

## 論文

# 준등방성 적층복합재에 있어 압력이 압축 파괴인성에 미치는 영향에 대한 연구

이경엽<sup>\*\*,</sup>, 광대순<sup>\*</sup>, 김상녕<sup>\*</sup>, 이중희<sup>\*\*</sup>

## A Study of the Pressure Effect on the Compressive Fracture Toughness of Quasi-Isotropic Composites

K. Y. Rhee<sup>\*\*,</sup>, D. S. Kwak<sup>\*</sup>, S. N. Kim<sup>\*</sup>, J. H. Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

It is known that the elastic modulus, maximum stress, and maximum strain of fiber-reinforced polymer composites are affected by high pressure. Fracture behavior is also known to be affected by high pressure. In this work, the pressure effect on the compressive fracture toughness of thick quasi-isotropic composites was investigated. Dog-bone type specimens of stacking sequence,  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$  were used. Compressive fracture tests were conducted under four pressure levels. The pressure levels applied were 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, and 300 MPa. Fracture toughness for each pressure level was determined from the compliance method. The results show that the compressive fracture toughness increases with increasing pressure. Specifically, fracture toughness increases 44% as the pressure increases from 0.1 MPa to 300 MPa.

### 초 록

섬유강화 고분자기지 복합재에 있어 탄성계수, 최대응력, 최대변형률, 파괴특성 등이 압력에 의해 영향을 받는다는 것은 잘 알려진 사실이다. 본 연구에서는 준등방성이며 두꺼운 두께를 갖는  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 압력을 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa로 변화시켜 압축 파괴실험을 수행하였으며 이로부터 압력 변화에 따른 파괴특성 변화에 대해 검토하였다. 결과로서 가해진 압력이 증가함에 따라 압축파괴인성은 증가함을 알 수 있었다. 구체적으로 압력이 대기압에서 300 MPa으로 증가할 때 압축파괴인성 값은 약 44% 증가하였다.

### 1. 서 론

섬유강화 고분자기지 복합재를 자동차, 항공기, 선박 등의 구조재로 적용하기 위해서는 이들 복합재에 대한 다양한 환경 하에서의 물성변화 특성파악이 요구된다.

따라서 온도 또는 습도가 섬유강화/에폭시 적층복합재의 강도 및 파괴특성에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-3]. 최근에는 잠수함을 포함 해저에서 기동할 수 있는 구조물을 섬유강화/에폭시 복합재로 제작하기 위한 기초연구로서 압력 환경에서 섬유강화

<sup>\*\*\*</sup> 경희대학교 기계·산업시스템 공학부, 교신저자(E-mail: rheeky@nms.kyunhee.ac.kr)

<sup>\*</sup> 경희대학교 기계·산업시스템 공학부

<sup>\*\*</sup> 전북대학교 신소재 공학부

/에폭시 복합재의 물성변화에 대한 논문이 발표되고 있다. 초기의 압력 환경에서 섬유강화/에폭시 복합재의 물성특성 변화는 Parry와 Wronski[4-5]에 의해 연구되었다. 그들은 연속인발공정(pultrusion)으로 제작된 유리섬유/에폭시와 탄소섬유/에폭시 복합재에 대해 압력을 200MPa까지 변화시켜 압력 환경이 섬유강화/에폭시 복합재의 압축 및 인장특성에 미치는 영향을 해석하였다.

압력이 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 물성특성에 미치는 영향에 대한 연구는 Pac 등[6-10]에 의해 광범위하게 이루어졌다. 탄소섬유/에폭시 적층복합재에서 압력이 비틀림 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 Shin과 Pac[6-7]에 의해 이루어졌으며, 압축특성에 미치는 영향에 대한 연구는 Rhee와 Pac[8-9]에 의해 이루어졌다. 또한 압력 환경에서 압축 변형률 속도가 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축특성에 미치는 영향에 대한 연구가 Pac와 Carlsson[10]에 의해 행해졌다.

그러나 위의 연구는 압력이 유리섬유 또는 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 압축특성, 인장특성, 전단특성에 미치는 영향에 국한된 것으로서 압력 환경에서의 층간분리 거동에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 층간분리는 섬유강화 적층복합재에서 빈번하게 발생하는 파괴형태의 하나라는 것은 잘 알려진 사실이다.

최근에는 Rhee[11]에 의해  $0^\circ$  단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 정수압이 층간분리 거동에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어졌다. 결과로서 층간분리에 의한 파괴는 압력에 의해 상당한 영향을 받는다는 것이 발표되었다. 특히 층간분리인성의 경우 압력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가할 때 34% 이상 증가한다는 것이 발표되었다.

한편 섬유강화 적층복합재의 층간분리에 의한 파괴 거동은 섬유방향, 적층순서, 하중방향에 의해 영향을 받는다. 따라서 압력 환경에서 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 층간분리 거동을 폭넓게 이해하기 위해서는 다양한 적층성을 갖는 경우에 대한 압력 환경에서 층간분리에 의한 파괴실험이 필요하다.

본 논문에서는 다방향으로 적층된 두꺼운 두께를 갖는 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 압력 변화에 따른 압축 파괴인성 변화에 대해 연구하였다. 즉 준등방성,  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 대해 압력을 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa로 변화시켜 압축 파괴실험을 수행하였으며 이로부터 압력 변화에 따른 파괴특성 변화에 대해 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 압축 파괴시험편 제작

본 연구에서는 시험편의 재료로서 (주)한국카본에서 생산하는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(CUI25NS)를 사용하였다. CUI25NS 프리프레그는 열경화성 복합재료 탄소섬유 함유율은 약 64%이다. 시험편제작을 위해 88층의 프리프레그를  $45\text{cm} \times 25\text{cm}$  크기의 금형 내에  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11s}$ 에 따른 적층순서로 적층한 후 오토클레이브 내에서 열 및 압력을 가함으로써 성형하였다.

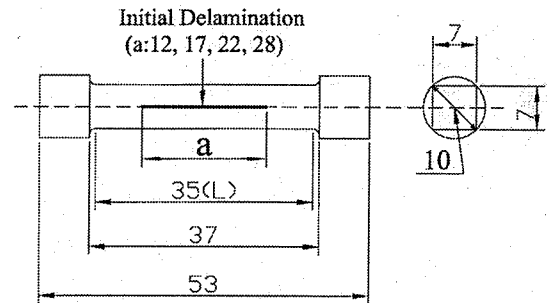


Fig. 1 Configuration of test specimen.

성형된 판의 두께는 약 10.8mm이다. 압력 증가에 따른 파괴인성 변화를 컴플라이언스 방법을 적용하여 결정하기 위해 네 단계의 초기 층간분리 길이를 갖는 시험편을 제작하였으며 초기 층간분리는 44층과 45층 사이에 두께가 약  $13\mu\text{m}$  캡톤(kapton) 막을 삽입하여 형성하였다. 시험편은 압축하중 작용시 양단에서의 파괴(end-crushing)가 발생하지 않도록 양 끝은 직경이 10mm, 가운데 부분은 폭 및 두께가 각각 7mm인 도그본(dog-bone) 형태로 가공하였다. 시험편의 모양, 크기 및 4단계의 초기 층간분리 길이는 Fig. 1에 나타나 있다.

### 2.2 압축 파괴실험

압축실험은 고압 인장-압축기기(high pressure tension-compression apparatus)를 이용하여 대기압(0.1 MPa) 및 3단계(100 MPa, 200 MPa, 300 MPa)의 정수압을 가한 상태에서 시행하였다. 압축실험은 1.0mm/min의 일정 변형

를 속도 하에서 시행하였으며 실험에 따른 하중 및 변형 데이터는 IBM PC에 설치된 LABTECH NOTE BOOK(version 6.3) 프로그램을 이용 취합 및 해석하였다. Fig. 2는 고압 인장-압축 기기를 나타내는 도형이다. 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번의 실험을 각각의 같은 압력 조건하에서 반복하여 시행하였다. 시편 표면은 시험장치 내의 실리콘 오일 (Dow Corning, 200)이 시편에 흡수되는 것을 최대한 억제하기 위해 실리콘을 이용해 방수막 처리하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 두꺼운 두께를 갖는 준등방성 탄소섬유/에폭시 복합재에 있어 압력이 압축 파괴거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 초기 층간분리 길이가 12mm인 경우 압력 증가 (대기압, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa)에 따른 대표적인 하중-변위 곡선을 측정된 결과이다. Fig. 3에 나타나 있듯이 컴플라이언스, 파괴하중 등과 같은 재료의 파괴특성이 압력에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 압력 증가에 상관없이 파괴거동이 선형적임을 알 수 있다.

압력이 컴플라이언스에 미치는 영향을 이해하기 위해 압력 증가에 따른 컴플라이언스를 측정하였다. 컴플라이언스는 변위를 하중으로 나눈값으로서 각 압력에 대한 하중-변위 선도의 기울기를 측정 이에 대한 역수를 취함으로써 압력에 따른 컴플라이언스를 결정하였다.

Fig. 4는 각 균열길이에 따른 평균 컴플라이언스 변화를 나타내고 있다.

각 경우의 평균 컴플라이언스는 동일 조건으로 결정된 컴플라이언스들을 평균하여 결정하였다. Fig. 4에 나타나 있듯이 각 층간분리 길이에 있어 압력이 증가함에 따라 컴플라이언스는 감소함을 알 수 있다.

예를 들면,  $a/L=0.48$ 인 경우 0.1 MPa과 300 MPa 압력에서의 컴플라이언스는  $9.1 \times 10^{-8}$  m/N과  $6.92 \times 10^{-8}$  m/N로서 정수압이 0.1 MPa에서 300 MPa로 증가함에 따라 컴플라이언스는 24%이상 감소한다.

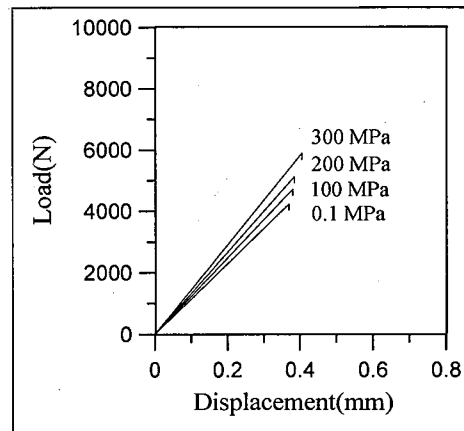


Fig. 3 Load-displacement curves obtained at various pressures for  $a/L=0.34$ .

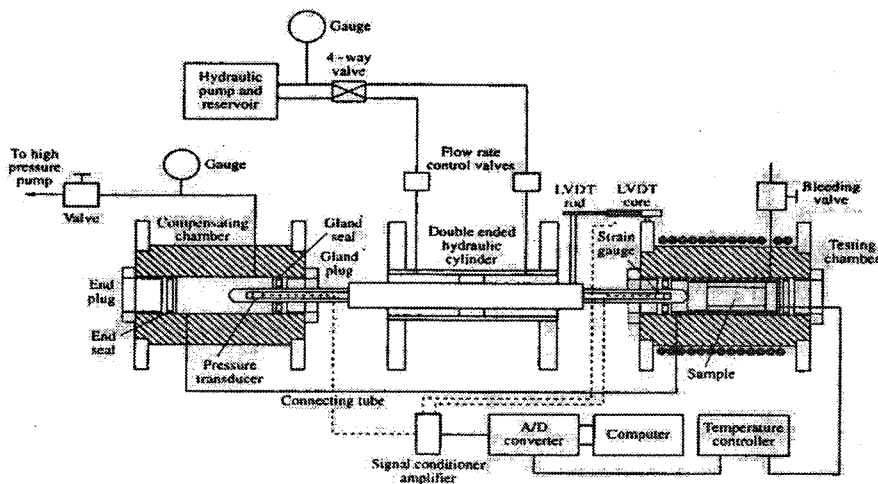


Fig. 2 Configuration of high pressure tension/compression apparatus.

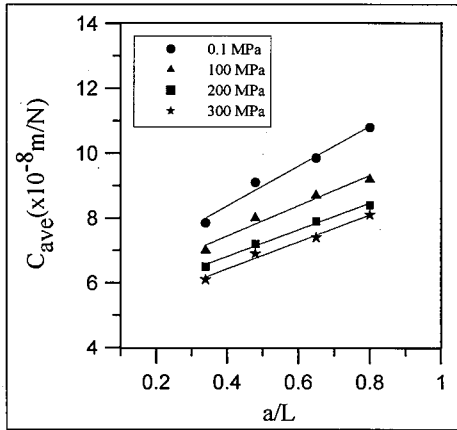


Fig. 4 Variation of average compliance as functions of delamination and pressure.

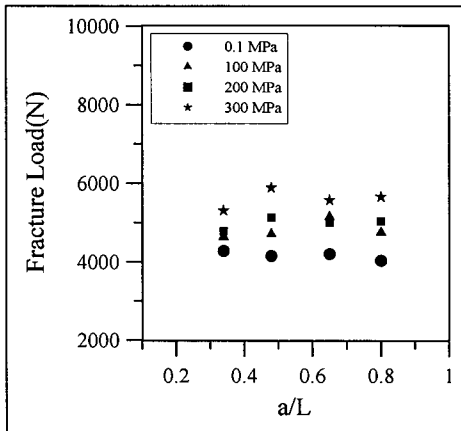


Fig. 5 Variation of average fracture load as functions of delamination and pressure.

압력이 증가함에 따라 컴플라이언스가 감소하는 현상은 압력이 시편에 수직 압축응력으로 작용하는 것이 주원인으로 0° 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 시편 경우 압력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가함에 따라 컴플라이언스는 7.3%이상 감소한다는 것이 발표된 바 있다 [11]. Fig. 4는 또한 각 압력에 있어 층간분리가 증가함에 따라 컴플라이언스가 선형으로 증가함을 나타내고 있다. 따라서 최소 자승법을 이용해 각 압력에 대한 평균 컴플라이언스의 층간분리에 대한 증가를 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{ave} = 5.73 + 6.01 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 0.1 MPa \quad (1)$$

$$C_{ave} = 5.33 + 5.23 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 100 MPa \quad (2)$$

$$C_{ave} = 4.97 + 4.87 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 200 MPa \quad (3)$$

$$C_{ave} = 4.75 + 4.60 \frac{a}{L} (10^{-8} m/N); 300 MPa \quad (4)$$

윗 식에서  $C_{ave}$ 는 평균 컴플라이언스를, “ $a$ ”는 층간분리 길이를, “ $L$ ”은 게이지 길이를 나타낸다. 식 (1)-(4)의 절편은 층간분리가 발생하지 않은 경우의 컴플라이언스로 정수압이 증가함에 따라 탄성계수가 증가함을 알 수 있다.

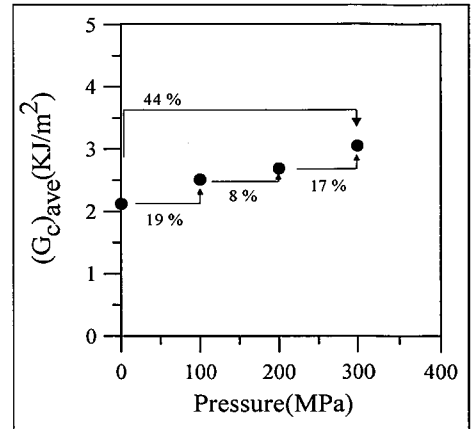


Fig. 6 Variation of fracture toughness,  $G_c$  as a function of pressure.

압력 증가가 파괴하중에 미치는 영향을 알아보기 위해 압력 증가에 따른 파괴하중을 측정하였다. 파괴하중 값은 층간분리를 진전시키게 하는 하중 값으로 하중-변위 선도에서 하중이 증가하다 감소하기 시작하는 점의 하중, 즉 최대 하중값으로 결정하였다. Fig. 5는 각 압력 및 층간분리 증가에 따른 평균 임계하중 값의 변화를 나타낸다. 평균 파괴하중 값은 컴플라이언스 경우처럼 동일조건으로 실험한 최소 세 개 이상 시편의 파괴하중 값을 평균하여 결정하였다. Fig. 5에 나타나 있듯이 네 경우 층간분리 모두 압력이 증가함에 따라 평균 파괴하중 값은 증가함을 알 수 있다. 예를 들면  $a/L=0.65$ 인 경우 0.1 MPa와 300 MPa 압력에서의 평균 파괴하중 값은 각각 4200N과 5570N으로서 압력이 0.1 MPa에서 300 MPa로

증가함에 따라 평균 파괴하중 값은 32%이상 증가한다. 압력이 증가함에 따라 파괴하중이 증가하는 이유는 압력이 가해지면 탄소섬유와 에폭시의 계면에서 마찰력이 증가해 미소균열 및 탄소섬유의 이탈을 방지하는 효과를 야기하기 때문이다. 특히 층간분리가 발생한 경우 압력은 층간분리면에 수직 압축응력으로 작용함으로써 층간분리의 진전을 억제하는 역할을 한다. 이와 같은 섬유이탈 방지와 층간분리 진전 억제 효과는 압력의 증가에 비례해 증가한다. 따라서 압력이 증가함에 따라 파괴하중도 증가하게 된다.

압력 변화가 파괴인성에 미치는 영향을 이해하기 위해 압력 증가에 따른 파괴인성 변화를 컴플라이언스 방법을 이용해 다음의 식을 적용해 측정하였다[12].

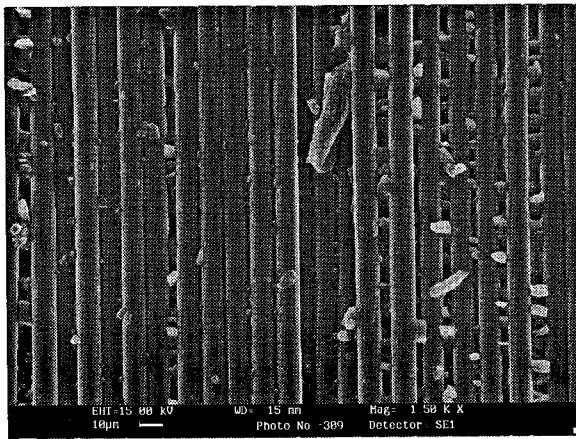


Fig. 7 SEM photographs of fracture surfaces tested at 0.1 MPa pressure.

$$G_c = -\frac{P_{\sigma}^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (5)$$

윗 식에서  $G_c$ 는 파괴인성을, " $B$ "는 시편 두께를, " $P_{\sigma}$ "은 파괴하중을, " $C$ "는 컴플라이언스를, " $a$ "는 층간분리의 길이를 나타낸다. 각 압력에 대한 층간분리 길이에 따른  $G_c$  값의 결정은 식 (1)-(4)에서 컴플라이언스의 도함수 ( $dC/da$ )를 구하고 또한 Fig. 5로부터 그에 따른 파괴하중을 결정한 후 이를 식 (5)에 대입해 결정하였다. Fig. 6은 압력 변화에 따른 평균  $G_c$  값,  $(G_c)_{ave}$ 의 변화를 나타낸다.

Fig. 6에 명백히 나타나 있듯이 압력이 증가함에 따라  $(G_c)_{ave}$  값이 증가함을 알 수 있다. 대기압, 100 MPa, 200 MPa 및 300 MPa 압력에서의  $(G_c)_{ave}$  값은 각각 2.12

$\text{kJ/m}^2$ , 2.51  $\text{kJ/m}^2$ , 2.69  $\text{kJ/m}^2$ , 3.05  $\text{kJ/m}^2$ 으로서 압력이 대기압(0.1 MPa)에서 300 MPa로 증가함에 따라  $(G_c)_{ave}$  값은 44%이상 증가한다. 압력이 증가함에 따라  $G_c$  값이 증가하는 것은 압력이 증가함에 따라 컴플라이언스 및 그에 따른 도함수가 감소하는 사실을 고려할 때 파괴하중이 증가하는데 기인하는 것으로 판단된다.

압력 증가가 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 파괴기구에 미치는 영향을 이해하기 위해 주사현미경을 이용해 파단면을 검토하였다. Fig. 7은 대기압에서 실험한 시편의 파단면을 나타내고 있으며 Fig. 8는 300 MPa 압력에서 실험한 시편의 파단면을 나타내고 있다.

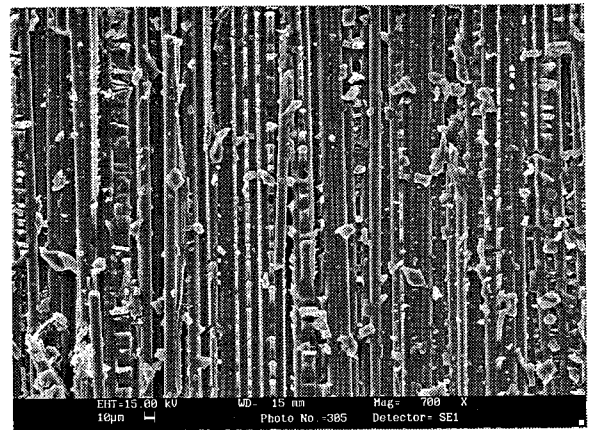


Fig. 8 SEM photographs of fracture surfaces tested at 300 MPa pressure.

두 그림에 나타나 있듯이 두압력 경우 모두 섬유강화 적층복합재에서 발생할수 있는 파괴기구인 섬유파단, 섬유의 기지재료로부터의 분리, 기지재의 파괴 등과 같은 파괴가 발생하였음을 알 수 있다. 특히 두 경우의 섬유표면을 비교하였을 때 대기압에서 실험한 시편의 섬유표면이 다소 깨끗한데 비해 300 MPa에서 실험한 시편의 섬유표면은 다량의 에폭시가 섬유에 부착되어 있음을 알 수 있다. 또한 기지재를 비교하였을 경우 대기압 시편에서는 기지재가 연속적인 해클(hackle)현상이 일어났음에 비해 300 MPa에서는 소성변형이 일어났음을 알 수 있다. 위와 같이 압력이 증가함에 따라 다량의 에폭시가 섬유에 부착되거나 소성변형이 발생함으로써 파괴인성이 증가하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 두꺼운 두께를 갖는  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{11}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 대해 압력을 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa로 변화시켜 압력 증가가 압축 파괴특성에 미치는 영향을 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 압력이 증가함에 따라 컴플라이언스는 감소하며 파괴 하중 및 파괴인성은 증가한다.
- 2) 각 압력에 있어 컴플라이언스는 층간분리가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.
- 3) 압력이 증가함에 따라 파괴인성이 증가하는 주원인으로는 미소균열의 억제와 에폭시의 소성변형 및 섬유에 부착되는 현상이 증가하기 때문이다.

#### 후 기

본 연구의 일부는 과학기술부의 원자력연구개발사업중 원자력기초연구사업의 일환으로 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, 1989, pp. 199-208.
- 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*, 1993, pp. 31-340.
- 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, 1995, pp. 333-342.
- 4) Parry, T. V. and Wronski, A. S., "The Effect of Hydrostatic Pressure on the Tensile Properties of Pultruded CFRP," *J. of Materials Science*, Vol. 17, 1981, pp. 2141-2147.
- 5) 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, 1982, pp. 3656-3662.
- 6) 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, 1992, pp. 462-485.
- 7) 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, 1992, pp. 828-868.
- 8) Rhee, K. Y. and Pae, K. D., "Effects of Hydrostatic Pressure on the Compressive Properties of Laminated  $0^\circ$  Unidirectional Behavior of Graphite Fiber/Epoxy Thick Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 29, 1995, pp. 1295-1307.
- 9) Pae, K. D. and Rhee, K. Y., "Effects of Hydrostatic Pressure on the Compressive Behavior of Laminated  $45^\circ$  and  $90^\circ$  Unidirectional Behavior of Graphite Fiber/Epoxy Matrix Thick Composite," *Composite Science and Technology*, Vol. 53, 1995, pp. 281-287.
- 10) 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, 1998, pp. 49-67.
- 11) Rhee, K. Y., "Hydrostatic Pressure Effect on the Fracture Toughness of Unidirectional( $0^\circ$ ) Graphite/Epoxy Laminated Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 34, 2000, pp. 599-613.
- 12) Chou, I., Kimpara, I., Kageyama, K. and Ohsawa, I., "Mode I and Mode II Fracture Toughness Measured between Differently Oriented Plies in Graphite/Epoxy Composites," *ASTM STP 1230*, 1995, pp. 132-151.