

論文

응력이완 시험방법을 이용한 탄소/피크(PEEK)
열가소성수지 복합재료의 점탄소성변형 특성규명

윤 광 준*

Characterization of Elastic-Viscoplastic Deformation of Carbon/PEEK
Thermoplastic Composite Using Stress Relaxation Testing Method

K.J. Yoon*

ABSTRACT

The strain-rate effects on the nonlinear deformation of Carbon/PEEK thermoplastic composite were investigated and characterized by using stress relaxation testing method. Simple tension and relaxation tests were performed on uniaxial off-axis coupon specimens with stepwise change of strain rate. The orthotropic overstress viscoplasticity model was used to describe the strain-rate effect on the nonlinear stress-strain curve.

The measured stress-strain curves were compared with those predicted by numerical analysis based upon the orthotropic overstress viscoplasticity model. The results showed that the stress relaxation testing method and the orthotropic overstress viscoplasticity model are suitable for the characterization of elastic-viscoplastic behavior of Carbon/PEEK composite.

초 록

탄소/피크 복합재료의 점탄소성 변형 거동을 응력이완 시험방법을 이용하여 관찰하고 특성규명을 하였다. 비김축 일방향 섬유보강시편에 대하여 인장속도가 다른 단계별 단순인장과 응력이완 시험을 교대로 진행하면서 응력-변형도 곡선의 변화를 관찰하였다. 변형속도의 변화에 따른 응력-변형도 곡선의 변화를 예측하기 위하여 이방성 과응력점소성 모델을 이용하였다.

실험에서 측정된 응력-변형도 곡선을 예측모델을 이용한 수치해석 결과와 비교한 결과, 응력이완 시험방법과 이방성 과응력점소성 모델을 이용하면 탄소/피크 복합재료의 점탄소성 변형특성규명을 적합하게 할 수 있다고 판단되었다.

1. 서 론

탄소/피크 열가소성수지 복합재료는 기존의 탄소/에폭시 복합재료의 비교하여 볼 때 파괴인성, 충격특성 및 피로특성이 우수하고 재료의 응용온도

범위도 높아 최신 항공기의 재료로 활발한 연구의 대상이 되고 있다. 현재 항공기 복합재료로 널리 사용되고 있는 탄소/에폭시 복합재료는 에폭시 수지의 취성(Brittleness)으로 인하여 내충격성이 약하고 수지가 습기를 흡수하는 특성 등을 가지고 있어

* 건국대학교 공과대학 항공우주공학과

이러한 문제의 해결책이 필요한 실정이었다. 이러한 단점들을 해결하기 위하여 개발된 재료들 중의 하나가 탄소/피크 복합재료인데 이 재료는 탄소/에폭시 복합재료의 우수한 탄성특성들을 그대로 보유하면서 충격에 강하고 흡수율도 매우 낮은 특성을 가지고 있다. 내충격성 및 파괴특성이 우수한 이유는 피크(PEEK : polyether-ether-ketone) 수지의 높은 신장율로부터 나오게 되는데 이러한 높은 신장율은 탄소/피크 복합재료의 탄소성 및 점소성변형과 직접 관련이 된다. 새로 개발된 재료가 항공기의 재료로 응용되기 위하여는 재료의 제반 특성 규명 및 구조응력 해석이 필요하게 되는데 기존의 탄소/에폭시 복합재료의 탄성 특성 규명 및 해석으로도 충분 하였지만 탄소/피크 복합재료의 경우에는 점탄소성 변형 때문에 탄성해석은 물론 점탄소성 해석도 필요하게 된다.

열가소성 수지 복합재료의 인장속도에 따른 변형특성을 설명하기 위하여 Schapery 등[1]은 선형 및 비선형 점탄성 모델을 이용하였다. 70년대까지 금속의 변형속도에 따른 비선형 변형을 설명하기 위하여 과응력 점소성모델[2~6]을 대부분 이용하였고, Bodner와 Partom[7]은 항복기준이 필요하지 않은 점소성 모델을 제창하였다. 탄소/피크 복합재료의 점소성 변형특성을 표현하기 위하여 Gates와 Sun[9]은 과응력 개념과 단변수 소성모델을 결합시켰으며, Yoon과 Sun[10]은 매우 느린 인장속도(1με/sec.)와 빠른 인장속도(1000με/sec.)의 실험을 수행하여 인장속도에 따른 응력-변형도 곡선의 변화를 관찰하여 점소성 특성규명을 하였다. 여기서 1με/sec. 인장속도의 응력-변형도 곡선을 준정적(quasi-static) 응력-변형도 곡선으로 보아 과응력을 계산하는 기준으로 가정하였으나, 이러한 느린 속도에서도 총변형도를 일정하게 하는 이완시험을 하면 3~5% 정도까지의 응력이완이 관찰되어 이에 대한 보완의 필요성이 있다.

본 논문에서는 보다 정확한 준정적(quasi-static) 응력-변형도 곡선을 얻기 위하여 소성영역에서 단계별 변형속도 인장시험과 총변형도를 일정하게 유지시키는 응력 이완시험을 하였고, 여기서 수한 데이터를 기본으로 이방성 과응력 점소성 모델을

이용하여 탄소/피크 복합재료의 이방성 점탄소성 변형 특성을 규명하였으며, 인장 변형속도에 따른 응력-변형도 곡선을 예측하여 보았다.

2. 이론해석

2-1. 단변수 소성함수모델(One Parameter Plasticity Function Model)

탄소 섬유 복합재료의 경우, 섬유의 수직방향으로의 변형과 전단변형에는 점소성변형이 존재하여 비선형 응력-변형도 관계를 관찰할 수 있으나, 섬유보강 방향으로의 소성변형이 무시할 정도로 작다. 이러한 탄소성 변형을 표현하기 위하여 Sun과 Chen[8]은 단변수 소성함수를

$$f = \frac{1}{2} (\sigma_{22}^2 + 2a_{66}\sigma_{12}^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 정의하였다. 여기서 a_{66} 는 소성이방성을 표시하는 하나의 매개변수이다. 이 함수에 유동법칙(flow rule)을 적용하면 소성변형도는

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_{22} \\ 2a_{66}\sigma_{12} \end{bmatrix} d\lambda \quad \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 표현되고 $d\lambda$ 는 비례특성계수이다. 이에 대응하는 유효응력(effectvie stress)과 유효소성변형(effective plastic strain)의 증분은

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3f} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_{22}^2 + 2a_{66}\sigma_{12}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$d\bar{\epsilon}^p = \left[\frac{2}{3} (\sigma_{22}^2 + 2a_{66}\sigma_{12}^2) \right]^{\frac{1}{2}} d\lambda \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3} [(d\epsilon_{22}^p)^2 + \frac{1}{2a_{66}} (d\gamma_{12}^p)^2]}^{1/2}$$

로 정의하였고, 소성일(plastic work done)의 관계로부터 비례특성계수는 식(5)와 같이 유도되었다.

$$d\lambda = \frac{3}{2} \left(\frac{d\bar{\epsilon}^p}{d\bar{\sigma}} \right) \left(\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

비례특성계수는 유효응력의 크기에 따라 변하는 재료의 비선형 계수로 유효응력과 유효 소성변형

률의 관계로부터 실험적으로 구해져야 한다. 이 관계는 비깁축 시편의 인장시험으로부터 비교적 간단하게 구하여질 수 있다. 시편의 섬유방향과 인장방향과의 각도를 θ 라 하면 재료의 주축방향 응력들은 인장방향의 응력 σ_x 로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \cos^2\theta \sigma_x \\ \sigma_{22} &= \sin^2\theta \sigma_x \\ \sigma_{12} &= -\sin\theta \cos\theta \sigma_x \end{aligned} \quad \dots\dots (6)$$

이 관계를 식 (3)과 (4)에 대입하면

$$\bar{\sigma} = h(\theta)\sigma_x \quad \dots\dots (7)$$

과

$$d\bar{\epsilon}^p = \frac{2}{3} h(\theta) \sigma_x d\lambda \quad \dots\dots (8)$$

로 표현될 수 있다. 여기서

$$h(\theta) = \sqrt{\frac{3}{2}} [\sin^4\theta + 2a_{66} \sin^2\theta \cos^2\theta]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots (9)$$

로 보강섬유 방향의 함수이다.

변형률의 좌표변환에 의하여

$$d\bar{\epsilon}^p = d\epsilon_x^p / h(\theta) \quad \dots\dots (10)$$

의 관계가 구하여질 수 있으며, 유효응력과 변형률은 실제값들과

$$\frac{d\bar{\epsilon}^p}{d\epsilon_x^p} = h^2(\theta) \frac{d\sigma_x}{d\epsilon_x^p} \quad \dots\dots (11)$$

의 관계가 되고, 비례특성계수는

$$d\lambda = \frac{3}{2} \frac{1}{h^2(\theta)} \frac{d\epsilon_x^p}{d\sigma_x} \frac{d\sigma_x}{\sigma_x} \quad \dots\dots (12)$$

로 표현될 수 있다.

탄소/피크 일방향 보강 비깁축 인장시편으로부터 Sun과 Yoon[11]은 총 유효응력과 유효소성 변형도의 관계가 식(13)과 같은 지수함수의 형태로 표현될 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

$$\bar{\epsilon}^p = A(\bar{\sigma})^n \quad \dots\dots (13)$$

여기서 A와 n은 변형 경화성(deformation hardening)을 나타내는 재료의 특성값이다. 이방성 소성매개변수 a_{66} 를 포함한 이 세가지의 특성값으로 단순인장의 경우에 대하여 이방성 재료의 소성 변형

특성을 간단히 표현할 수 있는 것이 이 모델의 특징이다.

2-2. 이방성 과응력 점소성 모델(Orthotropic Overstress Viscoplasticity Model)

미량 변형도 가정에 있어서 총 변형도는 탄성변형과 소성변형의 합으로 구성되어 있다고 볼 수 있으며 시간에 대한 미분형태는 식(14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad \dots\dots (14)$$

탄성변형 부분 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 는 응력과의 관계에서 식(15)로

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = S_{ij}^e \dot{\sigma}_{ij} \quad \dots\dots (15)$$

표현되며, 여기서 S_{ij}^e 는 탄성 순응도이다.

소성 변형속도(plastic strain rate)는 식(2)의 유도법칙으로부터

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \text{ or } \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{11}^p \\ \dot{\epsilon}_{22}^p \\ \dot{\gamma}_{12}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_{22} \\ 2a_{66}\sigma_{12} \end{bmatrix} \dot{\lambda} \quad \dots (16)$$

로 표현된다. 여기서 λ 는 비례특성계수의 변화율이다. 일율은 식(17)과 같이

$$\dot{W}^p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p = 2f\dot{\lambda} \quad \dots\dots (17)$$

표현될 수 있고, 유효 소성 변형속도 $\bar{\dot{\epsilon}}^p$ 는 일율과 식(18)과 같은 관계를 가지므로

$$\dot{W}^p = \bar{\sigma} \bar{\dot{\epsilon}}^p \quad \dots\dots (18)$$

유효응력의 정의와 식(17), (18)로부터 유효 소성 변형도율은 식(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\dot{\epsilon}}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[(\dot{\epsilon}_{22}^p)^2 + \frac{1}{2a_{66}} (\dot{\gamma}_{12}^p)^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots (19)$$

식(3)과 (17)을 식(18)에 대입하면

$$\bar{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{\bar{\dot{\epsilon}}^p}{\bar{\sigma}} \quad \dots\dots (19)$$

의 관계를 얻을 수 있다.

Gates와 Sun[9]은 단변수 소성모델과 과응력 개념을 복합시켜 과응력 점소성 모델을 소개한 바가 있다. 여기서 유효 소성 변형속도 $\bar{\dot{\epsilon}}^p$ 가 과응력 H의 함수라고 가정하였다.

$$\bar{\epsilon}^p = \Phi(H) \quad \dots\dots\dots (21)$$

여기서

$$H = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}^* \quad \dots\dots\dots (22)$$

이고 $\bar{\sigma}^*$ 는 준정적 유효응력(quasistatic effective stress)으로 매우 작은 인장 변형속도 경우의 응력-변형도 곡선에서 구할 수 있다. 과응력 함수 $\Phi(H)$ 는 식(23)과 같은 근사함수로 가정하였다.

$$\Phi(H) = \begin{cases} (H/K)^{\frac{1}{m}} & \text{if } \bar{\sigma} > \bar{\sigma}^* \\ 0 & \text{if } \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}^* \end{cases} \quad \dots\dots\dots (23)$$

여기서 K와 m은 점소성 특성계수이다. 즉 유효 소성 변형속도는

$$\bar{\epsilon}^p = \begin{cases} \left[\frac{\bar{\sigma} - \bar{\sigma}^*}{K} \right]^{\frac{1}{m}} & \text{if } \bar{\sigma} > \bar{\sigma}^* \\ 0 & \text{if } \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}^* \end{cases} \quad \dots\dots\dots (24)$$

의 형태로 표현된다.

x-방향의 하중을 받는 비깁축 시편의 경우, 총 변형속도는 식(25)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_x = \dot{\epsilon}_x^e + \dot{\epsilon}_x^p \quad \dots\dots\dots (25)$$

여기서 탄성 및 소성 변형속도는 각각

$$\dot{\epsilon}_x^e = \frac{\dot{\sigma}_x}{E_x} \quad \dots\dots\dots (26)$$

와

$$\dot{\epsilon}_x^p = \bar{\epsilon}^p h(\theta) \quad \dots\dots\dots (27)$$

의 관계를 갖고 있다. 이 연구에서는 일정한 인장 변형속도의 단순 인장의 경우만 고려하였다. 이러한 경우 유효응력은 준정적 유효응력 보다 항상 크기 때문에 총변형도율은 식(28)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_x &= \frac{\dot{\sigma}_x}{E_x} + \left[\frac{\bar{\sigma} - \bar{\sigma}^*}{K} \right]^{\frac{1}{m}} h(\theta) \quad \dots\dots\dots (28) \\ &= \frac{\dot{\sigma}_x}{E_x} + [h(\theta)]^{1+\frac{1}{m}} \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{m}} (\sigma_x - \sigma_x^*)^{\frac{1}{m}} \end{aligned}$$

식(28)은 재료가 인장 상태의 점탄소성 변형을 해석할 수 있는 표현식으로 탄성 특성계수와 세가지의 소성 특성계수, 그리고 과응력계수 K와 m을 알면 주어진 인장속도에서 이방성 재료의 점탄소성 변형을 예측할 수 있다. 여기서 β 를 식(29)과 같이 정의하면

$$\beta = [h(\theta)]^{1+\frac{1}{m}} \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

총 변형도율은 식(30)과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\dot{\sigma}_x}{E_x} + \beta (\sigma_x - \sigma_x^*)^{\frac{1}{m}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

식(30)의 비선형 비문방정식을 수치해석 컴퓨터 프로그램으로 계산하면, 주어진 인장 속도에 대하여 응력-변형도 곡선을 예측할 수 있다. 총변형속도가 일정한 단순인장의 경우

$$\frac{\dot{\sigma}_x}{E_x} + \beta (\sigma_x - \sigma_x^*)^{\frac{1}{m}} = c(\text{상수}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

형태의 미분방정식이 된다. 또한, 소성영역에서 총변형도를 고정시키고 일정시간을 유지하면 인장 속도가 없게 되어 응력이완(stress relaxation)의 경우가 되는데, 이때의 미분방정식은

$$\frac{\dot{\sigma}_x}{E_x} = -\beta (\sigma_x - \sigma_x^*)^{\frac{1}{m}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

의 관계가 되어 점소성 변형에 의한 소성 변형도의 증가는 탄성 변형도의 수축으로 흡수됨을 의미한다.

3. 실험 및 결과

3-1. 시편준비 및 실험방법

두께가 $1.27 \pm 0.025\text{mm}$ 인 $[0]_{10T}$ 탄소/피크 판재를 섬유방향과 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 각도로 폭 $19.0 \pm 0.25\text{mm}$, 길이 $254.0 \pm 25\text{mm}$ 의 시편으로 절단하였다. 각 비깁축 시편에 탭을 붙이고 중앙에 게이지(Micro-Measurement Ea-13-125AC-350)를 부착하였다. 준비된 시편의 형상은 그림 1과 같다. 이 시편을 하중시험기(MTS647)의 유압식 그림에 고정시키고 스트레인 게이지와 로드 셀(load cell)을 마이크로 컴퓨터에 연결하였다. 아날로그 신호를 A/D 변환기를 통하여 숫자화한 응력과 변형도를 기억시키고 그래픽 프로그램을 이용하여 응력-변형도 곡선을 관찰하며 시험하였다. 시편의 인장 변형속도(strain rate)를 정확히 제어하기 위하여 신장계(extensometer)를 시편의 옆면에 부착시키고 인장시험기의 스트레인 제어 모듈에 연결한 스트레인 제어방식을 택하였다. 그림 2는 전체 실험장치의 계통도이다.

$5\mu\text{e}/\text{sec.}$ 의 속도로 인장시험을 시작하여 약 0.5%

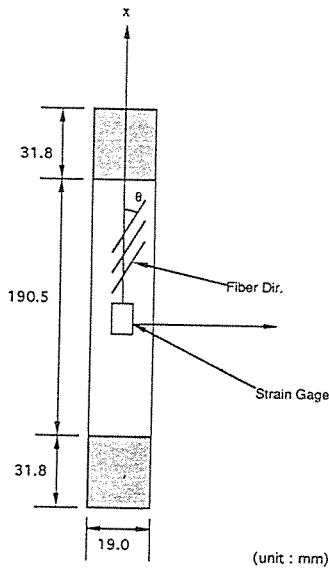


Fig. 1. Specimen Geometry and Positions of Strain Gage.

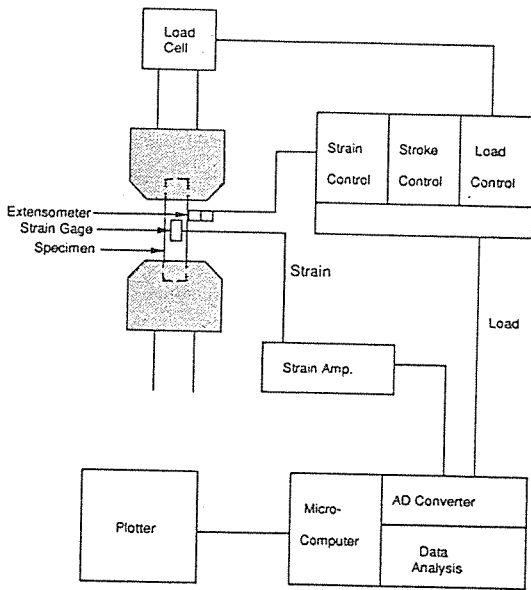


Fig. 2. Specimen Testing System.

의 총변형도에서 변형도를 고정시키고 1시간 동안 기다리며 응력이완을 관찰하였다. 이후 0.1 $\mu\text{e}/\text{sec}$, 1.0 $\mu\text{e}/\text{sec}$, 10 $\mu\text{e}/\text{sec}$, 100 $\mu\text{e}/\text{sec}$, 1000 $\mu\text{e}/\text{sec}$ 의 단계를 인장속도로 0.2~0.3%씩 총변형도를 증가시키고 매 단계 끝에서 1시간씩 응력이완 실험을

실험을 진행시켰다.

3-2. 결과 및 분석

그림 3-a, b, c의 실선은 5 $\mu\text{e}/\text{sec}$ 의 인장속도로 2.5%의 총변형도까지 인장시험 하다가 이완과정을 거쳐 다시 인장을 할 때 인장속도를 0.1 $\mu\text{e}/\text{sec}$ 에서 10배씩 증가시키며 인장 및 이완시험을 한 응력-변형도 곡선이다. 인장속도에 따라 응력-변형도 곡서의 변화가 큰 양상을 볼 수 있으며, 총변형도를 고정시킨 이완시험의 경우 인장 속도에 따라 총응력의 5~12% 과응력이 존재하는 것을 관찰할 수 있다.

과응력 점소성 모델의 특성계수를 올바르게 구하려면 정확한 준정적 응력-변형도 곡선을 구하는 일이 선행되어야 한다.

Yen[6]등은 304 스텐레스 강의 준정적 응력-변형도 곡선을 구하기 위하여, 일정한 인장속도로 인장을 하다가 소성변형이 나타나면 5~10분 정도 총 변형도를 고정시키는 이완시험을 한 다음, 탄성하중감소(unloading) 및 재인장(reloading) 시험 과정을 여러번하여 구한 응력-변형도 곡선을 이용하여 준정적 응력-변형도 곡선을 구하였다. 그들은 매 구간에서 하중 증가 경우의 응력-변형도

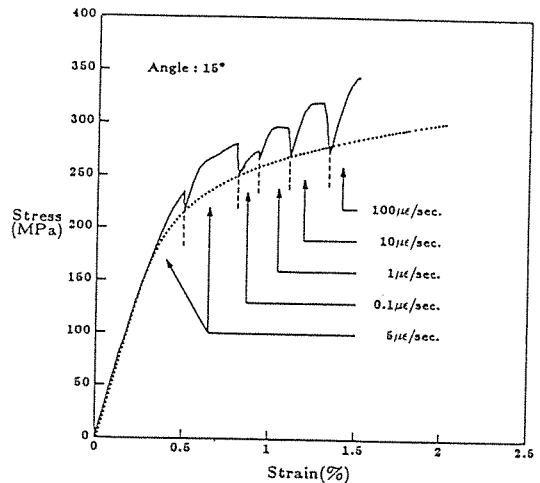


Fig. 3-a. Stress-strain curves obtained from the stepwise strain rate loading and relaxation test for 15° specimen.

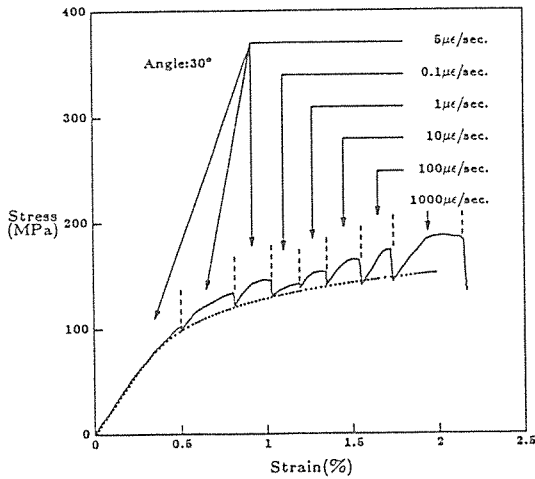


Fig. 3-b. Stress-strain curves obtained from the stepwise strain rate loading and relaxation test for 30° specimen.

선과 이완시의 선이 만나는 점을 준정적 응력-변형도 데이터라고 가정하여 이 점들을 연결하여 준정적 응력-변형도 곡선을 결정하였다.

본 연구의 탄소/PEEK 시편의 이완실험에서는 Yen[6] 실험의 이완시간 10분 정도는 고정 총변형도를 유지시키는 기간이 너무 짧다고 판단되어 이완시간을 1시간동안 유지시켰다. 그리고 각 구간에서 1시간 이완실험 후의 응력-변형도 데이터를 준정적 하중-변형도 점이라고 가정하였다. 각 구간에서 구한 준정적 하중-변형도 데이터를 지수함수 형태로 곡선 맞춤(curve-fitting)하여 15°, 30°, 45° 비깁축 시편에 대하여 그림 3-a, b, c와 같이 점선으로 이루어진 곡선이 준정적 응력-변형도 곡선이다.

인장속도가 각각 다른 구간에서 실선과 점선의 차이가 과응력에 해당하는 값이 되는데, 각 인장속도 구간에서 이완단계에 들어가기 직전의 과응력을 그 구간의 대표 과응력으로 가정하였다.

각 비깁축 시편의 실험에서 측정된 준정적 응력과 변형도 값은 각각 유효응력과 유효 변형도로 환산되어 단변수 소성모델의 소성 특성계수 A와 n으로 표현될 수 있다.

이 실험에서 구한 준정적 유효응력-소성변형도 곡선이 그림 4에 제시되어 있으며, 그 특성값들은

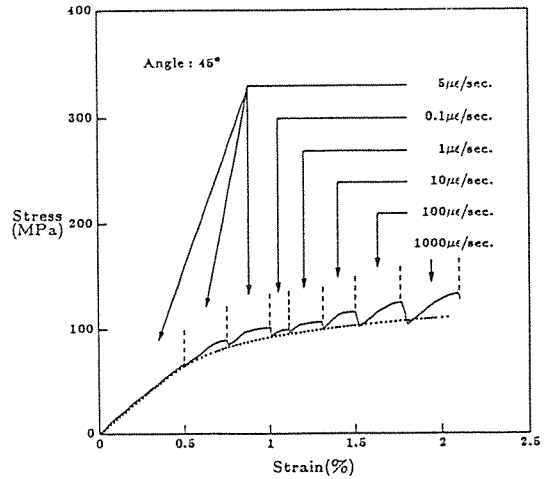


Fig. 3-c. Stress-strain curves obtained from the stepwise strain rate loading and relaxation test for 45° specimen.

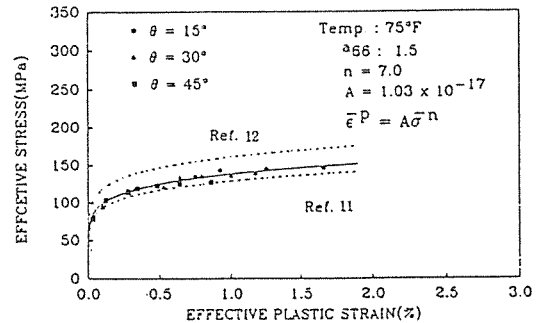


Fig. 4. Quasi-static effective stress vs. effective plastic strain relationship for off-axis specimens.

표 1. 탄소/피크의 탄성 및 점소성 특성계수

탄성 특성 계수 (참고문헌[11])	E_1 (GPa)	127.6
	E_2 (GPa)	10.3
	G_{12} (GPa)	6.0
	ν_{12}	0.32
점소성 특성 계수	a_{66}	1.5
	n	7.0
	A (MPa) ⁻ⁿ	1.03×10^{-17}
	m	0.15
	K(MPa/sec. ^m)	112.2

표 1에 있다. 본 연구에서 구한 준정적 유효응력-소성변형도 곡선을 참고문헌[9]와 [10]에서 구한 곡선과 비교하여 보았다.

참고문헌[9]의 곡선은 인장, 이완 탄성수축 및

인장과정에서 응력-변형도 곡선의 교차점을 준정적 응력이라고 본 가정으로 Yen[6]등의 방법과 흡사하다. 탄성수축 및 인장과정의 추가로 준정적 응력의 크기가 본 연구의 가정보다 약간 크게 나왔다. Sun과 Yoon[10]은 $1\mu\text{e}/\text{sec}$.의 인장속도에서 구한 응력-변형도 곡선을 준정적 응력-변형도 곡선으로 가정하였는데, 본 연구의 결과와 비교하여 보면 같은 유효 변형도에서 볼 때 응력이 5~10% 정도의 차이가 있다. 이 차이를 볼 때 $1\mu\text{e}/\text{sec}$.의 아주 느린 인장속도의 경우에서도 점소성의 영향이 크게 존재한다고 의미할 수 있다.

그림 5는 각 비깅축 시편의 데이터들이 어느정도 분산폭을 가지고 하나의 직선군으로 표현될 수 있음을 볼 수 있다. 이 직선군의 형성은 과응력 점소성 모델의 특성값 K와 m으로 특성화 될 수 있음을 표시한다. 지수함수의 관계식(24)를 로그를 취하여 선형 곡선 맞춤(curve-fitting)을 하여 K와 m을 구한 결과가 그림 5에 표현되어 있다. 과응력의 크기가 참고문헌[9]와 [10] 보다 크게 나타난 이유는 준정적 응력-변형도의 가정이 다른데서 기인되었다고 볼 수 있다.

단계별 인장속도 시험방법을 이용하여 구한 점소성 특성계수를 식(31)에 대입하여 수채해석적으로 분석하면 각기 다른 인장속도에 대한 응력-변형도 곡선을 예측할 수 있다. 그림 6-a, b, c는 $1.0\mu\text{e}/\text{sec}$. 인장속도의 아주 느린 변형속도와 $1000\mu\text{e}/\text{sec}$. 변형속도의 비교적 빠른 인장속도에 대하여 실험결과와 예측결과를 비교한 그림이다. 비선형 변형에 대한 예측의 오차가 일반적으로 큰 점을

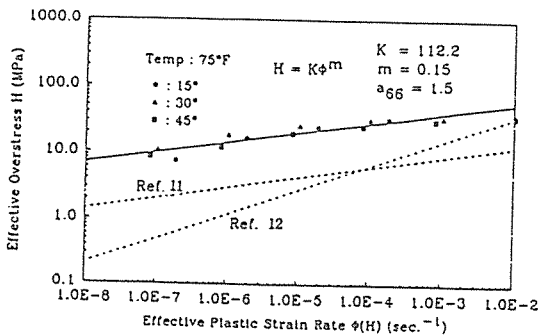


Fig. 5. Effective overstress vs. effective plastic strain rate relationship.

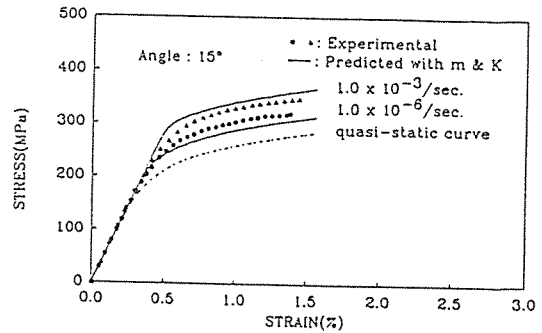


Fig. 6-a. Measured data and predicted stress-strain curves of 15° off-axis specimen.

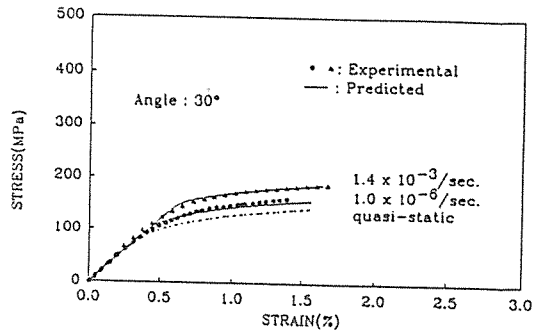


Fig. 6-b. Measured data and predicted stress-strain curves of 30° off-axis specimen.

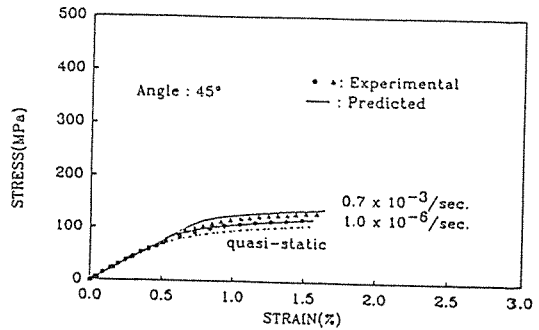


Fig. 6-c. Measured data and predicted stress-strain curves of 45° off-axis specimen.

고려하면 예측결과가 비교적 실험치에 접근하는 것을 볼 수 있다.

또한 응력이완의 경우에 점소성 특성값을 이용한 모델의 예측정도를 검증하기 위하여 30° 비깅축 시편을 $1000\mu\text{e}/\text{sec}$.의 일정한 인장속도로 변형시키다가 점소성 영역에서 충변형도를 일정하게 고정시키고 이완시험을 하면서 시간이 지남에 따라서

응력이 이완되는 현상을 실험적으로 관찰하였다. 이 결과를 그림 7에서 이방성 과응력 소성모델을 이용한 예측결과와 비교하였다. 응력의 이완정도를 보면 초기에는 두 결과가 비교적 일치하고 있으나, 시간이 지남에 따라 실험치가 예측치 보다 크게 나타나는데, 그 이유는 점소성 특성계수에 인장구간에서 구한 과응력을 이용했기 때문인 것으로 판단된다.

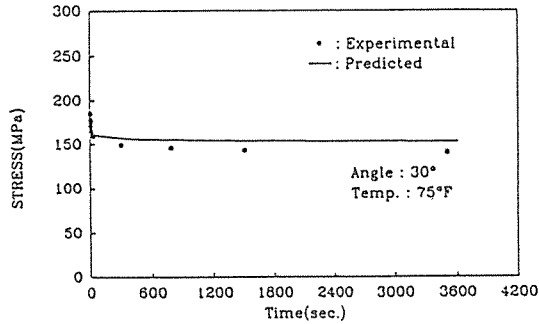


Fig. 7. Measured data and predicted stress-time relation curve.

비깃축 시편에서 구한 점소성 특성계수들에 대한 검증의 타당성을 높이기 위하여 $[\pm 45]_{3S}$ 적층판 인장시편에 대하여 $1.0\mu\epsilon/\text{sec}$. 인장속도의 아주 느린 변형속도와 $1000\mu\epsilon/\text{sec}$. 변형속도의 비교적 빠른 인장속도로부터 구한 응력-변형도 곡선을 예측치와

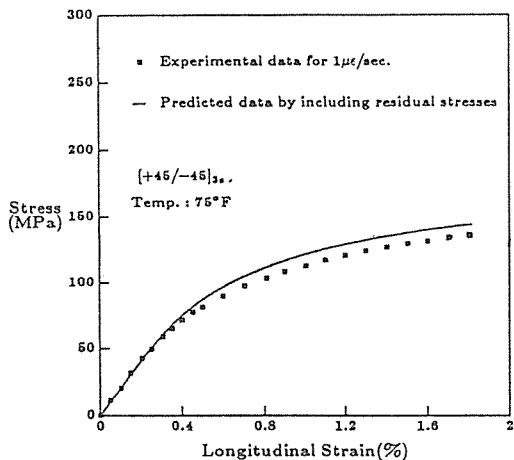


Fig. 8-a. Stress-strain relationships for $[\pm 45]_{3S}$ specimens for $1.0\mu\epsilon/\text{sec}$. strain rate.

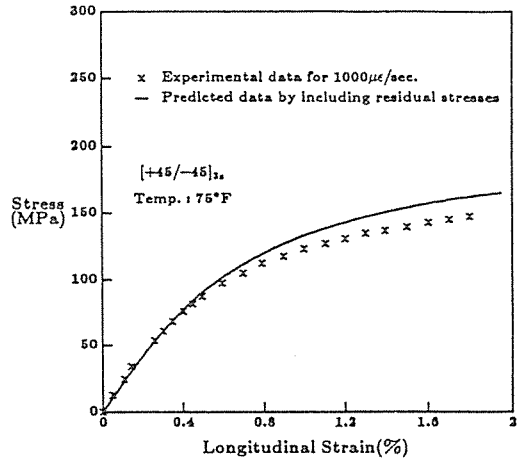


Fig. 8-b. Stress-strain relationships for $[\pm 45]_{3S}$ specimens for $1000\mu\epsilon/\text{sec}$. strain rate.

비교하여 보았다. 인장속도 변화에 따른 적층판의 응력-변형도 곡선을 예측하기 위하여 참고문헌 [13]의 점소성 적층판 이론에 본 논문에서 구한 점소성 특성 계수를 적용하였다. 그림 8-a, b에 비교된 응력-변형도 곡선의 실험 데이터와 예측치를 보면, 약 10% 오차범위 내에서 근접하고 있는 경향을 볼 수 있다.

4. 결 론

(1) 인장 시편에 인장계(extensometer)를 부착한 스트레인 제어방법을 택하여 단계별 인장속도 및 응력이완 시험을 수행하여 일방향 보강 탄소/피크 비깃축 시편의 점탄소성 변형 거동을 정확하게 관찰할 수 있었다.

(2) 탄소/피크 인장시편을 이용하여 단계별 속도에 대한 인장시험후의 응력이완 시험방법으로 $1\mu\epsilon/\text{sec}$. 인장속도 이하에서의 준정적 응력-변형도 곡선을 구할 수 있었다.

(3) 이 준정적 응력-변형도 곡선을 기준으로 한 과응력 점소성 모델을 이용하여 $1000\mu\epsilon/\text{sec}$.의 빠른 인장속도까지의 응력-변형도 곡선의 변화를 예측할 수 있다. 또한 이 모델을 이용하여 시간의 경과에 대한 일방향 섬유 보강 탄소/피크 복합재료의 응력이완 정도도 일정한 오차 범위 내에서 예측할 수

있었다.

후 기

이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과(과제번호 923-0900-016-2)이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Dan Jumbo, E.A., Harbert, B.C. and Schapery, R.A., "Constant Rate, Creep Behavior and the Analysis of Thermoplastic Composite Laminates," *9th Symposium on Composite Materials: Testing and Design*, April 27-29(1988).
2. Malvern, L.E., "The Propagation of Longitudinal Waves of Plastic Deformation in a Bar of Material Exhibiting a Strain-Rate Effect," *ASME J. Applied Mechanics*, 18 : 203-208(1951).
3. Cristescu, N. and Suliciu, L, *Viscoplasticity*, Martinus Nijhoff Publisher, Hague/Boston/London(1982).
4. Eisenberg, M.A. and Yen, C.F., "A Theory of Multiaxial Anisotropic Viscoplasticity," *ASME J. Applied Mechanics*, 48 : 276-284(June 1981).
5. Eisenberg, M.A. and Yen, C.F., "The Anisotropic Deformation of Yield Surfaces," American Society of Mechanical Engineers, Winter Meeting, New Orleans, Louisiana, December 9-14(1984).
6. Yen, C.F., Wang, K.F. and Hsiao, W.C., "An Experimental Study of the Uniaxial Rate-Dependent Behavior of Type 304 Stainless Steel at Room Temperature," CML 86-5 Research Report, School of Aeronautics and Astronautics, Purdue University(1986).
7. Bonder, S.R. and Partom, Y., "Constitutive Equations for Elastic-Viscoplastic Strain-Hardening Materials," *J. Applied Mechanics*, pp.385-389(June 1975).
8. Sun, C.T. and Chen, J.L., "A Simple Flow rule for Characterizing Nonlinear Behavior of Fiber Composites," *J. Composite Materials*, 23 : 1009-1020(1989).
9. Gates, T.S. and Sun, C.T., "An Elastic/Viscoplastic Constitutive Theory for Fiber Reinforced Thermoplastic Composites," AIAA Spring Conference, Mobile, Alabama, April 3-5(1989).
10. Yoon, K.J. and Sun, C.T., "Characterization of Elastic-Viscoplastic Properties of AS4/PEEK Thermoplastic Composite," *J. Composite Materials*, 25 : 1277-1296(1991).
11. Sun, C.T. and Yoon, K.J., "Characterization of Elastic-Plastic Behavior of AS4/PEEK Thermoplastic Composite for Temperature Variation," *J. Composite Materials*, 25 : 1297-1313(1991).
12. Sun, C.T. and Yoon, K.J., "Elastic-Plastic analysis of AS4/PEEK Composite Laminate Using a One-Parameter Plasticity Model", *J. Composite Materials*, 26 : 293-308(1992).
13. Yoon, K.J., "Characterization of Elastic-Plastic and Viscoplastic Behavior of AS4/PEEK Thermoplastic Composite," Ph.D. Thesis, School of Aeronautics & Astronautics, Purdue University, 1990.