

해수가 흡수된 Carbon-Epoxy 적층복합재의 압축특성에 대한 연구- 정수압력 영향

A Study on the Compressive Properties of Seawater-absorbed Carbon-Epoxy Composites – Hydrostatic Pressure Effect

이지훈* · 이경엽** · 김현주***

Ji Hoon Lee*, Kyong Yop Rhee** and Hyun ju Kim***

요 지 : 본 논문에서는 고분자기지 복합재의 해저환경에서의 압축특성에 대한 영향을 연구하였다. 실험에 사용된 시편은 두꺼운 두께를 갖는 적층된 Carbon-Epoxy 복합재를 사용하였으며, 충분한 해수 함유를 위해 시편을 해수에 13개월 동안 침지시켰다. Carbon-Epoxy 복합재의 포화 해수함유량은 시편무게의 약 1.2%였다. 해저환경을 모사하기 위해 네 경우의 정수압력(0.1, 100, 200, 270 MPa)을 적용하여 실험하였다. 실험결과로써 압축탄성계수는 정수압력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가함에 따라 약 10%정도 증가하였다. 또한 압력을 270 MPa로 증가시킴에 따라 압축탄성계수는 2.3%가 더 증가하였다. 압축파괴강도와 압축파괴변형률은 정수압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 정수압력이 0.1 MPa에서 270 MPa로 증가함에 따라 압축파괴강도는 약 28%가 증가하였고 압축파괴변형률은 약 8.5%의 증가를 나타내었다.

핵심용어 : 정수압력, Carbon-Epoxy 복합재, 압축탄성계수, 압축강도, 압축변형률

Abstract : This study investigated the effect of deep-sea environment on the compressive characteristics of polymer matrix composite. The specimens used in the experiment were thick Carbon-Epoxy composites that were made from Carbon-Epoxy prepregs. The specimens were immersed into seawater for thirteen months. The seawater content at saturation was about 1.2% of the specimen weight. The hydrostatic pressures applied were 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, and 270 MPa. It was found that the compressive elastic modulus increased about 10% as the hydrostatic pressure increased from 0.1 MPa to 200 MPa. The modulus increased additional 2.3% as the pressure increased to 270 MPa. It was also found that compressive fracture strength and compressive fracture strain increased with pressure in a linear behavior. Compressive fracture strength increased 28% and compressive fracture strain increased 8.5% as the hydrostatic pressure increased from 0.1 MPa to 270 MPa.

Keywords : hydrostatic pressure, carbon-epoxy composite, compressive elastic modulus, compressive fracture strength, compressive fracture strain

1. 서 론

고분자기지 복합재는 금속재에 비해 해수부식성이 우수해 조선산업 및 석유산업(석유시추관), 국방산업(잠수함) 등에서 해저구조물 재료로 적용성이 점차적으로 증가하고

있다. 그러나 고분자기지 복합재를 해저구조재로 적용하기 위해서는 해저환경(해수흡수 및 정수압력 작용)에 따른 고분자기지 복합재의 물성특성 변화에 대한 이해가 필수적이다.

일반적으로 고분자기지 복합재가 해수를 흡수할 경우

*경희대학교 대학원 기계공학과(Graduate school, Kyung Hee University)

**경희대학교 테크노공학대학(Corresponding Author, College of Advanced Technology, Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea. rheeky@khu.ac.kr)

***한국해양연구원(Korea Ocean Research & Development Institute)

유리전이온도의 변화로 인한 강성도 및 강도의 손실을 가져오며 섬유비틀림과 초기파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 해수흡수가 고분자기지 복합재의 압축, 인장, 전단특성에 미치는 영향에 대한 연구가 많은 연구자들에게 의해 이루어졌다(Russell, A.J. and Street, K.N. 1989; Karasek, M.L. 1992; Ogi, K. and Takeda, N. 1997). 또한, 정수압력의 작용은 고분자기지 복합재의 기계적 특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

Parry and Wronski(1981, 1990)는 압출된 Glass-Epoxy 및 Carbon-Epoxy 복합재료에 대해 대기압 및 정수압을 300 MPa까지 변화시켜 인장과 압축실험을 시행함으로써 정수압이 섬유강화 복합재의 인장 및 압축특성에 미치는 영향을 연구하였다. Shin and Pae(1992a, 1992b)는 정수압을 400 MPa까지 변화시켜 전단시험을 수행하였으며 정수압이 Carbon-Epoxy 복합재의 전단 탄성계수, 전단 파괴응력 및 전단 파괴변형률에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 두께가 두겹게 적층된 Carbon-Epoxy 복합재에 대한 정수압 환경에서의 압축특성 연구도 이루어졌다. Pae and Rhee(1995)와 Rhee and Pae(1995)는 정수압이 단일방향 Carbon-Epoxy 적층복합재의 압축특성 및 압축파괴특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한 Pae and Carlson(1998)은 정수압 환경에서 변형을 속도가 Carbon-Epoxy 복합재의 압축거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 정수압력 환경하에서 Carbon-Epoxy 복합재의 인장특성에 대한 연구도 이루어졌다. Zinoviev et al. (1998)은 세 종류의 보강섬유(탄소섬유, 유리섬유, Zylon 섬유)를 갖는 에폭시 복합재에 있어 정수압 증가에 따른 인장강도의 변화와 파괴특성 변화에 대해 연구하였다.

그러나, 현재까지 정수압력이 작용하는 환경에서 고분자기지 복합재에 대한 물성특성 변화에 대한 이해는 부족한 상태이다. 특히 해저환경에서와 같이 정수압력이 작용하며 해수가 흡수된 고분자기지 복합재의 기계적 특성에 대한 연구는 극히 미진한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 해저환경에서 고분자기지 복합재의 기계적 특성을 이해하기 위한 기초적 연구로서, 두께가 두겹게 적층된 Carbon-Epoxy 복합재를 해수에 충분히 흡수시킨 후 이를 적용하여 압축시험을 수행하였다. 이로부터 해저환경에서의 Carbon-Epoxy 복합재의 압축탄성계수, 압축파괴응력 및 압축파괴변형률의 변화를 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 탄소섬유/에폭시 압축시편제작

본 연구에서는 시편의 재료로서 (주)S.K Chemical에서 생산하는 Carbon-Epoxy 프리프레그(제품명: USN 150B)를 사용하였다. USN 150B 프리프레그는 열경화성 복합재료 탄소섬유 함유율은 약 64%이다. 시편제작을 위해 64층의 프리프레그를 25 cm×30 cm로 절단한 후 0° 방향, 64플라이([0°]₆₄)의 단일방향으로 적층하였으며 0.5 MPa의 압력 및 130°C의 온도로 오토클레이브(autoclave) 내에서 성형하였다. 제작된 판은 정형화된 규격은 없으며, 끝단 파괴(end-crushing)를 방지하기 위해 도그본 형태의 시편으로 가공하였다. 도그본 형태의 시편은 Fig. 1에 나타나 있다.

가공된 시편은 시험전 최소의 수분흡수를 위해 건조기에 저장하였다. 그 후 Carbon-Epoxy 복합재의 해수흡수를 측정하기 위해 건조기에 저장된 시편들을 무균으로 여과된 해수(SIGMA, S-9148)에 13개월 이상 침지시켜 보존하였다. 다음으로 시편들은 정기적으로 해수환경으로부터 분리시키고 ±0.001 g 까지 측정 가능한 전자저울로 무게를 측정하였다. 해수가 흡수된 시편의 무게는 최소한의 증발건조 방법으로 수분을 제거한 후 즉시 측정하였다. 수분흡수율은 복합재 무게의 백분율(%)로써 나타내었다.

2.2 정수압환경에서의 압축시험

정수압력 환경에서의 압축실험은 700 MPa 까지 정수압을 가할 수 있는 고압 인장-압축기기(high pressure tension-compression apparatus)를 이용하여 대기압(0.1 MPa) 및 3 단계(100 MPa, 200 MPa, 270 MPa)의 정수압 상태에서 시행되었다. 각 단계의 압력은 Fig. 2에 나타나 있는 장비를 이용 Pumping unit으로 압력을 조절하였다. 압축실험은 0.25%/sec의 일정한 변형률로 시행되었으며 실험에 따른 하중 및 변형 데이터는 PC에 설치된 LABTECH

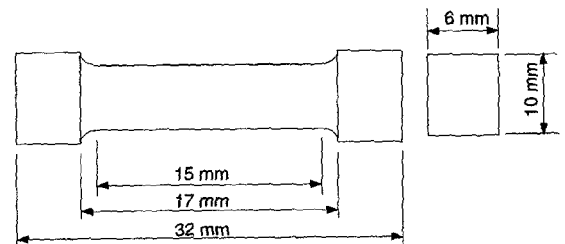


Fig. 1. Schematic diagram of test specimen.

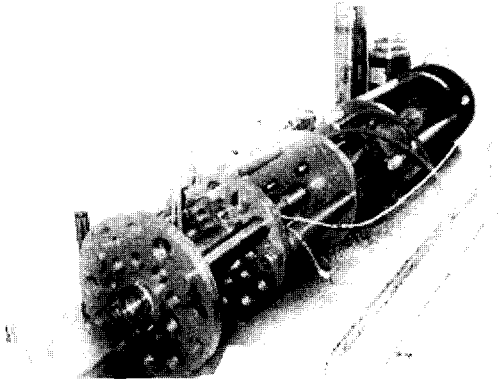


Fig. 2. Schematic diagram of high pressure tension-compression apparatus.

NOTEBOOK(version 6.3) 프로그램을 이용 취합 및 해석하였다.

Fig. 2는 고압 인장- 압축 기기를 나타내는 사진이다. 본 연구에서는 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번의 실험을 각각의 같은 압력 조건하에서 반복하여 시행하였다.

3. 결과 및 토의

해수흡수는 Carbon-Epoxy 복합재의 압축특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 해수 흡수 전후의 시편무게를 측정하여 Carbon-Epoxy 복합재의 일반적인 해수흡수율을 측정하는 식 (1)로부터 측정하였다.

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

식 (1)에서 W_w 와 W_d 는 각각 해수가 흡수된 시편과 건조시편의 무게를 나타낸다. 본 연구에 사용된 Carbon-Epoxy 복합재 시편의 경우 해수흡수는 6개월 정도 지나 포화상태였으며 이때의 해수흡수율은 약 1.2%였다.

압축하중- 변위곡선은 압축탄성계수, 압축강도 및 압축 변형률을 결정하기 위한 필수요소이다. 해수가 흡수된 Carbon-Epoxy 복합재에 있어 정수압력이 압축탄성계수, 압축강도 및 압축변형률에 미치는 영향을 이해하기 위해 대기압과 다양한 정수압력에서 의 하중- 변위곡선을 비교하였다. Fig. 3은 네 단계의 정수압력에서 얻어진 해수가 흡수된 단일방향 Carbon-Epoxy 복합재의 전형적인 압축 하중- 변위곡선을 보여 준다. 그림에서처럼 시편은 네 경

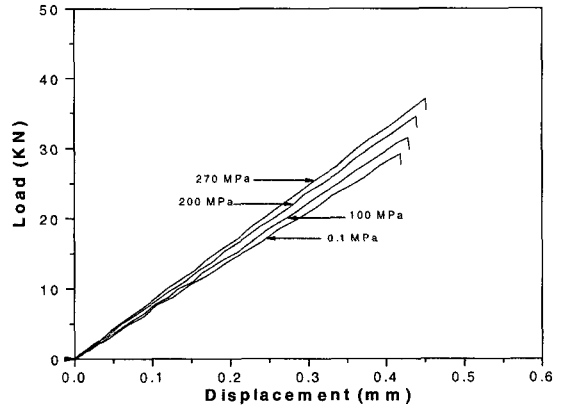


Fig. 3. Typical compressive load-displacement curves for various hydrostatic pressure.

우 모두 취성파괴에 의한 선형탄성 양상을 나타냄을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에 나타나 있듯이 정수압력의 증가는 탄성계수, 강도 및 변형률의 증가 원인이 됨을 알 수 있다.

정수압력 증가에 따른 압축탄성계수의 증가율을 알기 위해 각 정수압력에서의 평균 압축탄성계수를 대기압에서의 평균 압축탄성계수로 나누어서 정수압력의 함수로 나타내었다. 압축탄성계수는 압축응력 - 변형률선도로부터 원점을 지나는 직선의 초기 기울기를 측정함으로써 결정하였다. Fig. 4는 정수압력 증가에 따른 해수가 충분히 흡수된 Carbon-Epoxy 복합재의 압축탄성계수의 변화를 나타낸다. Fig. 4에서 에러바는 적어도 4개의 시편에서 결정된 압축탄성계수의 최대, 최소값을 나타낸다. 비록 압축 탄성계수의 실험값들이 흩어져 있지만 그것은 쌍일차

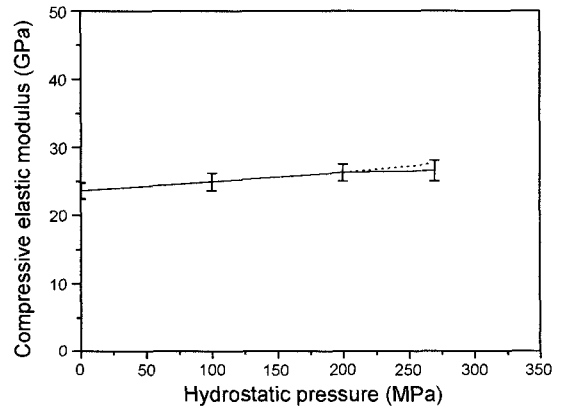


Fig. 4. Elastic modulus variation of seawater-absorbed carbon-epoxy composite with respect to hydrostatic pressure.

형태로서 정수압력 증가에 의해 압축탄성계수가 증가하고 200 MPa의 정수압력에서 두 선형직선 구간을 나타냄을 알 수 있다. 구체적으로 정수압력이 대기압에서 200 MPa로 증가함에 따라 평균 압축탄성계수는 약 10% 증가하였다. 그 후 정수압력이 270 MPa로 증가함에 따라 평균 압축탄성계수는 약 2.3%가 추가적으로 증가하였다. 즉 정수압력이 200 MPa까지는 압축탄성계수가 급격히 증가하지만 정수압력이 더욱 증가하면 그 이후에는 압축탄성계수가 완만히 증가하는 것을 나타내고 있다고 하겠다. 가해진 정수압력이 200 MPa를 전후로 압축탄성계수가 쌍일차로 증가하는 현상은 해수가 흡수되지 않은 건조 Carbon-Epoxy 복합재에도 나타나는 현상으로 정수압력이 증가함에 따라 에폭시의 유리전이온도 (glass transition temperature)가 변하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 에폭시는 망상구조로 된 재료로서 1차 유리전이온도가 약 130°C에서 2차 유리전이온도가 약 -25°C에서 존재하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 1차 유리전이온도에서는 중추분자들의 큰 움직임이 발생하고 2차 유리전이온도에서는 가교결합된 분자들의 분절운동이 발생하게 된다. Enns와 Gilham(1983)에 의하면 정수압력이 100 MPa 증가시 유리전이온도는 약 20°C 변이된다는 것이 알려져 있다. 따라서 가해진 정수압력이 200 MPa 전후에 도달하면 에폭시의 2차 유리전이온도가 상온으로 변이되며 정수압이 200 MPa 이상에서는 가교결합된 분자들의 분절운동이 더 이상 발생하지 않게 된다. 따라서 200 MPa의 정수압력을 전후하여 압축탄성계수 증가율이 달라지게 된다.

각 정수압력에 따른 압축강도는 이에 상응하는 압축응력-변형률선도에서 최대응력으로 결정하였다. Fig. 5는 정

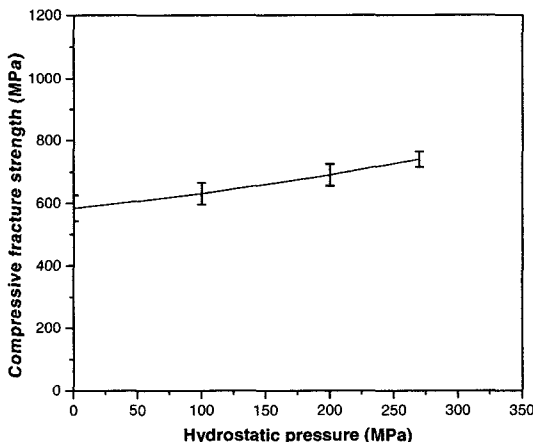


Fig. 5. Variation of compressive fracture strength with respect to hydrostatic pressure.

수압력 증가에 따른 해수가 충분히 흡수된 Carbon-Epoxy 복합재의 압축파괴강도의 변화를 나타낸다. Fig. 5에 나타나 있듯이 실험값들은 편차를 보이나 정수압력이 증가함에 따라 압축강도는 증가함을 알 수 있다. 또한, 압축강도는 정수압력 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 대기압에서 평균압축응력은 584 MPa이었고 270 MPa의 압력에서는 750 MPa 이었다. 즉, 평균압축응력은 적용정수압이 0.1 MPa에서 270 MPa로 증가함에 따라 28%가 증가하였다.

압축변형률은 압축응력-변형률선도에서 최대응력에 따른 변형률로 결정하였다. Fig. 6은 해수 흡수된 Carbon-Epoxy 복합재에 대한 정수압력 증가에 따른 압축파괴변형률의 변화를 나타낸다. 그림에 나타나 있듯이 압축파괴변형률은 압축파괴강도의 경우처럼 정수압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 대기압에서의 압축파괴변형률은 약 2.46%이고 270 MPa에서의 압축파괴변형률은 약 2.67%로서 적용 정수압이 0.1 MPa에서 270 MPa로 증가할 때, 평균 압축파괴변형률은 약 8.5% 증가하였다. 해수가 흡수되지 않은 건조시편의 경우 정수압력이 증가함에 따라 압축파괴강도 및 압축파괴변형률이 선형적으로 증가한다는 것이 여러 연구자에 의해 발표된 바 있다. 정수압력이 작용할 때 압축파괴강도 및 압축파괴변형률의 향상은 크게 다음의 세 가지 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

첫째, 정수압력은 탄소섬유와 에폭시 간의 열팽창계수와 포와송비 차이로 발생하는 잔류응력에 의한 미소균열에 대해 수직 압축응력으로 작용함으로써 균열발생 및 진전을 억제하는 역할을 한다.

둘째, 정수압력은 탄소섬유와 에폭시 계면에서 마찰력

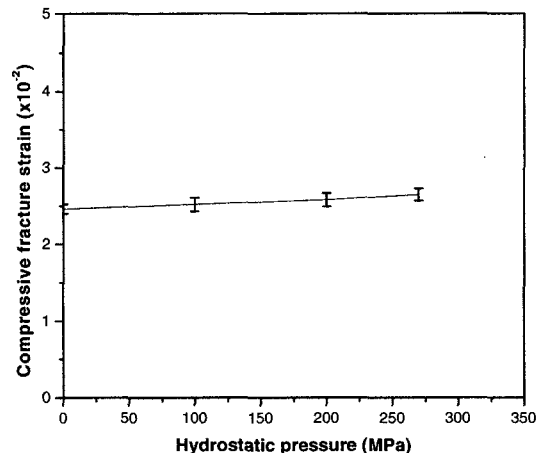


Fig. 6. Variation of compressive fracture strain with respect to hydrostatic pressure.

의 증가를 야기해 탄소섬유와 에폭시 간의 계면결합력을 향상시키는 원인이 된다.

셋째, 정수압력은 시편표면에 수직응력으로 작용함으로써 층간분리 발생 및 미소크랙의 발생을 억제한다. 또한 층간분리 등이 발생하였다 할지라도 진전을 억제하는 역할을 한다. 이와 같은 이유로 정수압력이 작용할 때 탄소섬유/에폭시 복합재가 압축이 되기 위해서는 그에 따른 고응력 및 고변형률을 동반되게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해저환경에서 Carbon-Epoxy 복합재의 압축특성을 이해하기 위해 해수가 충분히 흡수된 Carbon-Epoxy 복합재에 대해 대기압 및 100 MPa, 200 MPa, 270 MPa 정수압 하에서의 압축실험을 수행하였다. 이로써 얻은 일반적인 사실은 정수압력은 시편표면과 시편의 초기 크랙의 진전 및 내성의 증가를 일으키는 평균압축 응력 요소로 작용하며 섬유와 기지재의 반지름방향의 압축응력을 이끌어내며, 섬유-기지재 계면에서의 마찰력이 증가되며 이는 섬유계면에서의 이탈과 접착력을 억제시킨다. 또한 소성변형의 원인 및 기계적인 미세한 크랙과 국부적인 층간분리 및 공간을 발생시킨다. 따라서 정수압이 증가함에 따라 파괴응력 및 파괴변형률은 증가하게 된다. 또한, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 단일방향으로 적층된 Carbon-Epoxy 복합재의 해수 흡수는 6개월 정도에서 포화 상태였으며 이때 흡수율은 약 1.2% 였다.

(2) 압축탄성계수는 200 MPa의 정수압을 전후로 정수압력 증가에 대해 쌍일차로 증가 하였다. 정수압력이 대기압에서 200 MPa로 증가함에 따라 평균 압축탄성계수는 약 10% 증가하였으며 그후 정수압력이 270 MPa로 증가함에 따라 평균 압축탄성계수는 약 2.3%가 추가적으로 증가하였다.

(3) 정수압력이 증가함에 따라 압축과파괴강도와 압축과파괴변형률은 선형적으로 증가하였다. 정수압력이 대기압에서 270 MPa까지 증가함으로써 압축과파괴강도는 약 28% 증가하였고 압축과파괴변형률은 약 8.5%가 증가하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- Enns, J.B. and Gilham, J.K. (1983). Time-temperature-transformation (TTT) cure diagram: modeling the cure behavior of thermoset. *J. of Applied Polymer Science*, 28, 2567-2576.
- 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, 14.
- Ogi, K. and Takeda, N. (1997). Effects of moisture content on nonlinear deformation behavior of carbon fiber-epoxy composites. *Compos. Mater.*, 31, 530-551.
- Pae, K.D. and Carlson, K.S. (1998). Combined effects of hydrostatic pressure and strain-rate on the compressive properties of a laminated, multi-directional graphite/epoxy thick composites. *J. Compos. Mater.*, 32, 49-67.
- Pae, K.D. and Rhee, K.Y. (1995). Effect of hydrostatic pressure on the compressive behavior of thick laminated 45° and 90° unidirectional graphite-fiber/epoxy matrix composites. *Compos. Sci. Technol.*, 53, 281-287.
- Parry, T.V. and Wronski, A.S. (1981). The effect of hydrostatic pressure on the tensile properties of pultruded CFRP. *J. Mater. Sci.*, 17, 2141-2147.
- Parry, T.V. and Wronski, A.S. (1990). The effect of hydrostatic pressure on transverse strength of glass and carbon fiber-epoxy composites. *J. Mater. Sci.*, 25, 3162-3166.
- Rhee, K.Y. and Pae, K.D. (1995). Effects of hydrostatic pressure on the compressive properties of laminated 0° unidirectional behavior of graphite fiber/epoxy thick composites. *J. Compos. Mater.*, 29, 1295-1307.
- Russell, A.J. and Street, K.N. (1989). Moisture and temperature effects on the mode I and mode II interlaminar fracture of carbon-epoxy fracture of carbon-epoxy composites. *Key Eng. Mater.*, 37, 199-208.
- Shin, E.S. and Pae, K.D. (1992). Effect of hydrostatic pressure on the torsional shear behavior of graphite/epoxy composites. *J. Compos. Mater.*, 26, 462-485.
- Shin, E.S. and Pae, K.D. (1992). Effects of hydrostatic pressure on in-plane shear properties of graphite/epoxy composites. *J. Compos. Mater.*, 26, 828-868.
- Zinoviev, P.A., Tsvetkov, S.V., Kulish, G.G., Van, den Berg and L.Van. Schepdael (1998). Mechanical properties of unidirectional organic-fiber-reinforced plastics under hydrostatic pressure. *Compos. Sci. Technol.*, 58, 31-39.