Electromechanical Behavior of Carbon Fiber/Glass Fiber Hybrid Assemblies for Smart Composites

최준식 · 조재환
건국대학교 섬유공학과

1. 서론

복합재료는 이의 높은 비강도, 탄성도, 우수한 내식성 및 내피로 특성 등으로 인하여 우주항공부품으로부터 토목건축물, 자동차, 스포츠 용품 및 일반산업용품에 이르기까지 넓은 범위에 걸쳐 많이 이용되고 있다. 그러나 복합재료의 이용은 오랜 시간에 걸쳐 하중이나 변형을 계속 받기 때문에 갑자기 파괴되는 치명적인 피해를 입을 수가 있다. 그리하여 최근에 복합재료의 갑작스런 파괴를 방지하거나 변형 거동을 미리 예측할 수 있는 스마트 복합재료(smart composite)에 대한 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 스마트 복합재료는 복합재료 내에 광섬유 등의 센서를 삽입하는 방법도 있으나 탄소섬유 자체의 전기역학적(electromechanical) 관계, 즉 전기저항-변형의 관계를 이용하면 복합재료의 역학적 성능의 저하 없이 응용할 수 있다. 그리하여 복합재료에 반복적으로 가해지는 하중 또는 변형의 이력을 탄소섬유의 전기저항의 변화로부터 복합재료의 역학적 이력을 감지할 수 있다. 특히 변형이력에 의한 잔류전기저항의 존재는 복합재료에 자기진단 기능을 부여해 준다.

그러나 탄소섬유 등의 고강도 섬유 강화재의 사용은 가격 면에서 응용상 제한을 받는 경우가 많아 탄소섬유와 유리섬유 등의 hybrid 복합재료를 사용하는 경우가 많다. 특히 탄소섬유/유리섬유 hybrid 복합재료의 이용은 강도, 내충격량, 파단에너지 등에서 상승효과를 가져올 뿐만 아니라, 유리섬유의 사용에 따른 파단변형률의 증가 때문에 전기저항의 변화를 측정하기에 유리한 편이다. 따라서 탄소섬유와 유리섬유의 hybrid 복합재료를 위한 전기저항-변형거동의 해석이 중요하다[4-6].

본 연구에서는 스마트 hybrid 복합재료의 전기역학적 관계의 해석에 앞서 탄소섬유와 유리섬유 hybrid 집합체에 대한 전기저항의 변화와 변형의 관계를 고찰하고자 한다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 시료는 탄소섬유(태광산업, IZ-40)와 유리섬유(한국화이버, ER2310)이며, 이의 역학적 성질은 Instron 인장시험기를 이용하여 인장속도 0.5

mm/min와 파지거리 5 cm에서 측정하였다. 전기역학적 성질은 시료를 인장/회복시킬 때 시료의 전기저항의 변화를 digital multimeter로 측정함으로써 이루어졌다. 이 때의 하중, 변형 및 전기저항의 값은 실시간으로 computer에 저장되었다. 변형 방법은 정속 인장, 인장/회복의 주기적 반복, 점진적 변형증가에 의한 인장/회복 실험 등의 세 가지로 주어졌다.

3. 결과 및 고찰

변형에 따른 탄소섬유/유리섬유 hybrid 집합체의 전기저항 특성은 이의 응력-변형 거동과 동시에 측정하였다. hybrid 집합체의 인장 특성은 탄소섬유와 유리섬유의 혼합비에 크게 의존하였다. 즉, hybrid 집합체의 탄성계수는 탄소섬유가 끊어지기 전에는 거의 선형적으로 나타났으나, 탄소섬유가 대체로 끊어지기 시작하는 1.1 %의 변형률 이상에서는 변형률의 증가에 따라 강도의 증가율이 서서히 감소하였다. 특히 hybrid 복합체의 강도의 유효무게비(effective weight fraction)는 탄소섬유가 46.2 %일 때였다.

변형에 의한 탄소섬유/유리섬유 hybrid 집합체의 전기저항의 변화는 주로 탄소섬유의 변형에 의해 나타났다. 시료의 전기저항의 변화는 시료의 dimension 변화, 사절, 섬유간의 접촉점 변화 등에 의하는 것으로 알려져 있으나, 접촉점의 변화를 이론적으로 평가하기는 쉬운 일이 아니다. 접촉점의 변화를 제외한 전기저항 변화율($\Delta R/R_0$)은 다음의 (1)식으로 표현할 수 있다[1].

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon + \frac{n_f}{(n-n_f)} \qquad (1)$$

여기서 n과 n_f는 각각 탄소섬유의 총 개수와 사절된 수를 나타내며, ν와 ε는 각각 Poison 비와 변형률을 나타낸다. 따라서 (1)식에 의하면, 시료의 전기저항 변화율은 탄소섬유가 절단되기 전까지는 변형률에 비례하나 탄소섬유가 절단되기 시작하는 점부터는 크게 증가한다[5-7].

Fig. 1 은 hybrid 집합체의 인장에 따라 측정한 전기저항의 변화를 나타내고 있다. 변형이 커짐에 따라 초기에는 전기저항이 조금씩 증가하다가 어느 이상의 변형이 가해지게 되면 비교적 증가폭이 커지면서 탄소섬유의 파단과 함께 급격히 증가하게 된다. 그러다가 최종 유리섬유의 파단 변형률까지는 전기저항의 변화가 더 이상 크게 증가하지 않고 어느 범위 내에서 거의 비슷한 값을 유지한다. 이는 탄소섬유만의 전기역학적 거동과는 아주 다른 면을 나타내는데, 바로 hybrid 효과에 의한 것으로 보인다. 즉, 탄소섬유가 파단된 후에도 전기저항은 어느 정도의 값을 유지한다. 초기의 비교적 작은 전기저항 증가는 변형에 의한 집합체의 dimension변화와 인장되는 상태에서의 탄소섬유와 유리섬유 계면에서의 접촉에 따른 전기저항의 변화에 따른 것으로 생각된다.

Hybrid 집합체의 스마트 특성은 시료의 전기저항의 변화 자체로만은 설명될 수 없

다. 이는 변형에 따른 전기저항의 변화만으로는 재료가 이전에 받았던 하중/변형의 이력을 기억할 수 없기 때문이다. 따라서 인장과 수축변형을 계속 반복적으로 가하면서 전기저항의 변화를 고찰하였으며, 또한 인장-수축실험의 반복 시 매회 변형의 크기를 조금씩 증가시키면서 전기저항의 변화를 측정하였다. Fig. 2는 매회 변형의 크기를 조금씩 증가시키면서 인장-수축 과정을 반복적으로 실험한 경우의 전기저항 변화를 나타내고 있다. 변형이 작을 때에는 하중에 따른 변형과 전기저항의 변화가 일정한 기울기를 가지고 증가하다가 하중의 회복 시에는 거의 가역적 전기저항을 가지게 된다. 그러나 변형의 크기가 어느 이상 커지게 되면, 인장회복에 따른 전기저항의 변화는 가역적인 부분과 비가역적 부분으로 나타나게 되며 비가역적인 전기저항은 바로 잔류전기저항을 남기게 된다. 이러한 비가역적인 잔류전기저항은 시료의 feedback 기능을 갖게 해 주며 따라서 복합재료로 응용 시에 스마트 특성을 부여해 주게 된다. 특히 hybrid 집합체의 전기저항 변화는 탄소섬유만의 경우와는 달리 변형에 의한 전기저항의 증가율, 즉 strain sensitivity가 크게 나타났는데, 이는 유리섬유와 탄소섬유간에 나타난 접촉점의 변화에 기인한 것으로 생각된다.

4. 결론

탄소섬유/유리섬유의 hybrid 집합체의 인장/회복에 의한 전기저항 변화의 측정결과, 다음과 같은 결론을 얻었다. 탄소섬유-유리섬유 집합체의 strain sensitivity는 탄소섬유만의 그것보다 크게 나타났는데, 이는 유리섬유에 의한 탄소섬유와의 접촉점의 증가에 의한 것으로 생각된다. hybrid 집합체의 인장에 따른 전기저항의 변화는 탄소섬유가 사절되는 변형률 부분에서 크게 증가하였으며, 그 후에는 유리섬유의 존재로 인하여 거의 비슷한 값을 보였다. 시료의 인장/회복 실험의 경우, 변형이 비교적 작은 범위에서는 비가역적 전기저항의 변화가 작았으나 변형이 클 경우에는 크게 나타났다.

참고문헌

1. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita, and Y. Ohtsuka, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 875 (1993).
2. K. Schulte and C. Baron, *Composites science and Technology*, **36**, 63 (1989).
3. G. G. Wallace, *Materials Forum*, **16**, 111 (1992).
4. J. W. Cho and H. Jung, *J. Mater. Sci.*, **32**, 5371 (1997).
5. P.-W. Chen and D. D. L. Chung, *J. Am. Ceram. Soc.* **78**, 816 (1995)
6. P. C. Corner and C. N. Owston, *Nature(London)*, **223**, 1446 (1969).
7. C. N. Owston, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **3**, 1615 (1970).

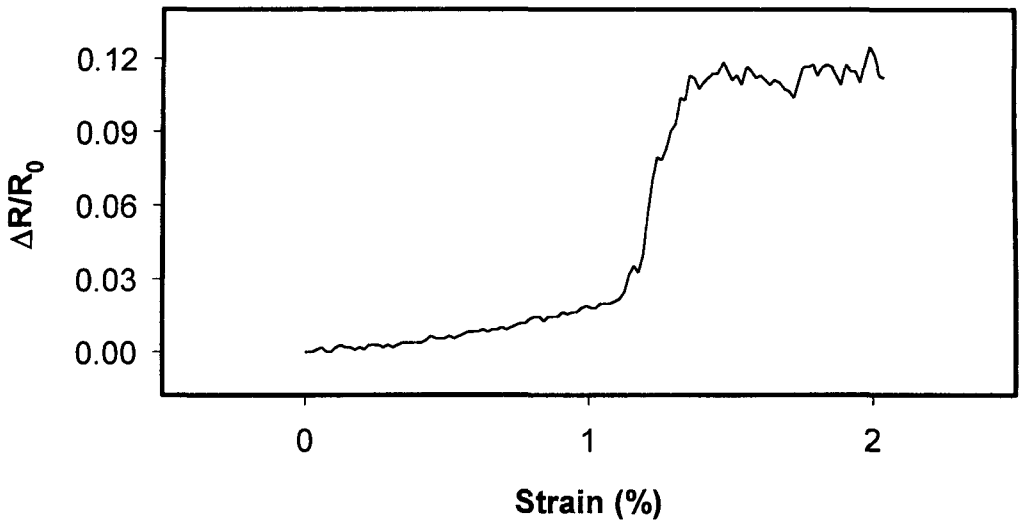

Fig. 1 Typical $\Delta R/R_0$ vs. strain during constant extension rate of 0.5mm/min.

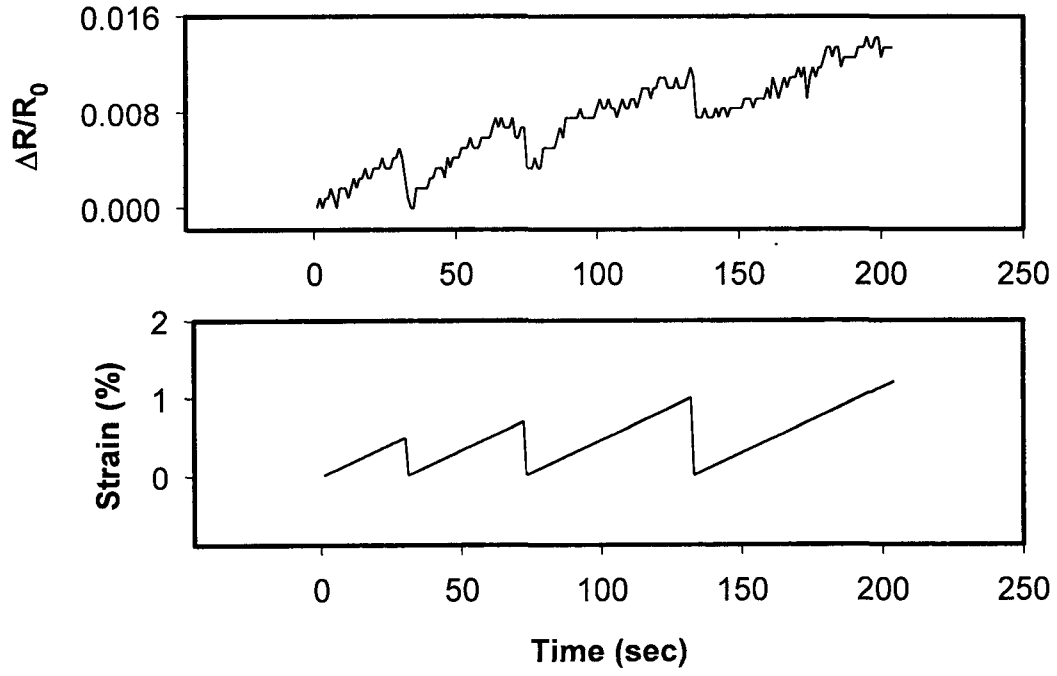

Fig. 2 Fraction change in electrical resistance as a function of cyclic tensile loading for hybrid biber assemblies.