

열가소성 복합재료의 응력완화 모델링

김위대1* (부산대 항공우주공학과)

Modeling the Relaxation Behavior of a Polymeric Composite

Wiedae Kim

KEY WORDS : AS4/PEEK, Relaxation, Effective stress, Unloading, Viscoplastic

ABSTRACT

Polymeric composites exhibit highly nonlinear and rate dependent behavior during loading and unloading in off-axis directions. The equilibrium state of stress during loading is lower than the state of stress produced at finite strain rates. The amount of stress relaxation during loading decreases. Interestingly, however, the stress goes up to reach to the equilibrium state of stress for a fixed displacement during unloading. The unloading behavior is quite similar to the loading behavior. The stress relaxation patterns during loading and unloading is also similar, and those depend on the fiber orientation angles and the loading and unloading rates. The AS4/PEEK thermoplastic composite is used to characterize the relaxation behavior for different off-axis angles and loading rates. There exists a transient loading region at the beginning of unloading. The effective stress and effective plastic strain concept is used to establish a master curve of stress recovery pattern for different off-axis angles and unloading rates.

1. 서론

일반적으로 열가소성 복합재료는 하중과 제하시 비선형 거동을 보이며, 하중속도에 따라 다른 거동을 나타내므로, 재료의 거동을 모사하거나 모델을 개발하는 것이 큰 관심사가 되고 있다. 복합재료는 방향성을 가지므로 방향성의 효과와 하중속도에 따른 모델개발에 축적이 모아지고 있다. 지금까지 다양한 종류의 복합재료에 대한 거동예측모델이 많이 개발되어 왔는데, 이들 연구의 대부분은 하중 및 제하시의 구성방정식 정식화나 크립, 응력완화등의 문제에 관심이 집

중되었다. 그러나 제하시의 거동에 대해서는 상대적으로 그리 많은 연구가 이루어지고 있지는 않은 실정이다.

열가소성 복합재료는 열경화성 복합재료에 비해 비선형성이 강하고, 재료자체의 점성효과가 크기 때문에 하중속도에 따라 거동이 다르게 나타난다. 잘 알려진 바와 같이 하중시 부가되는 변위를 고정시키면 점성에 의해 응력완화가 발생하고, 응력은 감소한다. 그러나 제하시에는 흥미롭게도 반대의 현상이 발생한다. 즉, 제하시에 변위를 고정시키면 응력이 오히려 증가하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 Zhu와 Sun[1]에 의

해 IM7/5260 복합재료의 제하시험중 관찰되었고, Krempf과 Bordonaro[2]에 의해 PEEK와 PEI라는 순수 폴리머수지의 시험에서도 관찰되었다. 연구자 역시 AS4/PEEK에 대해 동일한 현상을 관찰하고 이 연구를 시작하게 되었다[3]. 따라서 본 연구에서는 이러한 현상에 대한 근본 원인을 규명하고, 섬유 방향에 따른 하중시 응력완화와 제하시 응력회복을 실험적으로 비교하고, 유효응력의 개념을 도입하여 거동을 모델링하고자 한다.

유효응력의 개념은 Sun과 Chen[4]에 의해 복합재료의 점소성 거동을 예측하기 위해 1개변수 모델로 제안되었으며, 간단성과 편리성, 그리고 정확성으로 인해 많이 응용되고 있다. Gates와 Sun[5]은 열가소성 수지의 거동예측 모델에 이를 사용하였으며, Yoon과 Sun[6]은 AS4/PEEK재료에 대한 온도특성 규명시에 본 개념을 이용하였다. Chung[7]등은 열가소성 복합재료의 크립특성 규명에 응용하였다.

2. 연구 내용

실험은 크게 시편의 준비와 하중 및 제하시험으로 나눌 수 있다. 우선 AS4/PEEK 재료를 8장 한방향으로 적층하여 Autoclave에서 성형한 후 각각 0° 20° 30° 45° 90° 의 방향으로 Waterjet 절단기로 규격을 완성한다. 시편의 크기는 152.4mm × 12.7mm × 1.25 mm 이며, 유리 섬유 복합재료를 25.4mm 의 길이로 절단하여 탭을 붙인다. 접착제로는 상온 24시간 경화 에폭시를 사용한다. 인장시험은 인스트론사의 8500재료시험기를 사용하며, 변형률 속도를 조절하여 자료를 획득한다.

위의 방법을 통해 얻어진 실험 결과는 다음의 일변수모델을 통해 모델링 되어진다. 미소변형의 경우 변형률은

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^c \quad (1)$$

와같이 쓸 수 있고, 포텐셜함수는

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

와 같다. 소성변형률과 포텐셜 함수의 다음 관계를 이용할 수 있다.

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda$$

$$\begin{Bmatrix} d\epsilon_{11}^p \\ d\epsilon_{22}^p \\ d\gamma_{12}^p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_{22} \\ 2a_{66}\sigma_{12} \end{Bmatrix} d\lambda \quad (3)$$

주응력방향을 1,2라 하면

$$\sigma_{11} = \cos^2\theta \sigma_x \quad (4-1)$$

$$\sigma_{22} = \sin^2\theta \sigma_x \quad (4-2)$$

$$\sigma_{12} = -\sin\theta \cos\theta \sigma_x \quad (4-3)$$

유효응력은

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3f} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_{22}^2 + 2a_{66}\sigma_{12}^2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\sigma} = h(\theta) \sigma_x \quad (6)$$

마찬가지로 유효소성변형률은

$$\bar{\epsilon}^p = \epsilon_x^p / h(\theta) \quad (7)$$

로 표시되어 유효응력과 유효소성변형률의 개념으로 응력완화를 모델링 한다.

3. 결론

본 연구에서는 열가소성 복합재료의 일종인 AS4/PEEK 복합재를 이용하여 응력완화에 관한 실험을 수행하고 이를 모델링하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유효응력과 유효소성변형률의 개념을 이용하여 적층각에 따른 대표곡선을 얻음으로써 임의 각도를 갖는 시편에 대한 거동예측

이 가능해 졌다.

(2) 동일한 개념으로 각기다른 변형속도에 대해서도 대표곡선을 얻을 수 있었으며, 이를 통해 임의 변형속도에 대한 응력완화 거동을 예측할 수 있었다.

(3) 하중과 제하시 동적평형경로는 하중시 가 약간 높은 듯 나타났으나 근본적으로는 동일한 현상으로 파악되고, 이들 경로 역시 유효응력의 개념으로 하나의 대표곡선으로 귀착됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1]Zhu,C. and C.T.Sun, " A viscoplasticity model for characterizing loading and unloading behavior of polymer composites," International Journal of Solids and Structures. 1995
- [2]Krempf,E. and C.M.Bordonaro, " A state variable model for high strength polymers,"Polymer Engineering and Science, Vol. 35,No.4,310-316. 1995
- [3]Sun,C.T. and W.D.Kim, " Stress relaxation and stress recovery of polymeric composite under loading and unloading," 13th USA Applied Mechanics Conference, Florida, 1998
- [4]Sun,C.T. and J.L.Chen," A simple flow rule for characterizing nonlinear behavior of fiber composites,"Journal of Composite Materials, 23, 1009-1020. 1989
- [5]Gates,T.S. and C.T.Sun, " Elastic / viscoplastic constitutive model for fiber reinforced thermoplastic composites," AIAA Journal, 29,457-463. 1991
- [6]Yoon,K.J and C.T.Sun,"Characterization of elastic-viscoplastic properties of an

AS4/PEEK thermoplastic composite, "Journal of Composite Materials, 25,1277-1298. 1991

- [7]Chung,I.S.,C.T.Sun, and I.Y. Chang, Modeling creep in thermoplastic composites," Journal of Composite Materials, Vol.27,No. 10, 1009-1029. 1993

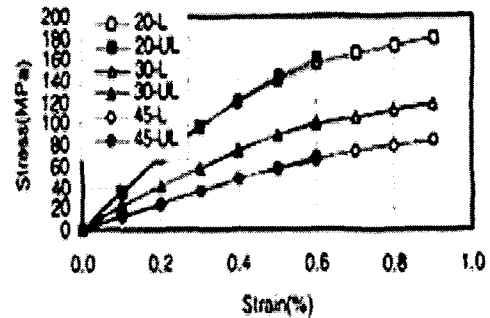


Fig. 1 Comparison of equilibrium curves during loading and unloading.

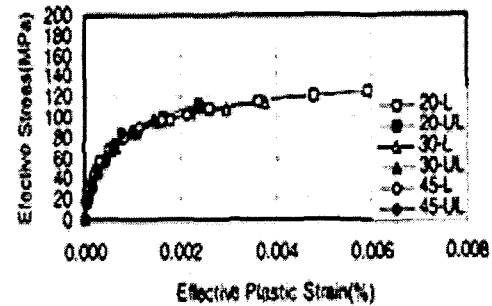


Fig. 2 Equilibrium master curve of loading and unloading by one-parameter model.

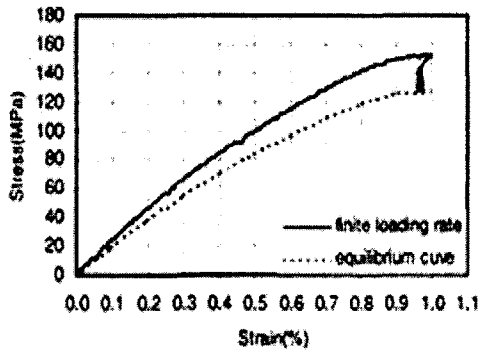


Fig. 3. Transient region at the initial stage of unloading.

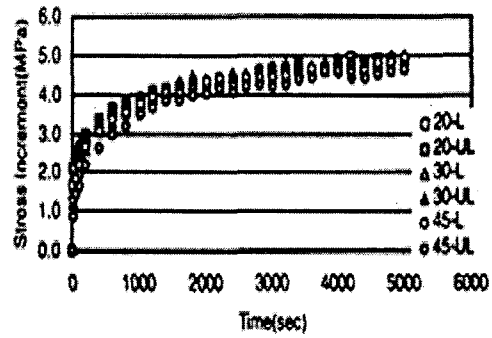


Fig. 6. Relaxation master curve of loading and unloading (loading and unloading rate: 0.01/s).

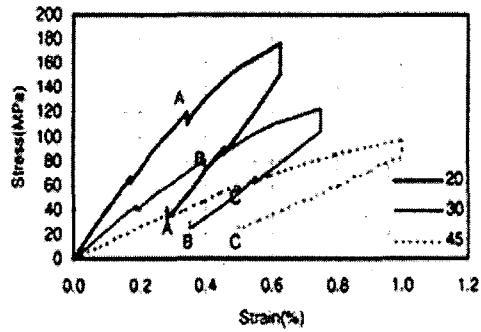


Fig. 4. Stress-strain curves which have the same effective stress and effective plastic strain (loading and unloading rate: 0.01/s).

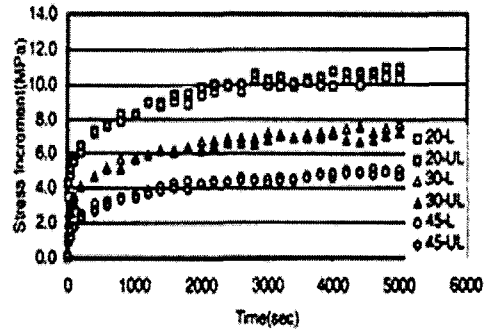


Fig. 7. Comparison of relaxation during loading and unloading for different fiber orientation angles (loading and unloading rate: 0.0001/s).

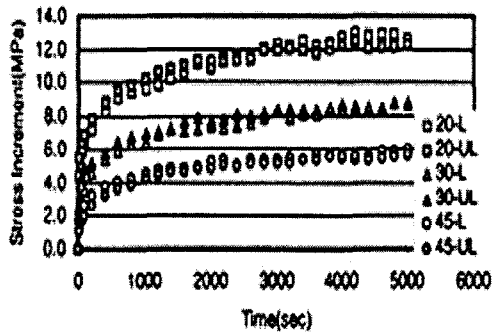


Fig. 5. Comparison of relaxation during loading and unloading for different fiber orientation angles (loading and unloading rate: 0.01/s).

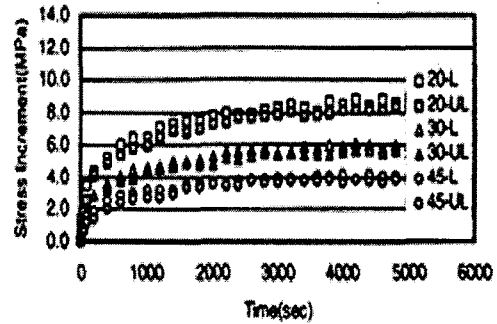


Fig. 8. Comparison of relaxation during loading and unloading for different fiber orientation angles (loading and unloading rate: 0.00001/s).