Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 38, No. 1, pp. 52~55 2001.

스마트 센서로의 적용을 위한 탄소섬유 복합체의 특성평가 (I)

김 유 택
경기대학교 첨단산업공학부, 수원 442-760
(2000년 11월 2일 접수)

Characteristics of Carbon Fiber Composites for the Application of Smart Sensor (I)

Yootaek Kim
School of Advanced Technology and Industrial Engineering, Kyonggi University, Suwon, 442-760, Korea
(Received November 2, 2000)

초 록

Polyacrylonitrile(PAN)-based 탄소섬유와 epoxy resin matrix내에 장착된 PAN-based 탄소섬유의 전기저항을 탄소섬유가 파괴될 때까지 인장강도를 증가시키며 측정하였다. 탄소섬유가 끊어져 측정 계기가 open-circuit을 나타내기 전까지 탄소섬유의 전기저항 값은 strain이 증가할수록 증가하였으며, epoxy resin은 탄소섬유의 저항값 측정에 거의 영향을 미치지 않았다. 탄소섬유의 저항값 변화는 strain에대해 정확도 1% 이내로 예측(calibrate)할 수 있었으며 재현성 또한 우수하였다. 따라서 탄소섬유는 재료의 기계적강도를 증가시키기 위해 사용될 수 있을 뿐만 아니라 구조재료의 파괴를 예측할 수 있는 스마트 센서로서도 사용할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

ABSTRACT

The resistance of polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers and PAN-based carbon fibers within an epoxy resin matrix was measured during loading to fiber failure. The resistance of the fibers was found to increase with increasing strain, up to the point of failure, when the measurement circuit indicated open-circuit with the resin was having an insignificant effect on the resistance measurements. It was found that resistance could be calibrated versus strain to give an accuracy of within 1%, with a preliminary trial suggesting good repeatability, thus supporting the potential of carbon fibers used for mechanical reinforcement to also act as part of a sensor system for an intelligent structure.

Key words : Carbon fiber, Smart sensor, Repeatability

1. 서 론

탄소섬유강화 복합체는 특히 강도(strength) 및 경직성(stiffness) 면에서 우수한 기계적 성질을 나타내고 있다. 그러나, 다른 전통적인 재료와 비교할 때 탄소섬유강화 복합체는 우수한 물성을 지니고 있음에도 불구하고 대형 구조물이나 비행기, 대형 선박 등과 같이 수많은 사람들의 안전을 고려해야만 하는 분야에서는 안전도 때문에 그 사용이 제한되고 있다. 특히 연료소비 효율을 높여야만 하는 우주/항공재료 분야에서는 가볍고 강도가 강한 재료를 사용해야 하지만, 복합재료의 신뢰도 때문에 고비용을 감수하면서 전통적인 금속재료를 주재료로 사용하고 있다. 복합재료의 신뢰성을 높이고 복합재료를 안정성이 크게 요구되는 분야에 적용하기 위한 방법들 중 한가지는 재료의 파괴를 미리 예측할 수 있는 시스템을 재료내부에 삽입하여 재료가 파괴하기 전에 해당부위의 교체를 알려줌으로서 전체 구조물에 안전성을 높이는 방법이 있다. 예를 들면, 이러한 모니터링 시스템은 교량 외부에 strain gauge를 장착하여 교량의 안전도를 점검하는 것과 같은 것이다. 이러한 장치에서 strain은 도전성 금속성이 늘어남에 따라 생기는 저항(R)값의 변화에 의해 식(1)에 근거해 측정되도록 조정되어 있다.

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{1}$$

여기서, A는 선의 단면적, ρ는 비저항 값(resistivity), L은 선의 길이를 나타낸다.

복합재료의 파괴를 예측하는 수단으로서 탄소섬유 복합체의 bulk 저항(resistance) 사용은 이미 연구 되 어 보고된바 있다.[1,2] 하지만, 연구의 초점이 심각한 섬유의 파괴나 기질의 손상이 일어나는 부위의 심한 strain에 맞추어져 있어, 재료의 손상을 피하는데 초점을 맞추고 있는 본 논문과는 거리가 있다. 활발히 연구가 진행되고 있는 또 다른 관련 연구분야는 반응성 액츄에이터(actuator)에 정보를 제공하는 지능형 재료의 개발이다.[3,4] 본 연구의 목적은 보통 강화제

로 사용되고 있는 탄소 섬유가 복합체 내부의 자체 strain gauge로서 작용하여 센서의 역할을 할 수 있는가를 평가 하는데 있으며, 또한 스마트 구조재료의 부품으로 사용될 수 있는 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 섬유는 독일 Tenax Fiber AG사의 Tenax HTA 5131 800 512,000 t1이라고 명명된 고강도 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile-based) 탄소섬유를 사용하였다. 본 실험에서 사용된 탄소섬유는 12,000여 가닥으로 만들어진 bundle 형태로 생산되며 bundle내 개개 탄소섬유의 평균 직경은 7 μm이다. 기지(matrix) 재료는 뉴질랜드 Adhesive Technologies사의 ADR 246-TX 에폭시 레진에 HP 160 hardener를 혼합하여 만들었다.

2.2. 단일 탄소섬유 저항의 측정

단일 탄소섬유의 저항 대 strain 값의 측정은 기지가 없는 자유 단일 탄소섬유(ex-situ 탄소섬유)와 에폭시 레진 기지 내에 고정(embedding)시킨 단일 탄소섬유(in-situ 탄소섬유)의 2종류 시편들에 대해 행하였다. Ex-situ 탄소섬유는 직사각형 모양의 탄소섬유보다 파괴 strain 값이 높은 고분자 판 위에 전극을 super glue를 이용해 붙이고, 전극 위에 단일 탄소섬유를 얹은 다음 soldering하여 섬유를 고정시켰다. 구리 전극 사이의 간격은 85 mm(gauge length)로 고정시켰고, strain 값의 측정을 위해 Micro-Measurement사의 strain gauge를 gauge length 중간에 위치시켜 역시 super glue에 의해 고분자 판 위에 고정하였다. strain gauge의 위치는 고분자판 중앙에 탄소섬유가 위치하기 때문에 중앙에서 약간 한쪽으로 치우쳐 설치되었다. 전기저항의 측정을 위해서는 탄소섬유를 soldering에 의해 고정시킬 때 구리선을 함께 soldering 함으로서 금속 전극을 통해 탄소섬유의 전기저항이 측정되도록 하였다.

단일 탄소섬유의 복합체 시편(in-situ시편)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 embedded 되어 있는 탄소섬유와 전기적인 접촉이 이루어 질 수 있도록 ex-situ 탄소섬유 시편에서와 같이 구리선을 soldering하고 전극, 구리선, 탄소섬유 모두가 에폭시 레진 내에서 굳어지게 하였다. In-situ 시편을 만들기 위해 약 10 cm 정도의 단단한 종이 중앙에 가늘고 긴 구멍을 내고 그 구멍을 가로질러 단일 탄소섬유를 위치시킨 후 양끝을 테이프로 고정시킨 후 이것을 고무 재질로 만든 dog-bone 모양의 에폭신 레진 고정 mould에 이동한다. 에폭신 레진 고정 내부에는 금속전극이 8.5 mm gauge length로 고정되어 있고 이 위에 종이로 고정된 탄소섬유가 얹어져 soldering되고 soldering 후에는 필요 없는 끝 부분의 탄소섬유는 잘라버리고 종이도 제거한다. 이 후 준비된 에폭시 레진을 Ependorf 원심분리기로 원심 분리시켜 기포를 제거한 후 조심스럽게 mould에 부어 24시간 공기 중에서 유지시키고 mould에서 빼낸 다음 완전히 굳히기 위해 7일간 상온, 상압에 놓아두었다. 완전히 굳은 에폭시 레진은 알코올로 세척되어지고 dog-bone 모양의 in-situ 시편 중앙에 strain gauge를 super glue를 이용해 부착하였다.

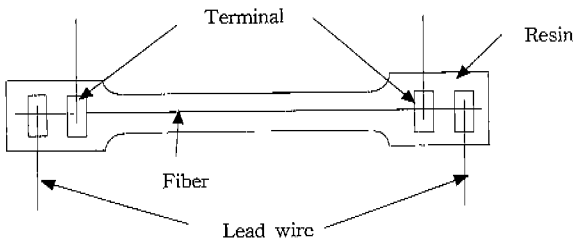

Fig. 1. Schematic of in-situ specimen.

In-situ 및 ex-situ 각 30개의 시편이 인장강도의 힘이 주어지는 축 방향에 정렬되어져 시험되었다. 인장강도시험은 UTM(universal test machine)이 사용되었고, cross-head 속도는 0.5 mm/min이였다. 전기저항 값 측정은 HP사의 multimeter를 사용하였으며 측정방법은 ex-situ 시편의 경우 2 probe, in-situ 시편의 경우 4 probe 측정 방식을 사용하였다. 전기저항 값은 인장 부하가 10 N씩 증가 할 때마다 측정되었으며 탄소 섬유가 완전히 파괴될 때까지 측정하였다. 측정치의 재현성 실현을 위해 in-situ, ex-situ 시편 모두 탄소섬유가 끊어지기 전까지 전기저항을 측정하고 인장 부하를 해체시킨 후 같은 실험을 반복하여 탄소섬유가 끊어질 때까지 다시 측정하여 실험 측정치의 재현성을 확인하였다. 일부 시편에서 인장 부하를 해지시키면 초기 전기저항 값이 일치하지 않은 경우도 있으나 전기저항 값의 변화 기울기에는 영향을 미치지 않았다.

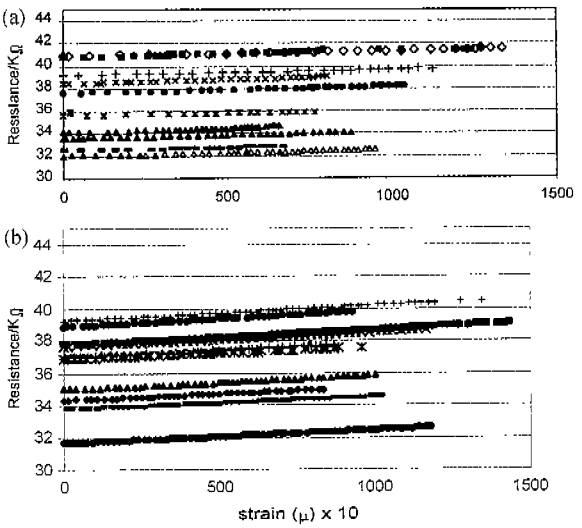

Fig. 2. Resistance versus strain for (a) ex-situ and (b) in-situ specimens.

3. 결 과

Fig. 2에서는 처음 10개의 in-situ 및 ex-situ 시편의 전기저항 대 strain의 변화를 보여 주고 있다. Fig. 2에서 보듯이 in-situ 및 ex-situ 시편 모두에서 탄소 단섬유의 전기저항 값은 파괴될 때까지 strain 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 파괴될 때의 stain 값의 분포는 넓게 나타나고 있다. 이렇게 넓은 범위의 파괴시 strain 값을 보이는 것은 실험에서 사용한 종류의 탄소섬유에서 흔히 관찰되어지는 것으로 이미 보고된 논문의 결과와도 잘 일치하고 있다.[5] 두 가지 형태의 시편들 모두에서 초기저항 값의 분포 역시 넓게 나타났다. 두 형태의 시편들의 초기저항 값의 평균은 in-situ 시편들의 경우 36.51 kΩ 이였고, ex-situ 시편들의 경우는 36.52 kΩ으로 비슷한 평균값을 가지고 있었다. 넓은 분포의 초기저항 값을 갖는 이유는 탄소섬유 직경의 차이에 기인한 것으로 사료되었다. 따라서 실험 시 사용된 모든 탄소섬유의 직경을 측정하기 위해 S-40000 field emission scanning electron microscope를 이용하였고, Fig. 3에서 보는바와 같이 초기전기저항 대 탄소섬유의 직경에 대한 그래프를 그리고 두 종류 형태의 시편들에 대한 각각의 최적 2차 line fit를 그려 넣었다. Fig. 3의 fitting 선으로부터 탄소섬유의 직경이 증가할수록 초기전기저항 값은 감소하는 경향을 알 수 있었고, 이러한 경향은 두 가지 형태의 시편 모두에서 유사하게 나타났다. 탄소섬유 직경 값을 사용하여 strain에 따른 전기저항의 변화를 예측하였고, 이 결과는 Fig. 4에서와 같이 실제 실험결과와 비교되어졌다. 실험결과 값과 예측된 초기전기저항 값은 두 형태 시편들 모두에서 차이를 보였다. ex-situ 시편들의 경우에는 0.7에서 26.3%의 오차범위를 보였으며 평균 11.9%의 오차를 가지고 있었다. 한편, in-situ 시편들의 경우에는 2.4에서 29%의 오차범위를 보였고, 평균 10.4%의 오차를 보였다. 전부는 아니지만, 대부분의 경우 예측된 값은 실험 값보다 낮은 경향을 보였다. 이러한 오차를 두 형태의 시편들 모두에서 보이고 있는 것은 단일 탄소섬유에서는 국부적인 섬유의 구조가 전기

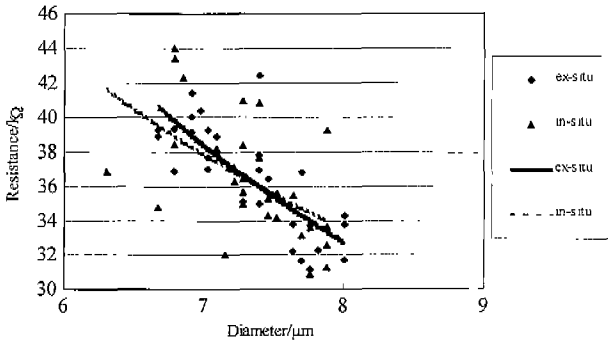

Fig. 3. Experimental and predicted initial resistance for ex-situ and in-situ specimens.

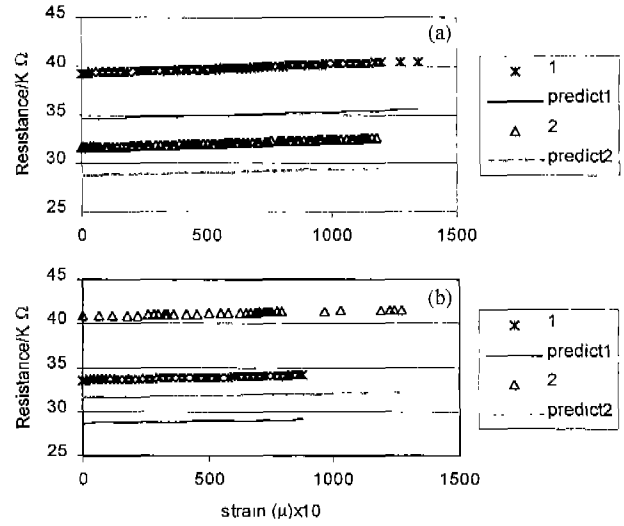

Fig. 4. Experimental and predicted resistance to failure for first two (a) ex-situ and (b) in-situ specimens.

저항에 영향을 미치기 때문이며, 금속선과 같이 일정한 전기저항 값을 가지는 거의 완벽한 실린더형태의 저항체를 기대할 수 없기 때문이다. 하지만, 예측된 전기저항 값 대 strain의 변화를 보여주는 그래프는 실제로 측정된 그래프와 평행하였다. 만약 zero strain에서 예측치와 실측치의 차이를 각 단일 탄소섬유의 보정인자(correction factor)로 고려하여 이것을 나머지 데이터에 적용시키면, 실험 값과 예측 값은 최대오차 1% 미만의 정확성을 가지고 잘 일치됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 in-situ 시편의 strain에 따른 전기저항 값 변화의 재현성 실험결과로 첫 번 실험(initial)에서는 탄소섬유가 파괴되기 전에 실험을 중단하여 데이터를 얻었고, 이후 load를 완전히 제거하여 10분 경과 후 다시 2차, 3차 실험(repeat)을 수행하여 시편이 파괴될 때까지의 데이터를 얻었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 단일 탄소섬유의 재현성은 오차 0.4% 이내의 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 실제 단일 탄소섬유를 스마트 센서로 적용시킬 때 섬유파괴시까지 반복적으로 사용할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

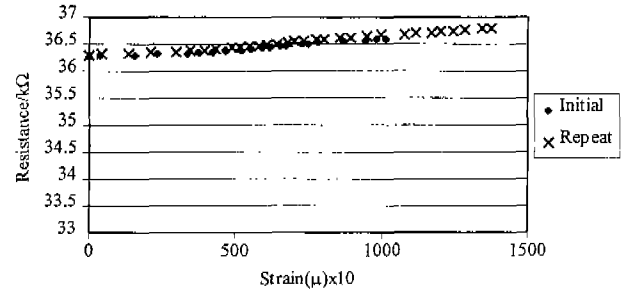

Fig. 5. Resistance versus strain showing first and second runs for the same in-situ specimens.

4. 결 론

PAN-based 탄소 섬유의 strain에 대한 전기저항 값의 변화는 오차범위 1% 내의 정확성을 가지고 zero strain에서의 초기전기저항 값에 의해 예측될 수 있었다. 예비적인 결과이긴 하지만, 반복 재현성 실험에서도 매우 우수한 실험 재현성을 보였다. 따라서 탄소섬유가 복합재료의 자체 내부 strain gauge로서의 역할을 할 수 있는 스마트재료 또는 인공지능 구조재료(intelligent structure materials)의 부품으로 쓰일 수 있는 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 98학년도 경기대학교 교내 학술연구비(해외파견)의 지원에 의하여 수행되었음. 본 연구수행을 위해 많은 도움을 준 University of Waikato의 Kim Pickering 교수와 동료 연구원들에게 감사드립니다.

REFERENCES

1. M. Sugita, H. Yanagida and N. Muto, "Materials Design for Self-diagnosis of Fracture in CFGFRP Composite Reinforcement," *Smart Mater. Struct.*, **4**, A52-A57 (1995).
2. X. L. Fu and D. D. L. Chung, "Self-monitoring of Fatigue Damage in Carbon Fiber Reinforced Cement," *Cement & Concrete Research*, **26**(1), 15-20 (1996).
3. Z. Q. Shia and D. D. L. Chung, "Carbon Fiber-reinforced Concrete for Traffic Monitoring and Weighing in Motion," *Cement and Concrete Research*, **29**(3), 435-439 (1999).
4. P. Chen, D. D. L. Chung, "Carbon Fiber Reinforced Concrete as an Intrinsically Smart Concrete for Damage Assessment During Dynamic Loading," *J Am. Ceram. Soc.*, **78**(3), 816-818 (1995).
5. R. Prabhakaran, "Damage Assessment Through Electrical Resistance Measurements in Graphite Fiber-reinforced Composites," *Exp. Tech.* **14**, 16-20 (1990).