

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.6.757

피로 손상 모델을 이용한 직조 탄소섬유강화 복합재료의 피로 손상 평가[§]

박흥선* · 최정훈* · 구재민* · 석창성**

* 성균관대학교 기계공학과

Fatigue Damage Evaluation of Woven Carbon-Fiber-Reinforced Composite Materials by Using Fatigue Damage Model

Hong Sun Park*, Jung Hun Choi*, Jae Mean Koo* and Chang Sung Seok**

* Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received January 5, 2010 ; Revised April 12, 2010 ; Accepted April 13, 2010)

Key Words: Composite Material(복합 재료), Damage(손상), Life Prediction(수명 예측), Fatigue(피로)

초록: 탄소섬유강화 복합재료는 금속재료에 비하여 높은 비강성과 비강도 등의 우수한 기계적 성질을 나타내고 있으며, 이러한 이유로 최근 경량화가 요구되는 항공기용 재료와 자동차용 재료 등으로 그 사용이 급격히 증가하여 금속재를 대체하고 있다. 그러나 대부분의 기계구조물에서는 반복하중에 의한 피로 파손이 주로 발생하고 있다. 그러므로 섬유강화 복합재를 사용한 기계구조물의 내구성을 확보하기 위해서는 이에 대한 피로 해석 및 내구성 평가가 필요하다. 따라서 피로 손상 모델을 이용하여 피로 시험으로부터 구한 손상량을 이용하여 피로손상 누적곡선을 획득하고 해석하였다.

Abstract: Owing to the high specific strength and stiffness of composite materials, they are extensively used in mechanical systems and in vehicle industries. However, most mechanical structures experience repeated load and fatigue. Therefore, it is important to perform fatigue analysis of fiber-reinforced composites. The properties of composite laminates vary depending upon the stacking sequence and stacking direction. Fatigue damage of composite laminates occurs according to the following sequence: matrix cracking, delamination, and fiber breakage. In this study, fatigue tests were performed for damage analysis. Fatigue damages, which have to be considered in fatigue analysis, are determined by using the stiffness values calculated from hysteresis loops, and the obtained fatigue damage curve is examined using Mao's equation and Abdelal's equation.

- 기호설명 -

- D : 손상
- E_i : 초기 강성
- E_o : 반복수 n 에 대한 강성
- E_f : 파단시 강성
- q, m_1, m_2 : Mao 식의 계수
- α, β : Abdelal 식의 계수
- n : 작용하중에 대한 수명

1. 서 론

탄소섬유강화 복합재료는 금속재료에 비하여 높은 비강성과 비강도 등의 우수한 기계적 성질을 나타내고 있으며, 이러한 이유로 최근 경량화가 요구되는 항공기용 재료와 자동차용 재료 등으로 그 사용이 급격히 증가하여 금속재를 대체하고 있는 실정이다.^(1,2)

그러나 대부분의 기계구조물에서는 반복하중에 의한 피로 파손이 주로 발생하고 있다. 그러므로 섬유강화 복합재를 사용한 기계구조물의 내구성을 확보하기 위해서는 이에 대한 피로 해석 및 내구성 평가가 필요하다.

대부분의 재료가 반복하중을 받으면 재료는 국부적이며 미세적인 부분에서 비가역적으로 변화

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, seok@skku.edu

하며 이러한 변화가 재료의 피로 손상을 야기시킨다. 하중 반복수가 증가함에 따라 국부적이고 미세적인 비가역적인 변화의 양은 증가하고 동시에 손상도 축적되며, 손상이 축적됨에 따라 강도 및 강성의 저하와 같은 거시적인 기계적 물성에 영향을 끼친다. Reifsnider 등⁽³⁾은 실험적으로 복합 재료에서 피로 손상이 비선형적으로 증가한다고 보고하였다. 이 모델에 따르면 Fig. 1에 나타낸 것처럼 초기에는 기지(matrix)에 균열이 발생하다가 어느 일정 부분이 지나면, 기지간의 박리 등이 나타나고 최종적으로 순간적인 섬유 파단에 의해 재료의 파단이 발생하며, 이러한 피로 손상은 순차적으로 발생하여 최종 파단에 이르게 된다.⁽⁴⁾

또한, Paepegem 등⁽⁵⁾과 Vallons 등⁽⁶⁾은 Fig. 2와 같이 손상의 발생을 아래와 같이 3 단계로 구분하였다.

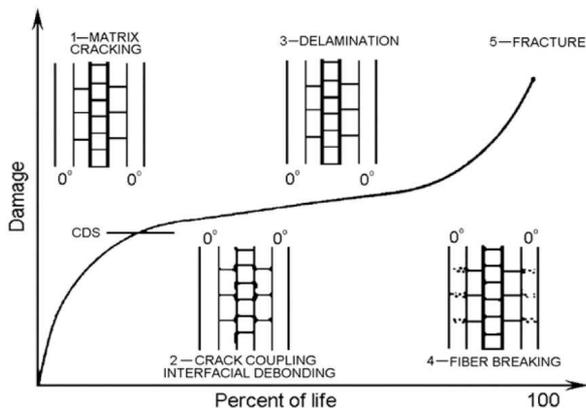


Fig. 1 Fatigue damage evolution in composite laminates⁽³⁾

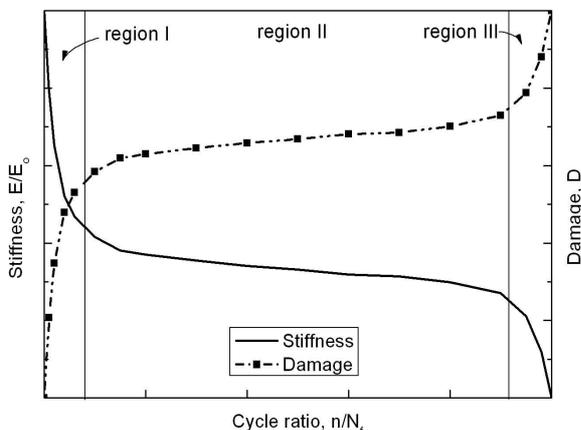


Fig. 2 Three region of fatigue damage curve

Region I : 횡방향 기지 균열이 발생하며, 급격한 강성의 감소와 손상의 증가가 나타난다.

Region II : 강성의 감소와 손상의 증가 추세가 더딘 구간이며, 주요 파손은 박리와 길이 방향의 균열이다.

Region III : 급격한 강성 감소와 손상 증가가 발생하며, 섬유 파손에 의한 국부 파손이 전체 파손을 일으킨다.

이러한 피로에 의한 손상을 이용하여 반복수에 대한 손상량의 변화와 손상량을 통해 재료의 피로 수명을 예측하고, 잔류 강도와 잔존 수명을 정확하게 평가하기 위해서는 손상에 대한 피로손상 누적곡선이 필요하다. 이를 이용하여 수명에 대한 손상을 평가함으로써 피로 수명 등을 예측할 수 있다. 따라서 본 논문은 손상 역학을 이용하여 직조된 탄소섬유강화 복합재료에 대한 피로손상 누적곡선을 해석하기 위하여 피로시험을 실시하였으며, 시험으로부터 획득한 손상량에 대해서 Mao의 모델과 Abdelal의 모델을 적용하여 피로손상 누적곡선을 획득하였으며, 각 모델에 대한 결과를 분석 및 비교하였다.

2. 본 론

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 Fig. 3과 같이 한국 카본(주)에서 생산하는 평직 탄소섬유 프리프레그 (Plain Woven Carbon Prepreg)인 WSN-3K(두께 0.22 mm)를 16 ply(3.5 mm)로 적층하여 성형·제작되었으며, ASTM D3039⁽⁷⁾에 준하여 Fig. 4와 같은 형상으

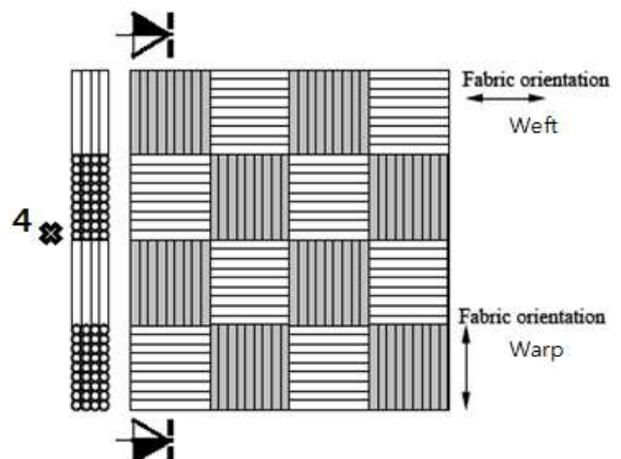


Fig. 3 Scheme of a plain woven prepreg

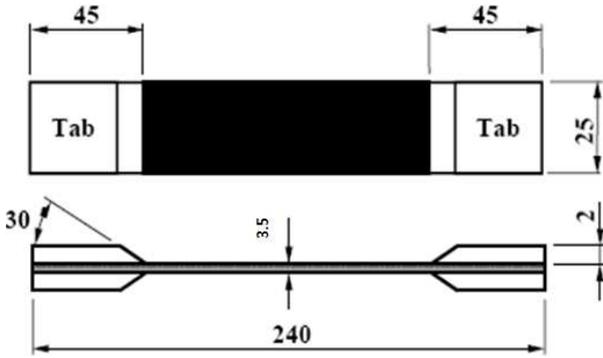


Fig. 4 Configuration of a test specimen

로 피로 시험편을 NC machine을 이용하여 가공하였다. 시험 중에 시험기 그립과 시험편의 슬립을 방지하기 위하여 시험편 끝단 부위에 #100의 에머리-페이퍼를 이용하여 표면을 거칠게 연마하였으며, 두께 2 mm의 GFRP탭을 에폭시 본드로 부착한 후 전기로에서 100 °C로 30분간 경화하였다.

2.2 인장시험

평직 탄소섬유 강화 복합재료의 기계적 물성을 확보하고 피로시험의 하중 크기를 결정하기 위하여 인장시험을 실시하였다. Shimadzu사의 25 ton 용량의 만능시험기를 이용하여 상온에서 변위 제어 방식으로 0.2 mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였으며, extensometer를 부착하여 변형율을 측정하였다. Fig. 5처럼 파단 시까지 응력-변형율 선도가 선형적으로 증가하였으며, 3회 시험 결과의 산포는 거의 없었으며, 인장강도는 약 782 MPa이었다.

2.3 피로시험

피로시험을 통해 히스테리시스 루프를 얻기 위하여 시험속도를 2 Hz로 응력비가 0.1의 일정진폭 하중 시험을 실시하였으며, 매 사이클 당 20 개의 데이터를 저장하였다. 또한, 임의로 선정한 3가지의 응력 레벨에 대해 시험을 실시하였다. 시험 장비는 Instron사의 8802 유압식 만능 시험기를 사용하였다.

3. 피로손상 모델

3.1 피로 손상

복합재료의 경우에는 복합재료에 함유되어 있는 구성물질에 따라 기계 물성치가 달라지기 때문에 피로 해석 및 수명 예측이 매우 어렵다.⁽⁴⁾

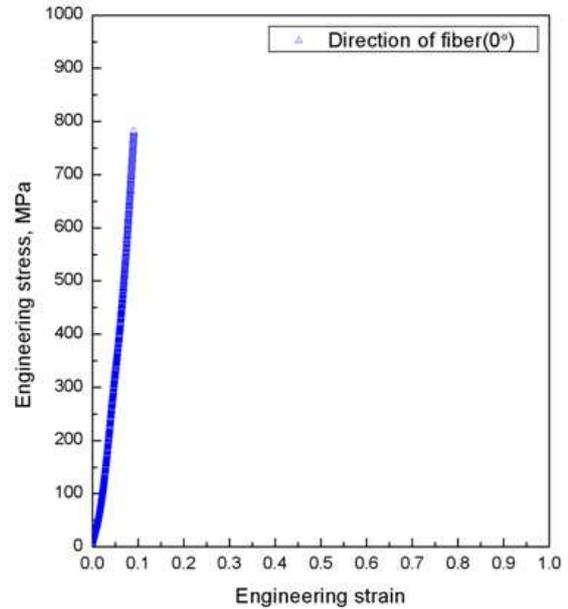


Fig. 5 Configuration of a test specimen

또한, 섬유와 기지 사이의 상호부분과 합성물에 의해서도 피로 거동은 영향을 받는다.

반복하중 하에서는 재료의 손상은 축적이 되며 파손의 원인이 된다. 동질 재료의 경우에는 초기에 균열성장이 더디게 진행이 되며 하중 방향에 수직인 방향으로 균열이 발생하고 진전한다. 반면에 복합재료의 경우에는 파괴의 거동은 기지 파손, 섬유와 기지간의 박리, 섬유 파단, 동공(void)의 성장 등과 같은 복합적인 파손 모드를 갖으며, 이러한 손상은 대부분 초기 영역에서 주로 발생한다.

복합재료에 대한 손상 거동은 매우 복잡하기 때문에 Paris 법칙에 의해 설명할 수 없으며, 일반적으로 복합재료에서는 유사한 균열 진전 모드를 얻을 수 없다. 따라서 피로 해석에 있어서 전통적인 파괴 역학을 사용할 수 없다.

그리고 복합재료에서 피로에 의한 손상을 직접적으로 구하기는 어렵다. 그러므로 탄성 계수 또는 강성을 이용하여 식 (1)⁽⁸⁾로부터 피로 손상을 정의할 수 있다.

$$D = \frac{E_i - E_o}{E_i - E_f} \quad (1)$$

여기서, D 는 누적된 피로 손상이고, E_i , E_f 와 E_o 는 각각 초기 강성, 파단 직전의 강성, 반복수에 대한 손상된 강성이다. 이 때, 파단 직전의 강성 E_f 는 0이 아니며, 누적 손상 D 는 0과 1사이의 값

이다.

강성은 피로시험을 실시하는 동안 획득하는 히스테리시스 루프를 이용하여 측정한다. 매 사이클에 대한 강성을 계산하여 각 사이클에서의 손상량을 평가할 수 있다. 이 강성으로 피로 손상 해석을 실시할 수 있다.

3.2 Mao 모델

피로 손상 해석을 위해서 손상 거동을 나타낼 수 있는 피로누적 손상곡선이 필요하다. 복합재료의 강성 열화를 묘사하기 위해 Mao and Mahadevan⁽⁸⁾은 피로손상 축적 모델을 제안하였다. 이 식은 피로의 초기와 말기에 나타나는 급격한 손상의 변화를 정확하게 설명할 수 있다는 장점을 갖고 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$D = q \left(\frac{n}{N} \right)^{m_1} + (1 - q) \left(\frac{n}{N} \right)^{m_2} \quad (2)$$

이 때, q, m_1, m_2 는 재료에 의존하는 상수로서 실험을 통해 최소 자승법으로 얻을 수 있으며, n 은 작용하중에 대한 반복수이고, N 은 작용하중에 대한 피로파단 수명이다. 또한, 초기의 빠른 기지 손상은 우변의 첫 번째 항인 $m_1 < 1.0$ 으로부터 특징을 지을 수 있고, 파단 직전의 섬유의 갑작스런 손상의 진행은 우변의 두 번째 항인 $m_2 > 1.0$ 으 나타낼 수 있다.

3.3 Abdelal 모델

Abdelal 등⁽⁹⁾은 tensor 량에 의해서가 아니라 scalar 량에 의해서 피로손상을 해석하는 것은 단지 두 개의 변수만이 필요하기 때문에 유용하다고 보고하고 있으며, 응력 재분포는 손상량을 섬유, 기지, 계면 효과로 각각 분산시킴으로써 설명할 수 있다고 하였다.

따라서 하중의 반복수 n 에 대한 축적된 손상의 양을 나타내기 위하여 Arnold and Kruch⁽¹⁰⁾가 제안한 스칼라 모델을 사용하였고 피로 손상에 대한 스칼라 량은 아래의 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$D = 1 - \left(1 - \left(\frac{n}{N} \right)^{1/(1-\alpha)} \right)^{1/(1+\beta)} \quad (3)$$

이 때, α, β 는 실험을 통해서 얻을 수 있는 값이다.

4. 피로손상 해석

4.1 피로누적곡선

피로손상 해석은 피로시험으로부터 얻은 응력-변형률에 대한 히스테리시스 루프로부터 각 사이클에 대한 강성을 계산하여 식 (1)을 이용하여 각 사이클에 대한 손상량을 계산하였다. 손상량과 반복수를 전체파단수명으로 나눈 수명비를 이용하여 Fig. 6 ~ Fig. 8에 그 결과를 그래프로 나타내었으며, 선도에서 보는 바와 같이 기지 손상과 섬유 손상이 발생하는 피로 수명의 초기와 말기에는 빠른 손상의 증가 속도를 나타내고 있으며, 중간 부분은 완만한 경향을 보였다. 피로 손상 데이터들을 Mao 등⁽⁸⁾이 제안한 식과 Abdelal 등⁽⁹⁾이 제안한 식을 이용하여 최소자승법으로 계수들을 획득하였으며, 그 결과는 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였고, Table 1과 Table 2의 계수들을 이용하여 구한 피로손상 누적곡선을 Fig. 6 ~ Fig. 8에 같이 나타내었다.

Table 1 The coefficients of Mao's equation

	q	m ₁	m ₂
87%	0.362	0.247	1.353
86%	0.422	0.283	2.427
80%	0.429	0.139	1.889

Table 2 The coefficients of Abdelal's equation

	α	β
87%	0.33897	-0.78867
86%	0.95914	-1.04277
80%	1.41012	-3.82423

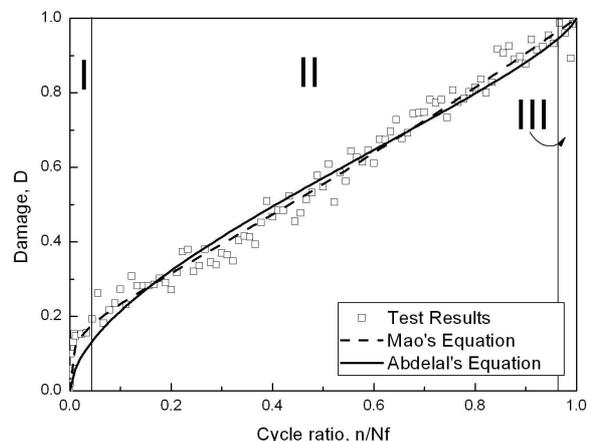


Fig. 6 Fatigue damage curve for test of 87% tensile strength

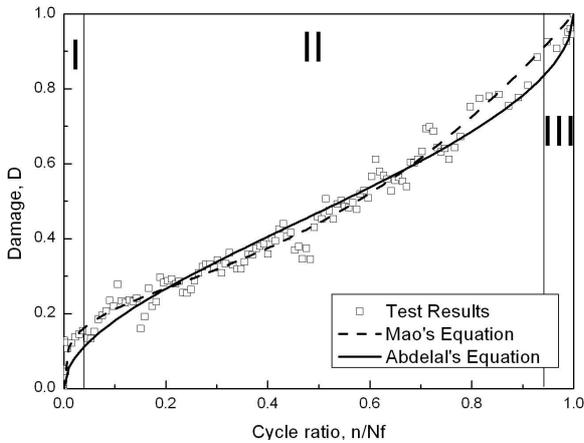


Fig. 7 Fatigue damage curve for test of 86% tensile strength

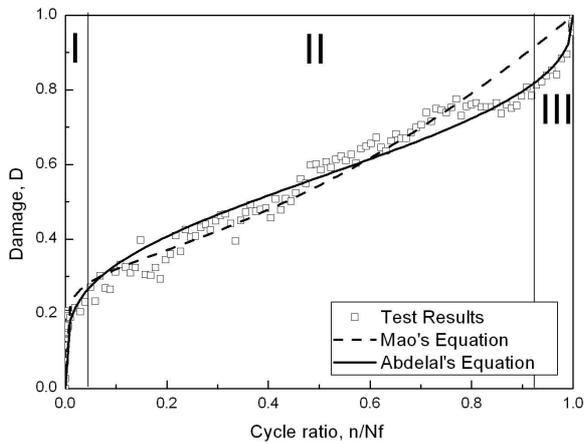


Fig. 8 Fatigue damage curve for test of 80% tensile strength

에는 빠른 손상의 증가 속도를 나타내고 있으며, 중간 부분은 완만한 경향을 보였다. 피로 손상 데이터들을 Mao 등⁽⁸⁾이 제안한 식과 Abdelal 등⁽⁹⁾이 제안한 식을 이용하여 최소자승법으로 계수들을 획득하였으며, 그 결과는 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였다. Table 1과 Table 2의 계수들을 이용하여 구한 피로손상 누적곡선을 Fig. 6 ~ Fig. 8에 같이 나타내었다.

4.2 고찰

앞서 설명한 바와 같이 손상량의 진행속도가 변화하는 시점을 통해 손상누적곡선을 3개의 영역으로 구분할 수 있다. 인장강도의 87 %에 해당하는 하중으로 피로시험을 실시한 결과에서는 큰 시험 하중으로 인해 섬유파손이 한 번에 일어나면서 3영역의 영향이 미비하였지만 대체적으로 3개의 영역으로 구분이 가능하다. 그리고 기지 파

손과 섬유 파손이 일어나는 1영역과 3영역에서는 손상의 진행 속도가 현저하게 빠름을 확인할 수 있다.

두 개의 제안식에 의해 작성된 손상누적곡선은 손상의 3가지 과정에 대한 특징을 잘 나타내는 것을 알 수 있다. 먼저, Mao가 제안한 식에 의한 곡선은 급격한 손상이 증가하는 1영역과 안정된 손상의 증가를 보이는 2영역에 대해서는 시험 결과와 잘 만족하는 것을 확인할 수 있지만 갑작스러운 손상의 증가에 의해 파단이 일어나는 3영역에 대해서는 시험 결과와 차이를 나타내고 있다. 그에 반해, Abdelal이 제안한 식에 의한 손상누적곡선은 급격한 손상의 증가를 보이는 1영역에서 곡선이 완만하게 증가하는 것을 알 수 있으며, 2영역에서는 실제 손상량의 증가에 비해 과소평가하는 경향이 있으나 3영역에서의 급격한 손상량의 변화에 대해서 대체적으로 잘 부응하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 직조된 탄소섬유강화 복합재료를 이용하여 피로시험을 실시하고 그것으로부터 발생하는 손상을 해석하였다. 그리고 제안된 두 모델에 대한 피로손상누적 곡선을 획득하였으며, 그로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 피로시험을 통해 복합재료에 대한 수명에 대한 손상량을 계산하였다. 기지 손상과 섬유 손상이 발생하는 초기와 말기 영역에서는 급격한 손상량의 영향을 나타냈으며, 계면에서의 손상을 나타내는 중간 영역에서는 상대적으로 완만한 경향을 보였다.

(2) 정확한 손상량 및 손상 변화량을 평가하기 위해서, Mao의 모델과 Abdelal의 모델을 이용하여 피로손상누적곡선을 획득하였으며, 두 개의 곡선 모두 시험 결과를 잘 특징지음을 확인하였다.

(3) Mao의 모델은 1영역과 2영역에서는 잘 일치하는 경향을 보였지만, 3영역에서는 시험결과와 차이를 나타내었으며, Abdelal의 모델은 1영역에서는 완만한 증가를 보이고, 2영역에서는 손상량의 변화를 과소평가하였지만, 3영역에 대해서는 시험 결과와 일치하는 경향을 보였다.

(4) 평직 탄소섬유 강화 복합재료의 경우, 손상

분석 및 평가시에 Mao의 모델이 더 적합한 것으로 판단되며, 향후 수명 예측 및 잔여 수명 평가에 활용이 가능하다.

후 기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업(BK21)과 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

- (1) Kwon, O. H. and Yun, Y. S., 2004, "The Effect of Load Orientation for Crack Propagation and Acoustic Emission Evaluation on Plain Woven CFRP," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 4, pp. 443~452.
- (2) Kim, K. S. and Kim, S. T., 1992, "A Study on Fracture Characteristics of Woven Carbon Fiber Reinforced Composite Material," *Trans. of the KSME*, Vol. 16, No. 3, pp. 497~505.
- (3) Reifsnider, K. L., Henneke, E. G., Stinchcomb, W. W. and Duke, J. C., 1983, "Damage Mechanics and NDE of Composite Laminates," *Mechanics of Composite Materials*, In: Hashin Z, Herakovich CT, editors. Pergamon Press, pp. 399~420.
- (4) Cheng, G. and Plumtree, A., 1998, "A Fatigue Damage Accumulation Model Based on Continuum Damage Mechanics and Ductility Exhaustion," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 7, pp. 495~501.
- (5) Van Paepegem, W. and Degrieck, J., 2002, "A New Coupled Approach of Residual Stiffness and Strength for Fatigue of Fibre-Reinforced Composites," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 747~762.
- (6) Katleen Vallons, Mengmeng Zong, Stepan V. Lomov and Ignaas Verpoest, 2007, "Carbon Composites Based on Multi-Axial Multi-Ply Stitched Preforms - Part 6. Fatigue Behaviour at Low Loads: Stiffness Degradation and Damage Development," *Composites: Part A*, Vol. 38, pp. 1633~1645.
- (7) ASTM D3039, 2007, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," *ASTM international*
- (8) Mao, H. and Mahadevan, S., 2002, "Fatigue Damage Modelling of Composite Materials," *Composite Structures*, Vol. 58, pp. 405~410
- (9) Abdelal, G. F., Caceres, A. and Barbero, E. J., 2002, "A Micro-Mechanics Damage Approach for Fatigue of Composite Materials," *Composite Structures*, Vol. 56, pp. 413~422
- (10) Arnold, S. M. and Kruch, S., 1991, "Differential Continuum Damage Mechanics Models for Creep and Fatigue of Unidirectional Metal Matrix Composite," *NASA Technical Memorandum TM-1052131*