

〈논 문〉

고압하에서 적층복합재의 기계적 거동에 대한 실험적 고찰

이경엽* · 배국동**

(1994년 9월 12일 접수)

Experimental Investigation on the Mechanical Behavior of Graphite/Epoxy Composites Under Hydrostatic Pressure

K. Y. Rhee and K. D. Pae

Key Words : Composites(복합재료), Stress-Strain Curve(응력-변형률 곡선), Compressive Modulus(압축계수), Compressive Fracture Stress(압축 파괴응력), Compressive Fracture Strain(압축 파괴변형률), Micro-Crack(미소균열)

Abstract

In order to determine the effects of hydrostatic pressure on the mechanical behavior of graphite fiber reinforced composites, the modulus, fracture stress (maximum stress), and fracture strain of graphite/epoxy composites have been determined as a function of pressure. Composite specimens used in this study were 90-deg unidirectional and had a 60% fiber volume fraction. Compressive tests under five different pressure levels were conducted. The result showed the modulus measured from an initial slope of stress-strain curve increased bilinearly with pressure with a break at 200 MPa. It was also found that fracture stress and fracture strain increased in a linear fashion with pressure.

1. 서 론

복합재료가 기존의 금속재료에 비해 여러 가지 장점이 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그럼에도 복합재료가 구조물 재료로서 충분히 이용되지 않고 있는 이유는 복합재료에서 나타나는 복잡한 파괴현상에 있다고 하겠다. 따라서 복합재료의 파괴현상을 해석하기 위한 연구가 광범위하게 이루어졌다.^(1~3) 그러나 이와 같은 연구는 대부분이 대기압하에서의 파괴현상에 관련된 것으로서, 소수의 연구만이 정수압이 복합재료의 기계적 거동에 미치는 영향을 취급하고있다. 정수압이 복합재료의 기계적 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 Parry와 Wronski

에 의하여 활발히 이루어졌다. 그들은 압출된 복합재료(pultruded unidirectional composites)를 이용하여 고압하에서 인장과 압축실험을 시행함으로써 압력이 인장 및 압축계수에 미치는 영향을 연구하였다.^(4,5) 그들은 또한 같은 재료로 굽힘실험을 행하여 압력이 복합재료의 파괴현상에 미치는 영향을 연구한 바 있다.⁽⁶⁾ 한편 최근에는 동일방향으로 적층된 복합재료에 대하여 고압하에서 뒤틀림실험을 행함으로써 압력이 적층된 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 연구가 폭넓게 이루어졌다.^(7,8) 그러나 압력이 적층된 복합재료의 기계적 특성에 미치는 일반적 영향을 이해하기 위하여서는 이와 연관된 폭넓은 연구가 추가로 요구되고 있다.

본 논문에서는 90°의 단일방향으로 적층된 복합재료(SP-319)를 이용하여 고압하에서의 압축실험을 행함으로써, 고압이 복합재료의 압축적 기계적

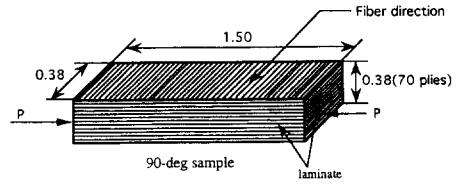
*회원, 원광대학교 기계설계학과

**회원, 렛거스대학교 기계항공과

거동에 미치는 영향을 해석하였다. 즉, 기계적 특성인 압축계수, 파괴응력, 파괴변형률 등의 변화를 압력의 함수로서 표시하고 특성을 검토하였다.

2. 실험

본 연구에서는 시편의 재료로서 3M 회사에서 생산하는 SP-319으로 일명 “Scotchply” 로 불리는 탄소섬유/에폭시 복합재료를 사용하였다. SP-319는 3M 사로부터 넓이 10.5 인치 크기의 프리프레그 테이프 상태로 공급되었으며 이는 -32° 이하의 온도에서 보관되었다. SP-319은 열경화성재료로서 매트릭스재료는 에폭시 (3M PR-319)이고 보강재로서는 탄소섬유(Thornel 300)으로 구성되어 있다. 성형된 각 프리프레그 테이프의 두께는 0.0055 인치이며 탄소섬유 함유율은 60% 이다. 시편의 제작을 위해 각각의 프리프레그 테이프를 금형 내에 같은 방향으로 적층한 후 3M 사에서 정한 성형방법을 적용하였다. 즉 금형을 120°C의 성형온도로 유지한 상태하에 0.62 MPa의 압력을 1시간 가함으로서 판벽을 만들고 이를 절단하여 정해진 시편의 크기로 가공하였다. 가공된 시편은 135°C의 온도로 유지된 진공오븐 내에서 4시간 동안 후성형(post-cure) 되었다. 또한 시편의 실리콘 오일에 대한 흡수효과를 최소화하기 위해 시편을 방수막으



All dimensions are inches

Fig. 1 Configuration of test sample

로 처리하였다. 시편의 모양과 크기는 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 1에서 P는 시편에 가해진 압축하중의 방향을 나타낸다.

압축실험은 압력에 따른 복합재의 기계적 특성 변화를 해석하기 위하여 고압 인장-압축기기(high pressure tension-compression apparatus)를 이용하여 5단계(0.1 MPa (대기압), 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa, 400 MPa)의 서로 다른 압력을 가한 상태에서 시행하였다. 또한 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세번의 실험을 각각의 같은 압력조건 하에서 반복하여 시행하였다. 각 압축 실험은 4.0 mm/min의 일정한 변형률속도 하에서 시행하였으며, 실험에 따른 하중 및 변형데이터는 IBM PC에 설치된 Labtech Notebook (version 6.3) 프로그램을 이용 취합 및 해석하였다. Fig. 2는 고압 인장-압축기기를 나타내는 도형이다. 본 연구에 이용된 고압 인장-압축기기에 대한 설명과 실험

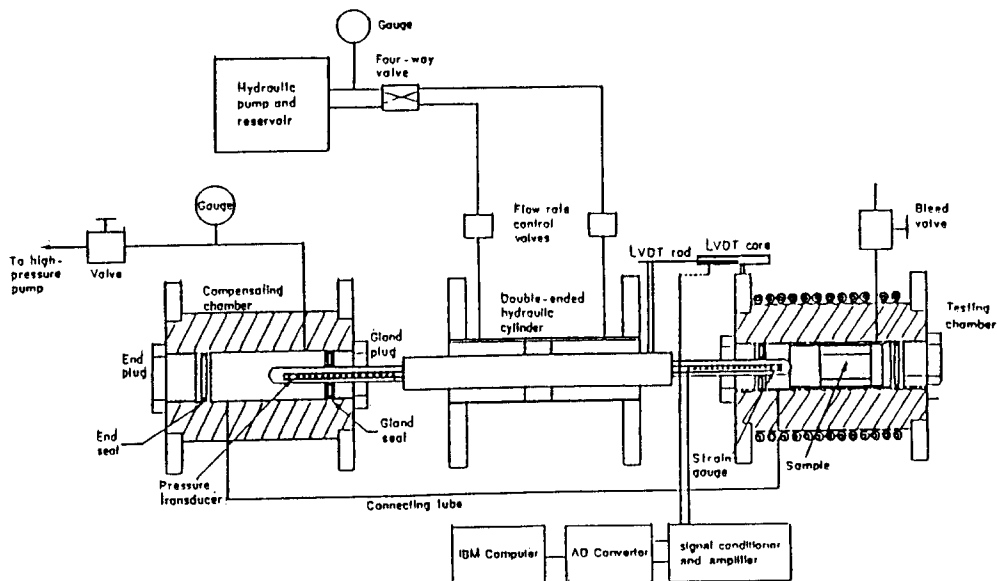


Fig. 2 High-pressure tension/compression apparatus

방법 등은 참고문헌 (9)에 자세히 서술되어 있다.

3. 결과 및 검토

Fig. 3은 90°의 단일방향으로 적층된 복합재료에 있어서 정수압의 변화에 따른 전형적인 압축응력-압축 변형률 곡선을 나타내고 있다. 그림에서 나타나 있듯이 재료의 기계적 특성치인 압축계수, 파괴응력, 파괴변형률 등이 압력에 의하여 영향을 받을 수 있다. 압축계수는 재료의 압축강성을 나타내는 물성치로서 인장시험시 탄성계수를 결정하는 방법을 적용 Fig. 3에서 각 압력에 대한 응력-변형률 곡선으로부터 원점을 통과한 기울기를 측정

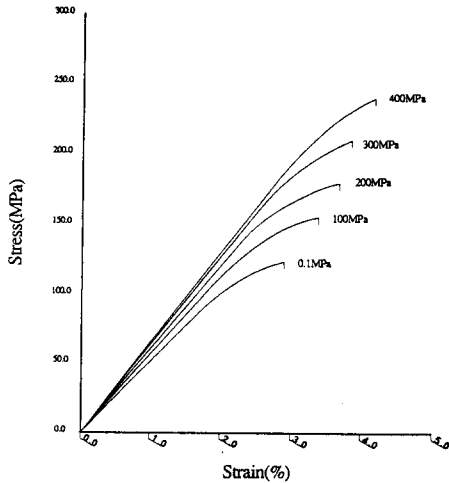


Fig. 3 Typical compressive stress-strain curves for different pressures

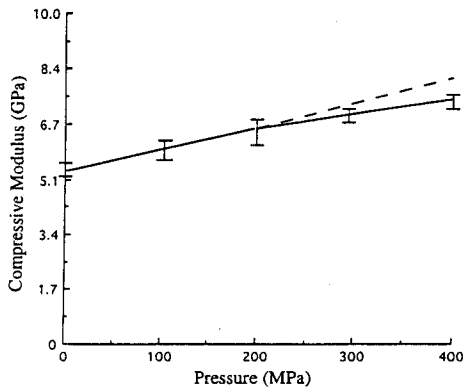


Fig. 4 Variation of elastic modulus as a function of pressure

함으로써 결정하였다.⁽⁹⁾

압력에 따른 압축계수의 변화는 Fig. 4에 표시되어 있으며 그림에서 나타나 있듯이 압력이 증가함에 따라 압축계수는 두 개의 기울기로 선형적으로 증가한다. 여기서 주목하여 할 점은 압력이 대기압에서 200 MPa 까지는 압축계수가 급속히 증가하지만 그 후 압력이 더욱 증가하면 그 이후에는 압축계수가 완만히 증가하는 현상이다. 위의 현상은 보강재인 탄소섬유가 매트릭스재료인 에폭시보다 압력의 영향을 적게 받는다는 사실을 고려하면 아마도 압력이 증가함에 따라 에폭시의 상태변화가 압축계수 변화에 중요한 역할을 하는 것으로서 설명될 수 있을 것이다. 즉 압력의 증가는 에폭시에 대한 유리전이 온도(glass transition temperature)의 변이를 야기하고, 이는 또한 에폭시의 상태변화에 영향을 준다. 일반적으로 재료는 유리전이 온도를 전후하여 점성이 크며 취성적이고 변형하기 어려운 상태에서 점성이 작고 변형하기 쉬운 상태로 변한다 즉 가해진 압력이 200 MPa 전후에 도달하면 에폭시의 2차 유리전이 온도(sub-glass transition temperature)가 상온으로 변이되는 것으로 고려된다. 그러므로 가해진 압력이 200 MPa를 전후하여 압력에 따른 압축계수 증가율이 달라진다. 유리전이 온도변이가 열경화성재료인 에폭시의 상태변화에 미치는 영향에 대한 연구는 Enns 와 Gilham에 의하여 폭넓게 이루어진 바 있다.⁽¹⁰⁾

정수압이 증가함에 따른 파괴응력과 파괴변형률의 변화는 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타나 있다. Figs. 5, 6에서의 에러 바(error bar)는 실험데이터

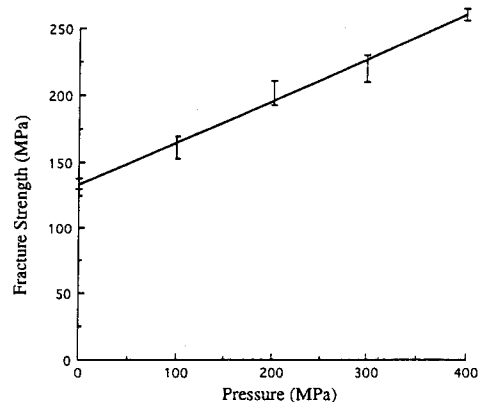


Fig. 5 Variation of fracture strength as a function of pressure

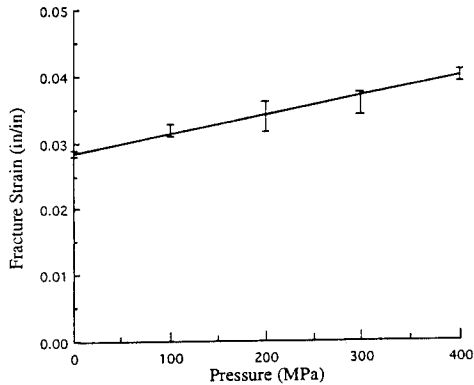


Fig. 6 Variation of fracture strain as a function of pressure

의 최소치와 최대치를 나타내고 있다. 그림에 의하면 압력이 증가함에 따라 파괴응력과 파괴변형률이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 정수압이 증가함에 따라 탄소섬유 복합재료의 파괴응력과 파괴변형률이 증가하는 현상은 다음의 세 가지 요인으로부터 설명될 수 있을 것이다. 첫째는 각각의 재료 조성물에 대한 정수압효과이다. 그런데 앞에서 기술한 것처럼 탄소섬유강도는 가해진 정수압에 의해 영향을 크게 받지 않는 것으로 고려되고 있다. 그러나 에폭시를 포함한 대부분의 폴리머에 있어서 탄성계수, 항복 및 인장강도는 가해진 정수압이 증가함에 따라 크기가 증가하는 것으로 알려져 있다. 실제로 정수압이 대기압에서 400 MPa 까지 변함에 따라 에폭시의 파괴강도는 60%까지 증가하는 것이 알려져 있다.⁽⁷⁾ 두 번째 요인은 정수압이 작용함에 따라 섬유와 매트릭스재료간의 접촉면에서 전단응력에 대한 크기 변화이다. 섬유강화 복합재에 있어서 섬유재와 매트릭스재료 각각의 열팽창계수와 푸아송비 차이로 인한 접촉면에서 잔류응력이 존재한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 또한 이 잔류응력은 외부하중이 작용하지 않은 상태에서도 미소균열을 야기시킨다. 한편 정수압이 가해지면 이는 섬유와 매트릭스재료의 접촉면에서 마찰력 또는 전단응력을 증가시킨다. 따라서 섬유와 매트릭스재료의 접촉면에 있어서 미소균열의 발생은 마찰력 및 전단응력의 증가로 억제된다. 또한 마찰력 및 전단응력의 증가는 매트릭스재료에 대한 섬유의 이탈을 방지하는 효과를 야기한다. 따라서 정수압이 가해지면 복합재의 파괴강도는 증가하게 된다. 세 번째 요인은 적층면에서 층간분리가 발생한 경우 정수압

은 분리면에서 수직 압축응력으로 작용함으로써 층간분리에 대한 진전을 억제하는 역할을 한다. 또한 매트릭스 재료에 있어서 기공 등이 존재할 경우 정수압이 작용하면 이는 매트릭스재료와 기공간의 압축성비 차이로 인하여 재료와 기공간에 전단응력을 발생시킨다. 이는 기공주위에 있어서 국소적인 소성변형을 야기시키므로써 기공의 붕괴가 발생한다. 따라서 정수압이 작용하면 기공 등과 같은 재료의 결함이 회복된다. 이와 같은 현상에 기인할 때 정수압의 작용이 복합재의 급작스런 파괴를 방지하고 급속한 층간분리 진전을 억제한다는 것은 명백하다. 그러므로 정수압 하에서 복합재를 변형시키고 파괴하기 위해서는 그 영향을 극복하기 위한 높은 응력이 요구된다. 또한 압력증가에 따른 파괴강도의 증가는 복합재 시스템의 압력증가에 따른 변형률의 증가를 수반하게 한다.

압력이 시험편의 파괴형태에 미치는 영향을 이해하기 위하여 각 압력에 따른 파괴된 시험편에 대한 파단면검사를 행하였다. 정수압이 낮게 (0.1 MPa, 100 MPa) 가해진 시험편의 파괴형태는 층간분리가 먼저 발생하며 그 후 한 개 또는 몇 개의 균열이 압축하중방향에 대하여 30° 방향으로 진전된다. 압력이 증가하면 균열의 숫자도 증가되며 균열의 진전방향도 30°에서 증가하여 압력이 400 MPa에서는 45°로 증가하였다. Fig. 7에는 가해진 압력이 300 MPa에서 파괴된 시험편의 파단면을

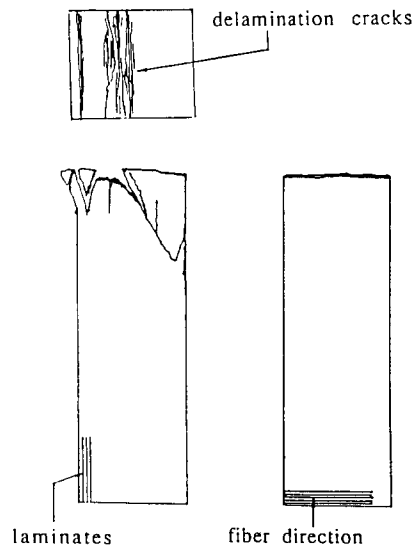


Fig. 7 Typical fractured sample tested at 300 MPa

나타내고 있다. 그러나 압력이 복합재의 파괴형태에 미치는 영향을 충분히 이해하기 위해서는 섬유 방향이 다른 시험편의 파단면 검토 비교가 필요하다. 이는 추후의 논문에서 다룰 예정이다.

4. 결 론

압력이 복합재료의 기계적 거동에 영향을 준다는 것은 잘 알려진 사실이다. 압력에 따른 복합재료의 기계적 거동에 대한 초기 연구로서 5단계(0.1 MPa (대기압), 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa, 400 MPa)의 압축실험을 시행하였는데 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 파괴응력과 파괴변형률은 압력이 증가함에 따라 대체로 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

(2) 압축계수는 200 MPa의 압력을 전후하여 서로 다른 기울기로서 증가함을 알 수 있었다. 즉 압력이 200 MPa 까지는 압축계수가 급속히 증가하지만 그 이후에는 증가율이 감소한다. 이는 압력에 따른 유리전이 온도변이에 기인하는 것으로 고려되며 좀더 정확한 해석을 위해서는 압력이 200 MPa를 전후한 보다 많은 실험이 요구된다.

(3) 압력이 복합재료의 기계적 거동에 미치는 영향을 충분히 이해하기 위해서는 압력을 고려한 이론적 해석 및 파단면검사를 통한 보다 종합적인 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) Wang, S. S., 1983, "Fracture Mechanics for Delamination Problem in Composite Materials," *J. of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 210~223.
 (2) Mall, S. and Johnson, W.S., 1986, "Characterization of Mode I and Mixed-Mode Failure of Adhesive Bonds between Composite Adherends," *ASTM STP 893*, pp. 322~334.

(3) Agarwal, B. D. and Bajpai, K.K., 1988, "Fracture Toughness of Glass/Epoxy Laminates through the J-integral Approach," *Composite Structure*, Vol. 9, pp. 37~51.
 (4) Parry, T. V. and Wronski, A. S., 1981, "The Effect of Hydrostatic Pressure on the Tensile Properties of Pultruded CFRP," *J. of Materials Science*, Vol. 20, pp. 2141~2147.
 (5) Wronski, A. S. and Parry, T. V., 1982, "Compressive Failure and Kinking in the Uniaxially Alligned Glass-Resin Composite Under Superimposed Hydrostatic Pressure," *J. of Materials Science*, Vol. 17, pp. 3656~3662.
 (6) Parry, T. V. and Wronski, A. S., 1981, "Kinking and Tensile, Compressive and Interlaminar Shear Failure in Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Beams Tested in Flexure," *J. of Materials Science*, Vol. 16, pp. 439~450.
 (7) 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*, Vol. 26, pp. 462~485.
 (8) Shin, E. S. and Pae, K. D., 1992, "Effects of Hydrostatic Pressure on In-Plane Shear Properties of Graphite/Epoxy Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 828~868.
 (9) 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. of Composite Materials*, Vol. 29, pp. 1295~1307.
 (10) 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*, Vol. 28, pp. 2567~2591.