

유리섬유 혼성 복합재료의 충격 에너지 흡수에 관한 연구

전성식¹, 임태성¹, 이대길¹, 김주학², 나상욱³, 박창현⁴

¹KAIST 기계공학과, ²한국원자력 연구소, ³애경화학주식회사 기술연구소, ⁴(주)현대화이바

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성 (강성/밀도), 비강도 (강도/밀도)를 가지고 있으며 감쇠특성⁽¹⁾과 충격 특성⁽²⁾이 좋아, 항공기나 우주선의 구조에 널리 사용되어 왔다^(3,4). 또한 복합재료의 가격이 저렴해짐에 따라 자동차 구조용 재료로의 이용이 증가하고 있다^(3,6). 자동차의 구조에 복합재료를 사용하는 응용 예로는, 자동차의 차체 외에도 트럭의 판 스프링 (Leaf spring)을 유리섬유 에폭시 복합재료를 사용하여 제작하였으며, 단섬유 폴리프로필렌 복합재료로 I빔형의 범퍼를 제작하였다⁽⁵⁾. 또한, 후륜구동 자동차의 구동축 (Driveshaft)을 복합재료로 일체형 (One-piece)으로 제작하여 높은 고유진동 특성을 가지도록 하였으며⁽⁶⁾, 독일의 폭스바겐 사에서는 Auto-2000형 자동차의 뒤 차축을 복합재료로 만들고, 차의 연비향상 및 승차감을 향상시켰다는 보고가 있다⁽⁷⁾. 또한 RTM (Resin Transfer Molding)을 통하여 공기 압축기와 자동차 수퍼차아저 (Supercharger)에 쓰이는 로터 (Rotor)를 제작하여, 기계가공이 어렵거나 가공비가 많이 드는 제품의 대체화⁽⁸⁾ 및 로봇의 구동에 쓰이는 하모닉 드라이브 (Harmonic drive)나 마찰 감속기 (Traction drive)의 플렉스플라인 (Flexspline)의 복합재료 대체화가 진행 중에 있다^(9,10). 이와 같이 복합재료의 응용은 계속 증가되고 있으며, 최근에는 토목 건축쪽으로도 확장되고 있는 추세이다⁽¹¹⁾. 본 논문에서는 계측장비가 장착된 샤프 시험기를 이용하여 유리섬유 강화 에폭시 복합재료에 이종재료가 삽입된 혼성 복합재료의 충격에너지 흡수에 관한 연구를 수행하였다. 또한 단보전단시험을 통하여 이종재료와 복합재료간의 층간전단강도를 파악하였다. 그리고, 충격파괴 진전모델을 제안하고 시험결과와 비교하였다.

2. 시편의 준비

단보전단시험과 샤프시험을 위한 시편으로 유리섬유 에폭시 복합재료 프리프레그인 UGN 150 (SK Chemical co., Korea)을 이용하였으며, Table 1에 이 재료의 기계적 물성이 나타나 있다. 복합재료 내부에 삽입되는 이종재료로는 직조 폴리에틸렌, 직조 폴리프로필렌, 실란처리가 안된 일방향 유리섬유 및 일방향 케블라 29 섬유를 사용하였다. 이종재료는 Fig. 1.에서 보여지듯이 충격에 대하여 전방, 중반, 후반에 위치시켰다. 시편은 오토클레이브 진공백 성형법을 이용하여 판재형상 (80×130×4, 가로×세로×두께, mm)으로 제조되었으며, 다이아몬드 휠 컷터로 크기에 맞게 절단되었다. 각각 시편은 길이방향으로 섬유가 배치되도록 준비되었으며, Fig. 2에서 단보전단시험

험 및 샤피 시험에 사용된 시편의 차원을 보여준다.

3. 샤피 시험 및 단보전단시험

혼성 복합재료의 충격에너지 흡수력은 계측장비가 장착된 샤피 시험기 (SI-1B type, Satec system, U.S.A.)를 이용하였다. 샤피시험은 시편에 노치를 주는 것이 일반적이나, 복합재료에 있어서 노치 효과는 무시할만하며, 스펠대 두께비를 6이상으로 하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다⁽¹²⁾. 따라서 본 연구에서는 노치없는 시편으로 제조하였고, 스펠대 두께비를 약 10 정도가 되도록 맞추었다. 충격체의 질량은 12.07kg, 속도는 5.2m/s로 하여 샤피시험을 수행하였으며, Fig. 3에서 혼성 복합재료의 충격 에너지 흡수증가율을 보여준다. Fig. 3에서 보여지듯이 이종재료가 층반부에 위치되는 것이 가장 큰 에너지 흡수를 보이며, 이종재료가 실란처리가 안된 유리섬유 및 케블라 29 섬유에서 공업적으로 활용이 가능할 정도로 우수하기 때문에 이 두 이종재료에 관한 추가적인 시험이 수행되었다. 실란처리가 안된 유리섬유는 부피분율로 3.4%, 5%, 6.6% 9%로 조절하였으며, 케블라 29 섬유는 3.4% 5.5%, 6.8%, 8.9%가 되도록 조절하여 시편을 제조하였다. 시험결과는 Fig. 4에서 보여진다. 부피분율로 5% 정도의 실란처리가 안된 유리섬유를 이종재료로 삽입한 경우, 순수 유리섬유 에폭시 복합재료보다 약 40%의 에너지 흡수 증가율을 나타내었고, 부피분율로 3.4%의 케블라 29섬유를 삽입한 경우 약 80%의 에너지 흡수 증가율을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 이종재료의 삽입은 층간전단강도의 감소를 가져올 수 있기 때문에, ASTM D2344-84에 의거하여 단보전단시험을 수행하고 혼성복합재료의 층간전단강도를 측정하였다. Fig. 5에 시험결과가 나타나 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 혼성복합재료의 층간전단강도는 이종재료의 부피분율이 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있었다.

4. 충격파괴 진전모델

동적 하중지지능과 에너지 흡수력을 예측하기 위하여 본 연구에서는 충격파괴 진전모델을 제안하였다. 이 방법의 기본적 개념은 해석을 몇가지 단계로 나누고, 단계별로 외부하중에서 시편의 파괴된 부분은 제거시키는 것이다. 질량 스프링 모형을 사용하여 간단한 미분방정식을 유도하고 그 해를 구하게 되면, 다음과 같다.

$$y = v \sqrt{\frac{m}{k}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad (1)$$

여기서 m 은 충격체의 질량, k 는 단순지지되어 있는 보의 스프링 계수이다. 동적 외부하중은 해의

2계도함수에 충격체의 질량을 곱하게 되면 구할 수 있다. 사파시험은 시편이 동적인 굽힘을 받게 되므로, 인장, 압축 혹은 층간전단응력에 의하여 파괴될 수 있으며, 압축파괴인 경우, 시편의 윗부분, 인장파괴면 시편의 아랫부분, 전단파괴이면 시편의 중앙부분의 층간분리가 일어나게 된다. 만약 시편이 인장이나 압축에 의해 파괴가 일어나 파괴된 부분을 제거하게 되면, 중앙부분의 이중재료에 의해 중립축이 기하학적 중심에서 벗어나게 되며, 중립축의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_N = \frac{\tilde{h}}{2} \left(\frac{1 - \frac{t}{\tilde{h}} - 2\frac{et}{\tilde{h}^2} + \frac{tE_{fe}}{\tilde{h}E_{fg}} \left(1 + 2\frac{e}{\tilde{h}}\right)}{1 - \frac{t}{\tilde{h}} + \frac{tE_{fc}}{\tilde{h}E_{fg}}} \right) \quad (2)$$

여기서 E_{fg} 및 E_{fe} 는 각각 복합재료내에 있는 유리섬유의 강성과 삽입된 이중재료의 강성을 나타내며, 다른 변수는 Fig. 6에 나타나 있다. t_i , t_c 및 t_s 를 각각 시편이 충격을 받았을 때 인장파괴까지 걸리는 시간, 압축파괴까지 걸리는 시간, 층간 전단파괴까지 걸리는 시간이라 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_i = \sqrt{\frac{m}{k}} \sin^{-1} \left(\frac{4\sigma_t I}{vLy_N \sqrt{mk}} \right) \quad (3-a)$$

$$t_c = \sqrt{\frac{m}{k}} \sin^{-1} \left(\frac{4\sigma_c I}{vL(\tilde{h} - y_N) \sqrt{mk}} \right) \quad (3-b)$$

$$t_s = \sqrt{\frac{m}{k}} \sin^{-1} \left(\frac{4w\tilde{h}r_d}{3v\sqrt{mk}} \right) \quad (3-c)$$

여기서 σ_t , σ_c , r_d 는 각각 유리섬유 에폭시 복합재료의 인장강도, 압축강도 및 층간전단강도를 나타내고, I 는 단면 2차 관성모멘트, L 은 스펜, v 는 충격체의 속도를 의미한다. 실제적으로 파괴가 일어나는 두께를 유한하게 하기 위하여, 파괴가 일어나는 시간보다 약 10%가 증가된 시간에서 파괴가 일어난다고 가정하였다. 따라서 파괴가 일어난 후 파괴부분이 제거된 시편의 두께는 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{h} = y_{N+} + \frac{4\sigma_c I}{Lv\sqrt{mk}} \csc \left(1.1t \sqrt{\frac{k}{m}} \right) \quad (4)$$

여기서 t 는 식 (3)중 하나이다. 한 단계의 계산이 끝나면, 다음단계의 계산을 위하여 시편의 강성, 충격체 속도, 중립축, 단면2차 관성모멘트가 새롭게 계산되어야 한다. 다음단계의 계산을 시작하기 위하여, Fig. 7에서 보이는 바와 같이 시작점의 하중 F_b 를 계산해야 하며, 다음과 같이 계산될

수 있다.

$$F_b = \frac{k_b}{k_a} F_a \quad (5)$$

이와 같이 반복연산을 하게 되면, 시간에 따른 시편의 외부하중 지지력 및 에너지흡수선도를 얻을 수 있다. 매 단계마다 충격체의 변위는 임계 변위값을 초과할 수 없으며, 초과가 되었을 때 반복연산을 마치게 된다. 임계 변위값은 기하학적으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\delta_c = \frac{1}{2} \sqrt{L_s^2 - L^2} \quad (6)$$

여기서 L_s 는 시편의 길이이다. 이상에서와 같은 충격파괴 진전모델을 이용하여 사파시험한 결과와 비교한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 최대 외부하중은 이 모델을 사용하여 예측한 값이 작게 나왔다. 이는 변형률속도를 고려하게 되면, 유리섬유 에폭시 복합재료의 인장 또는 압축강도가 증가하게 되기 때문인 것으로 사료될 수 있다⁽¹³⁾.

5. 결론

본 연구에서는 사파 시험을 이용하여 혼성 복합재료의 충격에너지 흡수율에 관한 연구를 수행하였다. 실란처리가 안된 유리섬유를 유리섬유 에폭시 복합재료에 삽입하였을 경우, 부피분율로 약 5% 함유시키게 되면, 순수유리섬유 에폭시 복합재료보다 약 40%의 충격에너지 흡수율을 증가시킬 수 있으며, 케블라 29 섬유를 삽입할 경우, 3.4%를 함유시킬 때 약 80%의 에너지 흡수 증가를 볼 수 있었다. 또한 혼성복합재료의 동적 하중 지지력 및 충격 에너지 흡수율을 예측하기 위하여 충격파괴 진전 모델을 제안하였으며, 실험에 의해 구해진 충격 에너지 흡수율을 비교적 우수하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구비 (과제번호 98-0200-01-01-5)에 의하여 연구진행중이며, 이에 관계자 여러분께 깊이 감사 드립니다.

6. 참고문헌

- [1] H. S. Kim, K. Y. Park and D. G. Lee, "A Study on the Epoxy Resin Concrete for the

- Ultra-Precision Machine Tool Bed," *J. Materials Processing Tech*, **48**, 1995, pp. 649-655.
- [2] P. K. Mallick, *Fiber Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1988, pp. 248-252.
- [3] 이대길, *복합재료 역학 및 제조 기술*, 시그마프레스, 1998.
- [4] P. H. Thornton, "Energy Absorption in Composite Structures," *J. Composite Materials*, **13**, 1979, pp. 247-262.
- [5] Automotive Plastics Report 95, Market Search Inc.
- [6] P. Beardmore, "Composite Structures for Automobiles," *Composite Structures*, **5**, 1986, pp. 163-176.
- [7] J. W. Weeton, D. M. Peters and K. L. Thomas, *Engineer's guide to composite materials*, American society for metals, section 4, 1986.
- [8] Y. G. Kim, D. G. Lee and P. K. Oh, "Manufacturing of the Composite Screw Rotors by Resin Transfer Molding," *J. Materials Processing Tech*, **48**, 1995, pp. 641-647.
- [9] K. S. Jeong, D. G. Lee and S. H. Oh, "Development of the Composite Flexspline for a Cycloid-Type Harmonic Drive Using Net Shape Manufacturing Method," *Composite Structures*, **32**, 1995, pp. 557-565.
- [10] D. H. Kim, K. S. Jeong, D. G. Lee and S. H. Oh, "Manufacturing of the Traction Drive with the Glass Fiber Epoxy Composite Materials," *J. Materials Processing Tech.*, **48**, 1995, pp. 333-339.
- [11] 김덕현, "건설에 대한 복합재료의 사용을 위한 연구개발방향," 한국복합재료학회 추계학술발표대회 논문집, 1996, pp. 306-312.
- [12] M. G. Bader and R. M. Ellis, "The effect of Notches and specimen geometry on the pendulum impact strength of uni-axil CFRP," *Composites*, **6**, 1974, pp. 253-258.
- [13] J. Harding and L. M. Welsh, "A tensile testing technique for fiber-reinforced composites at impact rates of strain," *J. Materials Science*, **18**, 1983, pp. 1810-1826.
- [14] B. D. Agarwal and L. J. Brountman, *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, Inc., 1990, p. 103.

Table 1. Mechanical properties of the glass epoxy composite specimens.

	Glass epoxy composite (UGN 150)
Longitudinal tensile modulus (GPa)	43
Longitudinal tensile strength (MPa)	1021
Longitudinal compressive strength (MPa) ⁽¹⁴⁾	600
Major Poissons ratio	0.28

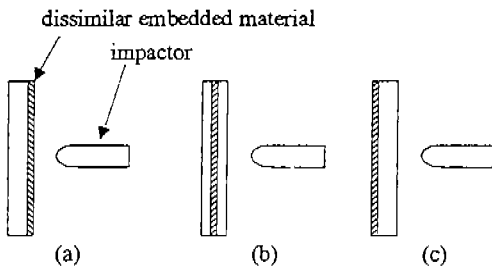


Fig. 1. Embedding location of dissimilar materials: (a) Front, (b) Middle, (c) Rear.

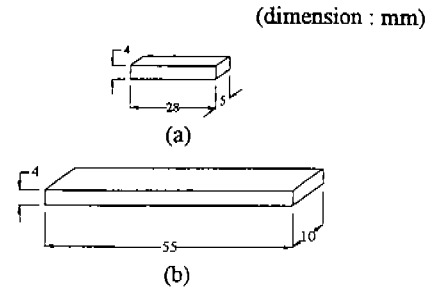


Fig. 2. Specimen dimensions: (a) Short beam shear specimen, (b) Charpy specimen.

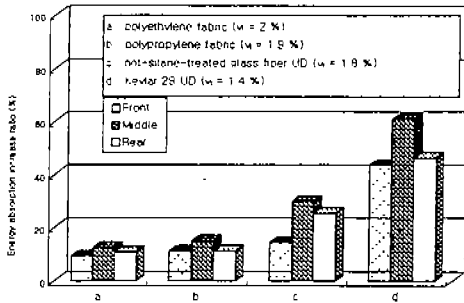


Fig. 3. Energy absorption increase ratio of the glass fiber hybrid composite by the Charpy impact test.

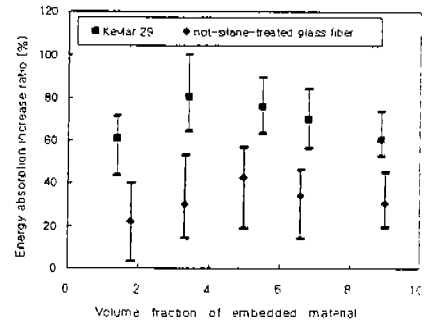


Fig. 4. Impact energy absorption increase ratio of the glass fiber hybrid composites w.r.t. the volume fraction of embedded materials.

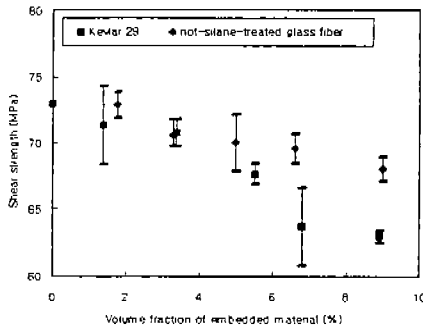


Fig. 5. Interlaminar shear strength of the glass fiber hybrid composites.

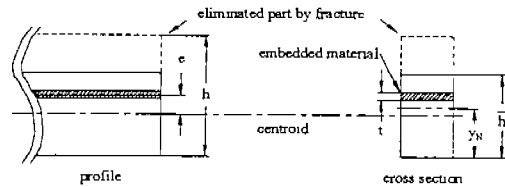


Fig. 6. Coordinate system for variables.

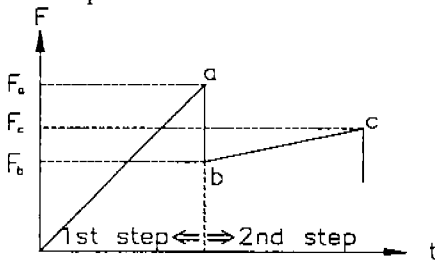


Fig. 7. Schematic force F versus time t diagram of the progressive impact fracture model.

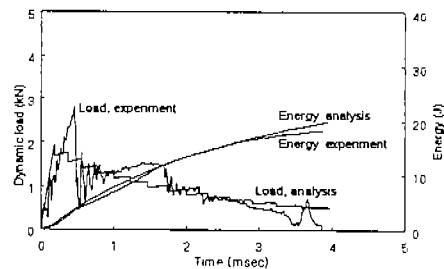


Fig. 8. Analytical and experimental results of the external load and energy absorption.