

Deformation Behavior of Carbon Fibers by Monitoring Change in Electrical Resistance

최준식 · 조재환

건국대학교 섬유공학과

1. 서론

최근 전자, 의료, 인공지능, 합금, 고분자 등의 여러 분야에 걸쳐 smart 재료에 관한 연구가 흥미롭게 진행되고 있는데, smart 재료의 특성은 sensor-processor-actuator의 기능을 한 재료 시스템 내에 갖고 있는 경우를 뜻하기 때문에 자기진단, 자기수복기능 및 자기조정기능을 가질 수 있다[1].

섬유복합재료에서 탄소섬유를 강화재로 이용할 경우 탄소섬유의 전기저항 특성을 이용하면 복합재료에 반복적으로 가해지는 하중이나 변형의 이력(history)을 기억할 수 있고 재료의 갑작스런 파괴를 사전에 예측하고 감지할 수 있다. 즉 탄소섬유를 이용한 smart 재료는 하중에 따른 변형이 탄소섬유의 전기저항의 변화로 나타나기 때문에 하중의 반복적인 인장/회복에 따라 나타나는 잔류 전기저항이 feedback 기능을 갖게 해 준다. Schulte 그룹[2]은 탄소섬유의 변형에 따라 잔류전기저항이 나타남을 보고하였으며, Muto 그룹[3]은 탄소섬유와 유리섬유의 두 가지 섬유를 이용하여 지능재료로서의 응용성을 발표하였다. 본 연구자[4]도 kevlar/polypyrrole 복합체 섬유에서의 전기저항-변형 관계를 발표하였으며 이를 이용하여 smart 재료로서의 가능성을 제기하였다.

본 연구에서는 탄소섬유의 인장/회복에 따른 전기저항의 변화와 변형의 관계를 밝힘으로써 smart 재료로서의 탄소섬유의 응용성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

본 연구에 사용한 시료는 탄소섬유(Besfight, Toho Co.)였으며, 이의 인장성질은 Instron tensile tester를 이용하여 주로 인장속도 5 mm/min에서 파괴거리 5 cm로 행하였다. 전기저항의 변화는 시료를 Instron 인장시험기에서 인장/회복시킴과 동시에 digital multimeter로 측정하였는데, 이 때의 하중, 변형, 전기저항의 값을 모두 computer에 on-line으로 저장하여 사용

하였다. 변형방법은 정속인장, 인장/회복의 주기적 반복, 점진적 변형 증가에 의한 인장/회복 실험의 세 가지로 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이론적 전기저항-변형의 관계

변형에 따른 carbon fiber의 전기저항 변화는 변형에 따른 분자쇄의 재배향(molecular reorientation)이 없으며 변형 전후에 섬유에 전기적 특성에 변화가 없다고 가정하면, 섬유 자체의 dimension 변화와 monofilament의 사절에 의하여 일어난다. 이들 두 가지 요인을 동시에 고려하면 시료의 전기저항의 변화율($\Delta R/R_0$)은 다음의 (1)식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta R/R_0 = n_f / (n - n_f) + (1 + 2\nu) \epsilon \quad (1)$$

여기서 n 과 n_f 는 각각 filament의 총 개수와 사절된 수를 나타내며, ν 는 Poisson 비를, 그리고 ϵ 는 변형률($\Delta L/L_0$)을 나타낸다. 따라서 변형에 의한 탄소섬유의 전기저항 변화율은 섬유가 절단되기 전까지는 변형률에 비례하게 되나, 섬유가 절단되기 시작하는 점부터는 크게 증가하게 된다.

3.2 전기저항-변형 관계의 실험적 고찰

변형에 따른 탄소섬유의 전기저항 특성의 고찰에 앞서 우선 탄소섬유의 응력-변형 거동을 측정하였다. multi-filament의 탄소섬유는 인장 초기에는 응력이 변형의 크기에 거의 비례하다가, 그 다음에는 응력의 증가율이 다소 낮아지는데, 이는 monofilament의 일부가 끊어지기 시작하면서 나타나는 현상이며, 약 1.4%부터 어느 정도 나타나기 시작하였다.

Fig. 1은 탄소섬유의 인장에 따라 측정된 전기저항의 변화를 나타낸다. 변형이 커짐에 따라 초기에는 전기저항이 조금씩 증가하다가 어느 이상의 변형이 가해지게 되면 비교적 증가폭이 커지면서 결국 시료의 파단과 함께 급격히 증가하였다. 초기의 비교적 작은 전기저항 증가는 변형에 의한 시료의 dimension 변화에 따른 것으로 생각되며, 이 때의 strain sensitivity는 탄소섬유의 Poisson 비를 0.27[5]로 가정할 경우 이론적인 값인 1.8보다 다소 낮은 값으로 계산되었다. 변형률이 어느 정도 큰 영역에서는 전기저항이 크게 증가하며 시료의 절단 변형률 근처에서는 아주 급격히 증가하는데, 이는 monofilament의 사절에 의한 것으로 밝혀졌다.

이와 같이 탄소섬유의 전기저항은 변형의 증가에 의하여 증가하면서 변화하지만, 이것이 곧 탄소섬유의 smart 특성으로 이어질 수는 없다. 왜냐하

먼 smart 재료는 sensor-processor-actuator의 기능을 스스로 행할 수 있어야 하기 때문인데, 전기저항의 변화 자체만으로는 재료가 이전에 받은 하중/변형의 이력을 기억할 수 없기 때문이다. 따라서 smart 특성의 여부를 알기 위해서는 재료가 과거의 이력을 기억할 수 있고 현재의 하중/변형 상태가 어떠한지를 스스로 진단할 수 있는 자기진단기능을 가져야 한다. 이러한 특성 분석을 위하여 인장과 수축변형을 계속 반복적으로 가하면서 이 때의 전기저항 변화를 고찰하였으며, 또한 인장-수축실험의 반복시 매 회 마다 변형의 크기를 조금씩 증가시키면서 전기저항의 변화를 조사하였다. Fig. 2는 일정 크기의 인장-수축 과정을 반복적으로 실험한 경우의 전기저항 변화를 나타낸 예이다. 변형이 작을 때에는 시간에 따른 변형과 전기저항의 변화가 비슷한 pattern으로 나타나며 따라서 인장의 크기에 비례적으로 전기저항이 변화하며, 인장 회복 시에는 다시 전기저항이 거의 가역적으로 원래의 값으로 되돌아가게 된다. 그러나 변형이 다소 큰 경우에는 인장 후 첫 회복 전기저항은 원래의 값으로 되돌아가지 못한 채 비가역적인 응답을 보였다. 이와 같은 비가역적인 전기저항의 존재가 바로 탄소섬유에 smart 특성을 부여해 주게 된다.

4. 결론

탄소섬유의 인장/회복에 의한 전기저항 변화의 측정 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다. 시료의 인장에 따른 전기저항의 변화는 시료의 dimension 변화와 filament의 사절에 의한 효과로 잘 설명될 수 있었으며 이론적 접근이 가능하였다. 시료의 인장/회복 실험의 경우, 변형이 비교적 작은 범위에서는 비가역적 전기저항의 변화가 작았으나 변형이 클 경우에는 크게 나타났다. 그리하여 잔류전기저항의 변화는 시료의 변형 크기에 크게 의존하였다.

참고문헌

1. G. G. Wallace, *Materials Forum*, **16**, 111 (1992).
2. K. Schulte and C. Barón, *Composites Science and Technology*, **36**, 63 (1989).
3. N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita, and Y. Ohtsuka, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 875 (1993).
4. J. W. Cho and H. Jung, *J. Mater. Sci.*, **32**, 5371 (1997).
5. I. Kruncinska, *Composites Science and Technology*, **41**, 1 (1991).

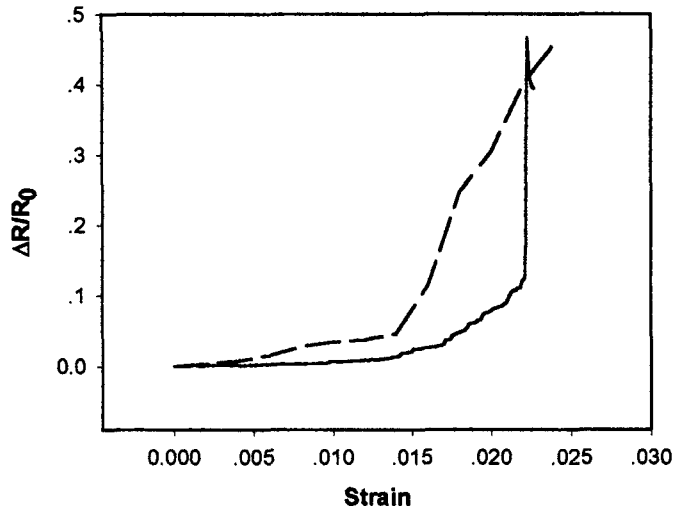


Fig. 1 Comparison of theoretical(---) and experimental(—) $\Delta R/R_0$ value.

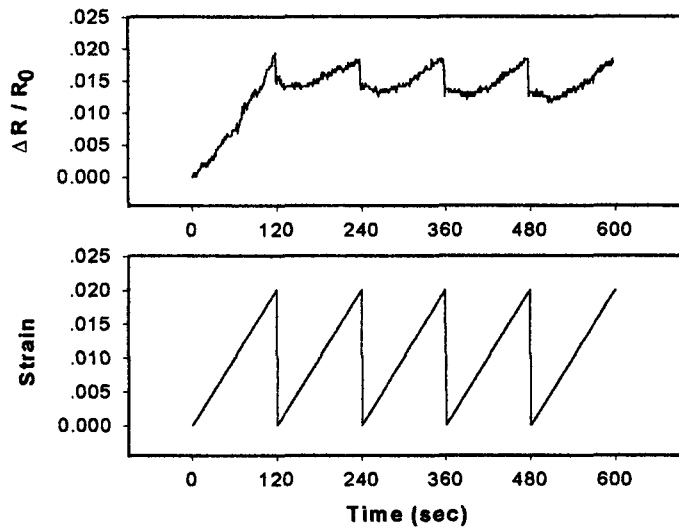


Fig. 2 Strain and $\Delta R/R_0$ vs. time during repeated tensile loading and unloading for carbon fibers.