

論文

전기저항 측정법을 이용한 탄소섬유강화 복합재의 피로손상 검출

서대철* · 이정주*

Fatigue Damage Detection of CFRP Laminates using Electrical Resistance Measurement

D.C. Seo* and J.J. Lee*

ABSTRACT

Since carbon fibers are electrical conductor, the measurement of the variations of electrical resistance appears to be a valuable technique for the in-situ detection of various types of damages in CFRP laminates. In this case, carbon fibers are not only the reinforcements but also the sensor to detect damages in CFRP laminates. Fatigue damage in composite laminates is a complicated phenomenon involving different mechanisms and total cumulative fatigue damage can be represented by changes in the strength, stiffness and other material properties. Electrical resistance change in composite laminates is also a cumulative effect of damage caused by various damage mechanisms. Thus, in this paper, we investigate the electrical resistance change as a measure of fatigue damage like degradation of residual strength and stiffness. The prediction of the damage process future damage of composite laminates subjected to the tensile fatigue loading was performed by the use of electrical resistance change by following the stiffness degradation model proposed by Yang et al. The electrical resistance gradually increased as the stiffness was reduced and showed very abrupt change when the final fatigue failure was imminent. The resistance change can be predicted using a linear regression analysis with initial data for an individual specimen. The predicted data shows good agreement with the experimental data except at the final stage where stiffness and electrical resistance change very abruptly.

초 록

전기 전도체인 탄소섬유강화 복합재에서 전기저항의 변화를 측정하는 것은 다양한 손상을 직접 검출할 수 있는 중요한 기술이 될 수 있다. 이 경우 탄소섬유는 강화섬유뿐만 아니라 손상을 검출할 수 있는 센서 자체가 된다. 복합재 구조물에서 피로손상은 여러 가지 다양한 손상기구들을 포함하는 복잡한 현상이고 종합적인 누적 피로손상은 강도, 강성 혹은 전기저항과 같은 재료 물성치의 변화로써 나타내지게 된다. 본 연구에서는 전기저항의 변화를 강도 혹은 강성저하와 같은 피로손상의 지표로서 활용할 수 있는 가능성을 보였다. 또한 새로운 전기저항 변화에 의한 손상지표를 강성저하 모델을 적용하여 복합재 적층판의 피로하중 하에서의 잔류강성과 손상을 예측하였다. 피로손상에 따라 강성은 점진적으로 감소하였고 전기저항은 점차 증가하였다 최종 파단 단계에 이르러서는 전기저항은 매우 급격한 변화를 가져오므로 이를 통해 피로파괴를 모니터링할 수 있다. 각 시편에 대해 초기의 데이터로부터 선형회귀분석을 통해 전기저항의 변화를 예측하였다. 예측된 값은 강성과 전기저항이 급격히 변하는 최종 파단 단계를 제외하고는 실험값과 비교적 잘 일치하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

첨단복합재료(advanced composite materials)는 기존의 금속 재료에 비하여 비강성, 비강도, 내부식성, 내피로성 등의 기계적 특성이 우수하여 경량화가 요구되는 항공기, 위성 등의 각종 구조물에 응용이 날로 확대되고 있다. 따라서 복합재 구조물의 사용 시간 동안 안전한 사용을 보장하기 위해서는 정적, 동적 하중 또는 환경적인 영향에 의해 발생하는 다양한 형태의 손상들은 검출, 평가, 해석하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 복합재구조물의 손상검출을 위해서 기존의 비파괴 검사법들을 이용하여 정기적인 검사를 통한 손상검출이 가능하지만 이 검사법들은 작업자의 숙련도에 많이 좌우되며, 검사 범위의 한계가 있고, 작동 중인 구조물의 검사가 용이하지 않은 등의 단점이 있다. 따라서 최근 기능적인 요소들을 복합재료와 통합함으로써 원위치 손상검출(in-situ damage detection) 혹은 사용 중 진전성 감시(in-service health monitoring)를 가능케 하는 연구들이 활발히 행해지고 있다. 즉, 센서 혹은 작동기(actuator)를 삽입하여 손상을 검출하고 복구하는 지능형 구조물(smart structure)에 대한 연구가 그것이다. 이러한 목적으로 사용되는 센서들은 광섬유센서, 압전재료(piezoelectric materials)센서 등이 있다. 그러나 이런 센서의 사용은 몇 가지 단점이 있다. 우선 센서들은 제작 공정 중에 복합재 구조물에 삽입하거나 외부에 부착하여야 하므로 이미 만들어진 구조물에 사용될 수 없고, 광섬유의 삽입은 강화섬유의 직경보다 훨씬 큰 광섬유의 직경으로 인해 응력과 변형률의 집중을 가져와 강도를 저하시킬 수 있고, 또한 사용 중 사고에 의해 삽입된 광섬유센서가 손상된 경우 복구가 거의 불가능하다는 단점이 있다.

탄소섬유는 잘 알려진 대로 전기 전도체이다. 따라서 탄소섬유의 손상에 의해 유발되는 전기저항의 변화원리를 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 적층판(laminate)의 각종 손상 및 결함의 검출 및 평가에 적용하여 활용할 수 있다[1-6]. 이 경우 탄소섬유는 CFRP 적층판의 강화섬유인 동시에 손상신호를 검출할 수 있는 센서 그 자체가 된다. 탄소섬유 복합재의 전기저항치를 측정하는 방법 자체는 일반적으로 금속 재료에서 균열 진전을 검출하기 위하여 사용되어지는 전위차법(potential drop technique)과 비슷하다. 그러나 금속재료의 경우 수 암페어(A) 정도의 높은 입력 전류가 필요하고 균열 진전을 관찰하기 위해서는 0.1

μV 정도의 높은 해상도를 갖는 전압측정장치가 필요한 반면, CFRP 복합재에서는 mA 정도의 낮은 입력 전류에서 mV 정도의 큰 전압강하가 일어나게 되므로 보다 쉽게 손상을 검출해 낼 수 있다. 본 연구에서 사용된 전기저항 측정법에 의한 CFRP 적층판의 손상 검출방법은 특별한 제작 공정 없이 복합재 구조물의 표면에 전극을 부착함으로써 가능하다. 따라서 이 방법은 이미 사용 중인 구조물에도 강도의 저하 없이 적용이 가능하다는 장점이 있다.

복합재 구조물에서 피로손상은 여러 가지 다른 손상 기구(damage mechanism)들을 포함하는 복잡한 현상이다. 또한 이러한 손상기구들은 결과적으로 동시에 일어나며 종합적인 누적 피로손상은 강도, 강성 혹은 다른 재료 물성치의 변화로써 나타내지게 된다. 따라서 현상학적인 관점에서 보면 피로손상은 잔류강도나 강성의 저하로써 평가할 수 있다. 복합재 적층판 내의 전기저항 변화도 또한 다양한 손상기구들에 의해서 발생하는 손상의 누적된 효과이다. 본 연구에서는 전기저항의 변화를 강도 혹은 강성저하와 같은 피로손상의 지표로서 활용할 수 있는 가능성을 보였다. 또한 Yang et al.[7-9]에 의해 제기된 강성저하 모델을 이용하여 전기저항의 변화로써 복합재 적층판의 피로하중 하에서의 잔류강성과 손상을 예측하였다.

2. 시편 및 실험 방법

모든 시편은 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(UGN125)를 이용하여 제작되었다. CFRP 적층판은 오토클레이브를 이용하여 경화하였고 경화된 적층판을 다이아몬드 컷터를 이용하여 절단하였다. 시편의 치수는 길이 160 mm, 폭 24 mm, 두께 약 1 mm로 제작하였다. 강화섬유판과 모재균열과 같은 파손기구에 따른 전기저항의 변화의 차이를 알아보기 위하여 두 가지 종류의 적층판([0]₈ and [0₂/90₂]₈) 이 사용되었다. 각 시편의 양단에는 길이 38 mm의 유리섬유복합재료(E-glass)로 된 탭(tab)을 접착필름을 이용하여 접착하였다. 이 때 시편에 전류를 가하고 저항을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 두께 150 μm 의 구리판을 시편과 탭 사이에 삽입하고 탭을 접착하였다. 구리판과 시편 끝단면의 탄소섬유의 전기접촉을 증가시키기 위하여 은페인트(silver paste)를 사용하였다. 전기 저항을 측정하기 위하여 정전압장치(HP E3612A)로부터 50 mA의 일정전류를 시편의 끝에 붙어있는 구리판을 통

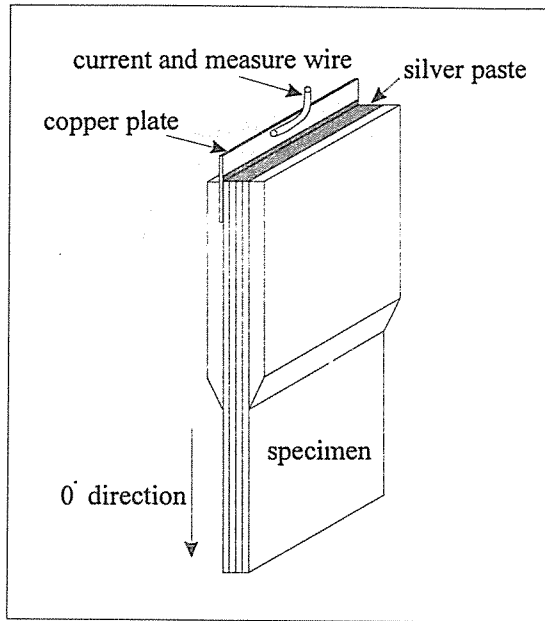


Fig. 1. Schematic diagram of specimen

하여 시편에 인가하였다. 전기저항은 신호조절 전압앰프(MM2310)를 이용하여 전압을 증폭하고 A/D변환기를 이용하여 전압을 측정함으로써 얻었다. 모든 시험은 유압시험기(MTS-810)를 이용하여 수행하였다. 길이 방향의 변형률은 MTS에 내장된 LVDT를 이용하여 측정하였다. 하중, 변위, 전기저항의 신호는 A/D변환기를 장착한 PC를 이용하여 일정 주기마다 측정하였다.

피로시험은 4 Hz의 하중주기와 하중분율, $R = S_{min}/S_{max} = 0.1$, 로 수행하였다. 먼저 정적 인장 강도를 알아보기 위하여 인장시험을 수행하였다. 평균인장 강도는 일방향적층 시편과 직교적층 시편이 각각 1.797 GPa, 1.255GPa 였다. 평균 정적 인장 강도의 75, 70, 65, 60, 55%에 해당하는 다섯 종류의 하중 수준으로 피로시험을 수행하였다. 각 수준에서 사용한 시편은 6개이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과 고찰

Yang et al. 에 의해 제기된 강성저하 모델은 탄소섬유/에폭시 복합재의 피로손상을 예측하는데 있어서 실험치와 이론치가 잘 일치하고 있다[10]. 이 모델은 잔

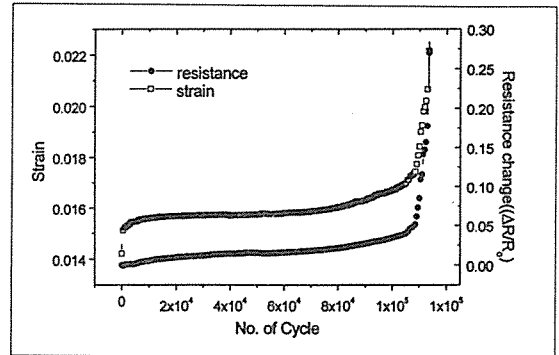


Fig. 2. Strain and electrical resistance change of cross-ply specimen during fatigue loading

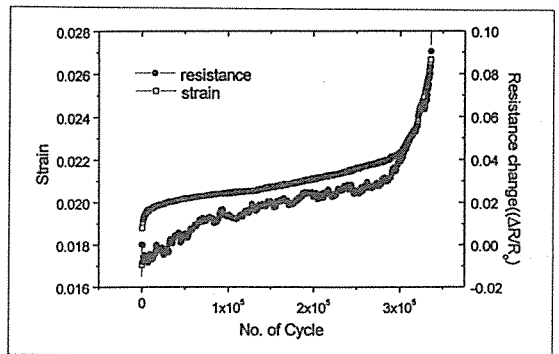


Fig. 3. Strain and electrical resistance change of unidirectional specimen during fatigue loading

류강성의 변화가 하중횟수의 멍함수(power function)이라는 가정으로부터 출발한다. 일정하중 피로시험으로부터 구한 직교적층 시편과 일방향적층 시편의 하중횟수에 따른 변형률과 전기 저항의 변화를 각각 Fig. 2 과 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 하중 횟수에 따른 변형률과 전기 저항의 변화는 그 경향이 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 누적 피로손상의 영향으로 나타나고 있는 효과가 변형률과 전기 저항의 변화에서 그 경향이 비슷하다는 것을 나타낸다. 잘 알고 있는 바와 같이 강성은 $E = \sigma/\epsilon$ 로 정의된다. 또한 피로시험의 경우 일정하중 실험을 하기 때문에 강성은 변형률에 반비례해서 나타나게 된다. 따라서 강성과 같이 전기저항에 반비례하는 새로운 손상지표 $D_r = R_o / R$, 을 정의하게 되면 강성저하와 같이 피로손상을 예측하는 새로운 지표로써 사용할 수 있다. 또한 전기저항의 변화는 초반에는 점진적으로 증가하다가 최종 파단에 가까워짐에 따라 강성이 급격하게 감

소하기 시작하는 시점에 도달하면 매우 급격하게 증가는 것을 볼 수 있다. 이것은 전기저항의 변화를 모니터링함으로써 시편의 파단을 방지할 수 있는 지표로서 사용할 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 4 과 Fig. 5에 각각 직교적층 시편과 일방향적층 시편의 강성저하와 손상지표의 변화를 나타내었다. 두 가지 경우 모두 강성저하와 손상지표의 변화의 경향이 잘 일치하고 있다는 것을 볼 수 있다. 일방향적층 시편보다는 직교적층 시편이 더 잘 일치하는 결과를 보이는 것을 볼 수 있는데 이것은 일방향적층 시편의 손상기구가 강화섬유파단인 반면 직교적층 시편의 손상기구는 모재균열이 강화섬유파단보다 먼저 발생하기 때문이다. 탄소섬유복합재에서 전기 저항의 변화는 전기전도체인 탄소섬유의 파단에 의해서 발생하는 것 이외에도 이웃한 탄소섬유에서도 전기적인 접촉(contact)이 가능하기 때문에 섬유방향에 평행한 방향의 손상에 의해서도 발생한다.[1,5] 따라서 강화섬유파단 이외에도 이웃한 섬유들의 접촉에 영향을 주는 손상기구들 즉 모재균열이나 층간분리에 대해서도 전기저항의 변화가 일어난다. 따라서 직교적층시편의 경우에는 모재균열이 강화섬유파단보다 피로손상에 미치는 영향이 먼저 나타나고 또 균일하게 작용하기 때문에 강성저하와 전기저항 손상지표의 경향이 더 잘 일치하게 된다.

3.2 강성저하모델과 전기저항 손상지표모델

Yang *et al.*에 의해 제기된 강성저하모델을 따라서 전기저항의 변화를 측정함으로써 피로손상을 예측할 수 있는 새로운 모델을 만들 수 있다. 강성대신에 손상지표, D_r , 를 하중횟수의 멍함수라고 가정하면 손상지

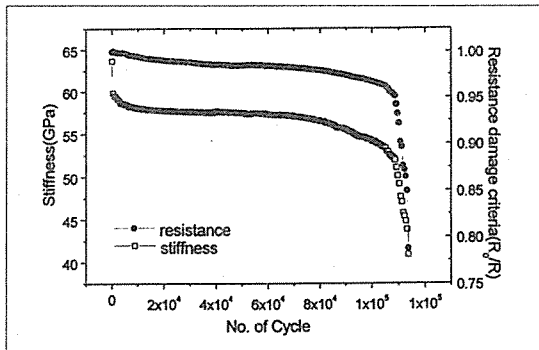


Fig. 4. Stiffness and electrical resistance damage criteria of cross-ply specimen during fatigue loading

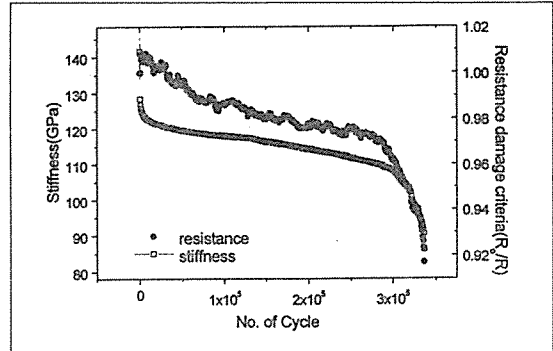


Fig. 5. Stiffness and electrical resistance damage criteria of uni-directional specimen during fatigue loading

표의 변화율은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$dD_r(n) / dn = -D_r(0)Q\nu n^{\nu-1} \quad (1)$$

위식을 적분하면 다음과 같다.

$$D_r = D_r(0)[1 - Q\nu^n] \quad (2)$$

여기서 Q 와 ν 는 랜덤 변수이다.

기저 데이터(base-line data)가 없을 때는 잔류강성저하모델에서 랜덤 변수 Q 와 ν 를 정의할 수 없다. 이 때는 초기 측정 데이터로부터 각 시편의 강성저하를 예측하게 된다. 이것은 손상지표 D_r 의 경우도 마찬가지이다. $D_r(n_1), D_r(n_2), \dots, D_r(n_k)$ 를 각각 n_1, n_2, \dots, n_k 에서의 손상지표라고 한다면 $n_{k+1}, n_{k+2}, \dots, n_{k+m}$ 에서의 손상 $D_r(n_{k+1}), D_r(n_{k+2}), \dots, D_r(n_{k+m})$ 을 측정된 데이터 $D_r(n_1), D_r(n_2), \dots, D_r(n_k)$ 로부터 구할 수 있다.

$n = n_k$ 에서 $D_r(n) = D_r(n_k)$ 라는 경계조건을 대입하면 $Q(k)$ 와 $\nu(k)$ 는 식(2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q(k) = \left[1 - \frac{D_r(n_k)}{D_r(n_0)} \right] / (n_k)^{\nu(k)} \quad (3)$$

위 식을 식(2)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_r(n) = D_r(0) - [D_r(0) - D_r(n_k)](n/n_k)^{\nu(k)} \quad (4)$$

식(4)는 선형회귀분석을 위해 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\ln\{[D_r(0) - D_r(n)]/[D_r(0) - D_r(n_k)]\} = \nu(k)\ln(n/n_k) \quad (5)$$

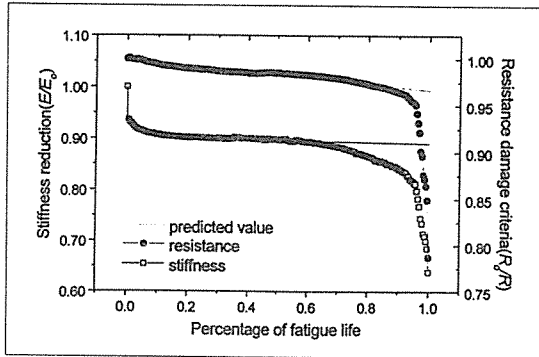


Fig. 6. Comparison of predicted stiffness reduction and electrical damage criteria and experimental value

위 식으로부터 $v(k)$ 는 선형회귀분석을 통해 측정된 데이터인 $[D_r(n_1), D_r(n_2), \dots, D_r(n_k)]$ 로부터 추정할 수 있다. $v(k)$ 가 얻어지면 식(4)로부터 $n = n_{k+1}, n_{k+2}, \dots, n_{k+m}$ 로 하면 미래의 손상을 예측할 수 있다. 선형 회귀 분석은 비교적 간단하며 초기 데이터가 많을 수록 예측의 정확도는 증가한다.

3.3 예측값과 실험값의 비교

직교적층 시편의 실험에서 구한 강성과 손상지표를 회귀분석을 통해 예측한 강성저하와 손상지표변화와 함께 Fig. 6에 나타내었다. 강성이 급격하게 변하는 최종파단 부분을 제외하면 예측값과 실험값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 강성이 급격하게 변하는 최종파단은 이 모델에서 가정한 하중횟수의 역함수를 따르지 않는 구간이므로 예측값이 실험값과 다르게 된다. 따라서 이 구간을 제외한 손상이 점진적으로 증가하는 구간에서는 초기의 데이터로부터 미래의 손상을 예측할

수 있다. 하중수준의 변화에 따른 차이를 보기 위해 평균 정적 인장강도의 70, 60, 55 %에 해당하는 하중을 가한 시편의 강성저하와 손상지표를 Fig. 7에 나타내었다. 하중수준에 따른 큰 차이는 볼 수 없었고 각 시편에 따라 약간의 차이를 보였지만 전체적으로 나타내는 경향은 일치하였다. 강성저하의 경우에는 하중수준의 변화에 따라 그 차이가 적었지만 전기저항 손상지표의 경우는 약간의 차이를 보였다. 이것은 하중수준의 차이에 의해서라기 보다는 전기저항의 변화가 각 시편마다 강성저하에 비해 그 편차가 심하기 때문이다.

4. 결 론

전기저항측정법을 이용한 피로손상검출에 관한 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정하중 진폭 피로시험 데이터의 변형률과 전기저항변화는 비슷한 경향을 보였다. 따라서 일정하중 시험에서 변형률에 반비례하는 강성과 같이 전기저항에 반비례하는 새로운 손상지표 $D_r = R_0 / R$ 을 정의하였고 이를 통해 피로손상거동을 예측하였다.

2. 피로손상에 따라 강성은 점진적으로 감소하였고 전기저항은 점차 증가하였다. 최종 파단에 가까워지면 강성과 전기저항은 급격한 변화를 가져오므로 이를 통해 피로파괴를 모니터링할 수 있다.

3. 새로운 손상지표 D_r 을 기존의 강성저하 모델에 적용하여 손상거동을 예측하였고 예측된 값은 강성과 전기저항이 매우 급격하게 변하는 최종 단계를 제외하고 실험값과 비교하여 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다.

후 기

본 연구는 97, 98년도 과학 재단 핵심전문연구(과제번호: 971-1003-016-2) 연구비 지원으로 진행 중인 과제의 일부분으로, 이에 대해 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Schulte, K. and Baron, Ch., "Load and Failure Analyses of CFRP Laminates by means of Electrical Resistivity Measurements", Comp. Sci. Tech., Vol. 36, 1989, pp. 63-76.
2. Prabhakaran, R., "Damage Assessment

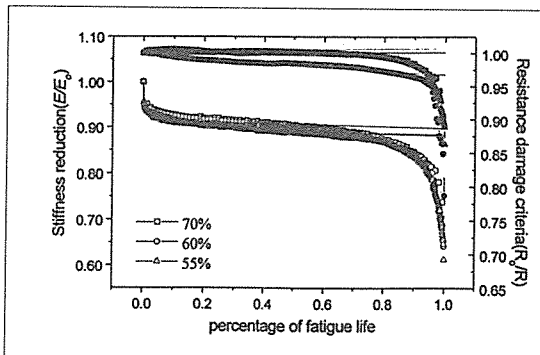


Fig. 7. Comparison of predicted stiffness reduction and electrical damage criteria and experimental value at different stress level

Through Electrical Resistance Measurements in Graphite Fiber-Reinforced Composites", *Exp. Tech.*, Vol. 14, 1990, pp. 16-20.

3. Fischer, C. and Arendts, F. J., "Electrical Crack Length Measurement and the Temperature Dependence of the Mode I Fracture Toughness of Carbon Fibre Reinforced Plastics", *Comp. Sci. Tech.*, Vol. 46, 1993, pp. 319-323.

4. Todoroki, A. and Kobayashi, H., "Application of Electric Potential Method to Smart Composite Structures for Detection Delamination", *JSME Int. A*, Vol. 38, No. 4, 1995, pp. 524-530.

5. Sugita, M., Yanagida, H. and Muto, N., "Materials Design for Self-Diagnosis of Fracture in CFGFRP Composite Reinforcement", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, 1995, pp. A52-A57.

6. Wang, X. and Chung, D.D.L., "Continuous Carbon Fibre Epoxy-Matrix Composite as a Sensor of its own Strain", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 5, 1996, pp. 796-800.

7. Yang, J.N., Jones, D.L., Yang, S.H. and Meskini, A., "A Stiffness Degradation Model for Graphite/Epoxy Laminates", *J. Comp. Mater.*, Vol. 24, 1990 pp.753-759.

8. Yang, J.N., Yang, S.H. and Jones, D.L., "A Stiffness-Based Statistical Model for Predicting the Fatigue Life of Graphite/Epoxy Laminates", *J. Comp. Tech. Res.*, Vol. 11, No. 4, 1989, pp. 129-134.

9. Yang, J.N., Lee, L.J. and Sheu, D.Y., "Modulus Reduction and Fatigue Damage of Matrix Dominated Composite Laminates", *Comp. Struct.*, Vol. 21, 1992, pp. 92-100.

10. Wu, W.F., Lee, L.J. and Choi, S.T., "A Study on Fatigue Damage and Fatigue Life of Composite Laminates", *J. Comp. Mater.*, Vol. 30, No. 1, 1996, 123-139.