향에 대한 연구는 연구자에 따라 다소 다른 결과가 발표된 바 있다. 예를 들면, Sloan and Seymour(1992)는 탄소섬유/에폭시 복합재가 해수를 충분히 흡수할 경우 해수에 노출되지 않은 시편에 비해 열립모드 파괴인성이 100% 이상 증가한다는 것을 발표한 바 있다. 그러나 Chou(1998)는 탄소섬유/에폭시 복합재에서 해수가 흡수될 경우 오히려 파괴저항인성 값이 32% 정도 감소하는 것으로 발표한 바 있다. 이에 비해 정수압력 환경에서 고분자기지 복합재의 파괴특성에 대한 연구는 초기단계에 있는 상태이다. 최근에 Rhee(2000)는 정수압력이 탄소섬유/에폭시 복합재의 파괴인성에 미치는 영향에 대한 연구결과로서 정수압이 300 MPa로 증가할 때 파괴인성은 36% 증가한다는 것을 발표한 바 있다. 한편 해저 구조재로서 탄소섬유/에폭시 복합재의 사용을 증대시키기 위해서는 실제 해저와 같은 환경에서의 재료특성 변화에 대한 연구가 필요하지만 이에 대한 연구는 극히 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 탄소섬유/에폭시 적층복합재에 있어 해저환경이 파괴특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이를 위해 해수가 충분히 흡수된 탄소섬유/에폭시 적층복합재에 대해 정수압을 증가시켜 압축 파괴시험을 수행하였다. 이로부터 해저환경이 파괴인성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

본 연구에 사용한 복합재는 탄소섬유/에폭시 적층복합재로 탄소섬유의 함유율은 약 64%이다. 시편제작을 위해 탄소섬유/에폭시 프리프레그(S.K Chemical, USN 150B)를 0° 단일방향으로 88 플라이(ply) 적층한 후 오토클레이브 내에서 열 및 압력을 가함으로써 성형하였다. 성형온도는 130 °C, 성형시간은 90분으로, 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 적층판의 가공은 현재 정수압력 하에서 표준화된 시편규격이 없기 때문에 압축력에 따른 양단에서의 파괴(end-crushing)가 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. 가

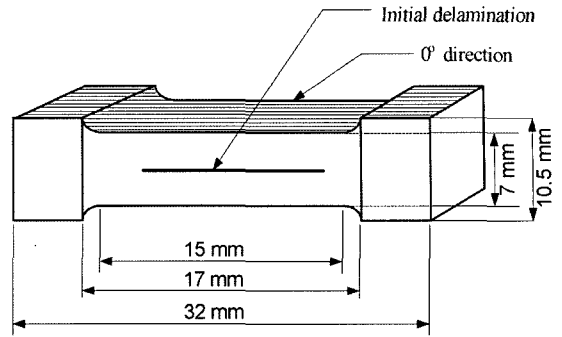


Fig. 1. Schematic diagram of compressive dogbone fracture specimen.

공이 완료된 시편들은 실리카겔이 담긴 건조기에서 15일간 방치하여 수분이 제거되도록 하였다. 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 해수흡수를 측정하기 위해 건조기에 저장된 시편들을 무균으로 여과된 해수(SIGMA, S-9148)에 13개월 이상 침지시켜 보존하였다. 그 후 시편들을 정기적으로 해수환경으로부터 꺼내 부드러운 천으로 표면의 해수를 제거한 후 0.001 g 까지 측정 가능한 전자저울로 무게를 측정하였다.

정수압 환경에서의 압축실험은 700 MPa의 정수압을 가할 수 있는 고압 인장-압축장비를 이용하여 대기압 및 3 단계(100 MPa, 200 MPa, 270 MPa)의 정수압 상태에서 수행하였다. 압축 파괴실험은 0.25%/sec의 일정한 변형률로 시행되었으며 실험에 따른 압축하중 및 변형 데이터는 PC에 설치된 LABTECH NOTEBOOK(version 6.3) 프로그램을 이용 취합 및 해석하였다. 본 연구에서는 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번 이상의 실험을 각각의 같은 정수압 조건하에서 반복하여 시

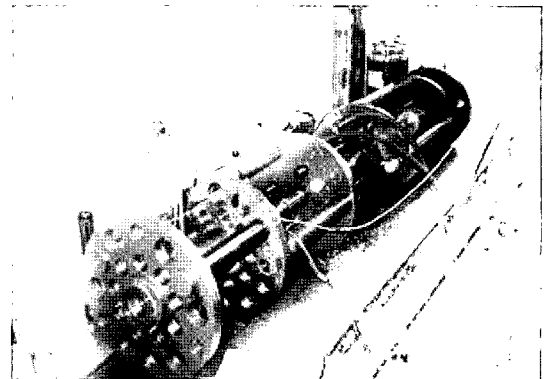


Fig. 2. Photograph of high pressure tension-compression apparatus.

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

3. 결과 및 검토

탄소섬유/에폭시 복합재의 경우 수분흡수는 온도에 의해 영향을 받으며 담수와 해수에 따라 달라진다. 일반적으로 온도가 증가할수록 수분흡수율이 증가하며 담수보다는 해수에 대해 수분흡수율이 증가하게 된다. 본 연구에서는 25 °C 해수 침투처리 전후의 시편무게를 측정하여 탄소섬유/에폭시 복합재의 해수흡수율을 측정하였다. 측정 결과 해수흡수는 초기기간 동안 빠르게 진행되다가 시간이 경과함에 따라 둔화되어 6개월 정도에 포화상태였다 (Rhee et al. 2004). 이와 같은 현상은 다른 연구자의 연구결과와도 일치하는 현상으로 시편표면과 내부의 초기 해수 농도구배 차이에 의한 것뿐만 아니라 표면에 존재하는 결함이나 내부에 존재하는 기공 등에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구의 경우 포화상태에서의 해수흡수율은 약 1.2% 였다.

탄소섬유/에폭시 복합재는 해수흡수에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 정수압력이 증가함에 따라 파괴특성도 달라지는 것으로 알려져 있다. Fig. 3은 정수압력 증가가 해수가 충분히 흡수된 0° 단일방향 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 압축 파괴거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 대기압 및 세 경우 정수압력(100

MPa, 200 MPa, 270 MPa)에 따른 대표적인 하중-변위 곡선을 측정된 결과이다. Fig. 3에 나타나 있듯이 파괴거동은 가해진 정수압력 증가에 상관없이 거의 선형적임을 알 수 있다. 특히 재료의 파괴특성인 컴플라이언스 및 파괴하중이 가해진 정수압력에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

정수압력이 컴플라이언스에 미치는 영향을 이해하기 위해 정수압력 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 측정하였다. 컴플라이언스는 변위를 하중으로 나눈 값으로서 각 정수압력에 대한 하중-변위 선도의 기울기를 측정, 이에 대한 역수를 취함으로써 정수압력에 따른 컴플라이언스를 결정 하였다. Fig. 4은 정수압력 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 나타내고 있다. Fig. 4에 나타나 있듯이 정수압력이 증가함에 따라 컴플라이언스는 감소함을 알 수 있다. 대기압과 270 MPa 정수압력에서의 평균 컴플라이언스는 8.49×10^{-8} m/N과 7.62×10^{-8} m/N로서 정수압이 대기압에서 270 MPa로 증가함에 따라 평균 컴플라이언스는 10% 이상 감소하였다. Rhee(2000)는 정수압력이 증가함에 따라 컴플라이언스가 감소하는 현상은 정수압력이 시편에 수직 압축응력으로 작용하는 것이 주원인으로 0° 단일방향으로 적층된 건조시편의 탄소섬유/에폭시 경우 정수압력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가함에 따라 평균 컴플라이언스는 7.3%이상 감소한다고 발표한 바 있다.

해수가 충분히 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 정수압 증가가 파괴하중에 미치는 영향을 알아보기 위해 정수압 증가에 따른 파괴하중을 측정하였다. 섬유강화 복합재의 파괴시험 시 파괴하중을 측정하는 방법으로 세 가

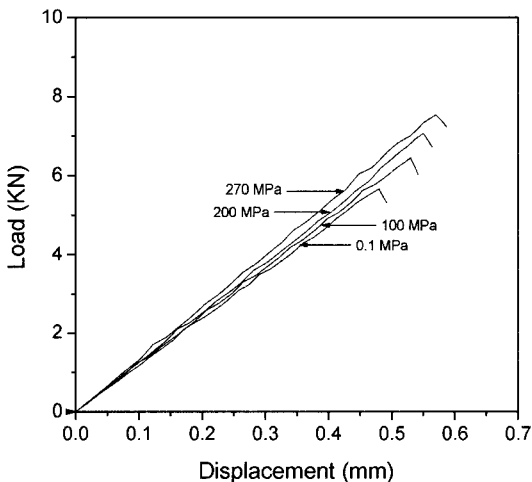


Fig. 3. Typical load-displacement curves of seawater-absorbed carbon/epoxy composite in the hydrostatic pressure environment.

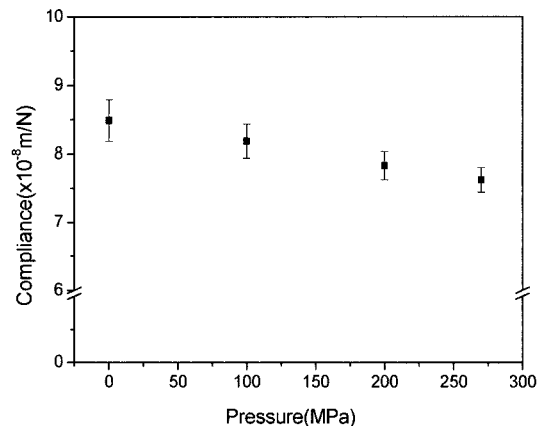


Fig. 4. Compliance change of seawater-absorbed carbon/epoxy composite as a function of hydrostatic pressure.

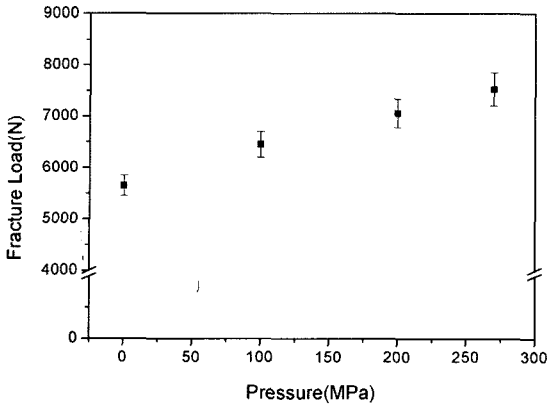


Fig. 5. Fracture load change of seawater-absorbed carbon/epoxy composites as a function of hydrostatic pressure.

지 방법이 적용되고 있다. 그러나 본 연구에서처럼 거의 선형적인 파괴거동을 나타내는 경우 최대하중을 파괴하중으로 취하는 것이 일반적으로 적용되고 있다. 따라서 파괴하중 값은 하중-변위 선도에서 하중이 증가하다 감소하기 시작하는 점의 하중, 즉 최대 하중값으로 결정하였다. Fig. 5는 각 정수압에서 해수가 충분히 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재의 파괴하중 값의 변화를 나타낸다. Fig. 5에 나타나 있듯이 정수압이 증가함에 따라 파괴하중 값은 증가함을 알 수 있다. 구체적으로 대기압환경과 270 MPa 정수압 환경에서의 평균 파괴하중 값은 각각 5651 N과 7530 N으로서 압력환경이 대기압에서 270 MPa 정수압으로 증가함에 따라 평균 파괴하중 값은 33% 이상 증가하였다.

해수가 충분히 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 정수압력이 파괴인성에 미치는 영향을 알아보기 위해 정수압력 증가에 따른 파괴인성 변화를 일인자 방법을 적용하여 측정하였다. 파괴인성 측정을 위해 컴플라이언스 방법 대신 일인자 방법을 적용한 이유는 다음과 같다. 컴플라이언스 방법을 적용하기 위해서는 층간분리 길이에 따른 컴플라이언스의 도함수 결정이 필요하며 이를 위해서는 다양한 층간분리 길이를 갖는 시편에 대한 파괴시험이 필요하다. 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. 본 연구에서는

Rice et al.(1973)의 일인자 방법인 식 (1)을 적용 파괴인성을 측정하였다.

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

윗 식에서 “ G_c ”는 파괴인성을, “ η_{el} ”은 탄성일인자를, “ b ”는 리가먼트를, “ B ”는 두께를, “ A_{el} ”은 하중-변형 선도의 면적을 나타낸다. 또한 “ A_c ”은 파괴가 발생할 때의 하중-변형 곡선하의 면적과 같다. 한편 “ η_{el} ”은 시험편 형상이 결정된 경우 층간분리 길이만의 함수로서 정수압 및 적층방향에 영향을 받지 않으며, 특히 본 연구에 적용된 시편의 경우 “ η_{el} ”은 Rhee et al.(2003)에 의해 다음과 같이 결정된다는 것이 발표된 바 있다.

$$\eta_{el} = 0.83 - 0.91 \frac{a}{L} \quad (2)$$

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

따라서 식 (1)과 (2)로부터 파괴인성 G_c 를 다음과 같이 결정하였다.

$$G_c = \frac{(0.83 - 0.91 \frac{a}{L}) A_c}{Bb} \quad (3)$$

Fig. 6은 정수압 증가에 따른 해수가 충분히 흡수된 탄소섬유/에폭시 복합재의 파괴인성 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 6에 명확히 나타나 있듯이 정수압이 증가함에

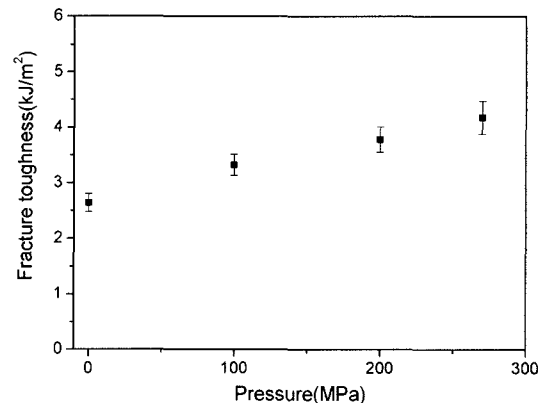


Fig. 6. Fracture toughness change of seawater-absorbed carbon/epoxy composites as a function of hydrostatic pressure.

따라 G_c 값도 증가함을 알 수 있다. 구체적으로 대기압 및 270 MPa의 정수압 환경하에서 평균 G_c 값은 각각 2.64 kJ/m²과 4.18 kJ/m²으로서 정수압이 0.1MPa에서 270 MPa로 증가함에 따라 G_c 값은 58% 이상 증가한다. 정수압력이 증가하면 G_c 값이 커지는 현상은 정수압력이 증가함에 따라 파괴하중이 커지는데 기인하는 것으로 판단된다. 왜냐하면 정수압력이 증가함에 따라 컴플라이언스가 감소하기 때문이다. 탄소섬유/에폭시 적층 복합체의 경우 대기압 환경보다 정수압력 환경에서 파괴하중이 증가하는 이유는 다양한 원인에 기인하지만 크게 다음과 같은 두 가지 원인에 발생하는 것으로 판단된다. 첫째, 정수압은 층간분리면에 수직 압축응력으로 직접 작용해 층간분리의 단힘에 일조함으로써 층간분리의 진전을 억제하는 역할을 한다. 둘째, 정수압은 탄소섬유와 에폭시 계면에 수직력으로 작용해 계면에서 마찰력을 증가하는 효과를 야기한다. 이는 계면에서의 미소균열 발생 억제 및 섬유이탈을 방지하는 역할을 한다. 이와 같은 층간분리의 억제, 미소균열의 발생 억제, 섬유와 기지재 계면에서의 분리방지 효과는 정수압력의 증가에 비례해 증가한다. 따라서 정수압력이 증가함에 따라 파괴하중이 증가하며 결국 파괴인성도 증가하게 된다. 한편 정수압 증가에 따른 파괴인성의 증가 및 파괴 모드에 대한 정확한 해석을 위해서는 정수압 증가에 따른 파단면 변화에 대한 해석이 필요하다. 이는 추후의 논문에서 다룰 예정이다.

4. 결 론

해저환경에서 섬유강화 고분자기지 복합체의 압축 파괴특성을 이해하기 위해 해수가 충분히 흡수된 탄소섬유/에폭시 적층복합체에 대해 대기압 및 세 단계 정수압력 환경에서 압축 파괴실험을 시행하였다. 이로부터 정수압력 증가가 탄소섬유/에폭시 적층복합체의 파괴특성에 미치는 영향을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 정수압력이 대기압에서 270 MPa로 증가함에 따라 컴플라이언스는 10% 이상 감소하며 파괴하중 및 파괴인성은 각각 33%와 58% 이상 증가한다.

2) 정수압력이 증가함에 따라 파괴인성이 증가하는 원인으로서는 파괴하중의 증가에 기인하며 이는 정수압이 증가함에 따라 미소균열 및 층간분리 진전 등이 억제되는 것에 기인하는 것으로 고려된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호R05-2003-000-12306-0)의 지원으로 연구되었으며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- Chou, I. (1998). Effect of fiber orientation and moisture absorption on the interlaminar fracture toughness of CFRP laminates. *Compo. Mater.*, 7, 377-394.
- Grant, T.S. and Bradley, W.L. (1995). In-situ observation in SEM of degradation of graphite/epoxy composite materials due to seawater immersion. *J. Compos. Mater.*, 29, 852-867.
- Karasek, M.L., Srait, L.H. and Amateau, M F. (1992). Effects of seawater immersion on the impact resistance of glass fiber reinforced epoxy composites. *J. Compos. Technol. Research*, 26, 2118-2133.
- Ogi, K. and Takeda, N. (1997). Effects of moisture content on nonlinear deformation behavior of CF/epoxy composites. *Compos. Mater.*, 31, 530-551.
- Parry, T.V. and Wronski, A.S. (1981). The effect of hydrostatic pressure on the tensile properties of pultruded CFRP. *J. of Materials Science*, 20, 2141-2147.
- Rhee, K.Y. (2000). Hydrostatic pressure effect on the fracture toughness of unidirectional (0-deg) graphite/epoxy laminated composites. *J. of Composite Materials*, 34, 599-613.
- Rhee, K.Y. and Koh, S.K. (1999). A study on the compressive behavior of multi-directional graphite/epoxy composites under hydrostatic pressure. *Korean Society of Mechanical Engineering*, 23, 1373-1379.
- Rhee, K.Y., Lee, S.M. and Park, S.J. (2004). Effect of hydrostatic pressure on the mechanical behavior of seawater-absorbed carbon/epoxy composite. *Materials Science and Engineering*, 384, 308-313.
- Rhee, K.Y., Lee, J.H. and Park, S.J. (2003). Effect of hydrostatic pressure on the elastic work factor, η_{el} and fracture toughness determination of unidirectional composites using η_{el} . *Materials Science and Engineering*, 349, 218-223.
- Rice, J.R., Paris, P.C. and Merkle, J.G. (1973). Some further results of J-integral analysis and estimates. *ASTM STP* 536, 231-235.
- Shin, E.S. and Pae, K.D. (1992). Effects of hydrostatic pressure on the torsional shear behavior of graphite/epoxy composites. *J. of Composite Materials*, 26, 462-485.
- Sloan, F.E. and Seymour, R.J. (1992). The effect of seawater exposure on mode I interlaminar fracture and crack growth in graphite /epoxy. *J. Compos. Mater.*, 26, 2655-2673.

Tucker, W.C. and Brown, R. (1988). Moisture absorption of graphite/polymer composites under 2000 feet of seawater. *J. Compos. Mater.*, 23, 787-797.

Wronski, A.S. and Parry, T.V. (1982). Compressive failure and kinking in the uniaxially alligned glass-resin composite

under superimposed uydrostatic pressure. *J. of Materials Science*, 17, 3656-3662.

Received August 25, 2005

Accepted December 8, 2005