
하중과 제하시 AS4/PEEK 복합재료의 Relaxation 거동 연구

(Relaxation Behavior of AS4/PEEK Composite under Loading and Unloading)

김위대(부산대학교 항공우주공학과)

전화: (051)-510-2458, E-mail: wdokim@hyowon.pusan.ac.kr

1. 서론

복합재료는 그간 많은 분야에 응용되어 그 잠재적 이용가능성을 한층 배가시키고 있다. 잘 알려진 바와 같이 중량대 강성이나 강도의 우수성, 그리고 낮은 열팽창 특성으로 그 응용범위가 확대되고 있다고 하겠다. 그간 열경화성 복합재료의 거동에 대한 물성실험이나 모델링등은 매우 다각도로 이루어져 많은 정보가 축적된 상태이고, 실제 구조물에 사용되기에 무리가 없다고 보여진다. 그러나 열가소성 복합재료에 대한 연구는 상대적으로 적은 편이며, 복잡한 거동을 보이기 때문에 아직 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

일반적으로 열가소성 복합재료는 하중과 제하(loading and unloading)시 비선형 거동을 보이며, 하중속도(loading rate)에 따라 다른 거동을 나타내므로, 재료의 거동을 모사하거나 모델을 개발하는 것이 큰 관심사가 되고 있다. 복합재료는 방향성을 가지므로 방향성의 효과와 하중속도에 따른 모델개발에 촉각이 모아지고 있다. 지금까지 다양한 종류의 복합재료에 대한 거동예측모델이 많이 개발되어 왔는데, 이들 연구의 대부분은 하중 및 제하시의 구성방정식 정식화(constitutive modeling)나 크립(creep), 응력완화(stress relaxation)등의 문제에 관심이 집중되었다. 그러나 제하(unloading)시의 거동에 대해서는 상대적으로 그리 많은 연구가 이루어지고 있지는 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제하시의 거동에 관심을 두기로 한다.

열가소성 복합재료는 열경화성 복합재료에 비해 비선형성이 강하고, 재료자체의 점성(viscosity)효과가 크기 때문에 하중속도에 따라 거동이 다르게 나타난다. 잘 알려진 바와 같이 하중시 부가되는 변위를 고정시키면 점성에 의해 응력완화(relaxation)가 발생하고, 응력은 감소한다. 그러나 제하시에는 흥미롭게도 반대의 현상이 발생한다. 즉, 제하시에 변위를 고정시키면 응력이 오히려 증가하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 Zhu와 Sun[1]에 의해 IM7/5260 복합재료의 제하시험중 관찰되었고, Krempl과 Bordonaro[2]에 의해 PEEK와 PEI라는 순수 폴리머수지의 시험에서도 관찰 되었다. 그러나 이들 모두 제하시 응력증가현상에 대한 명확한 설명을 하지 못했다. 연구자 역시 AS4/PEEK에 대해 동일한 현상을 관찰하고 이 연구를 시작하게 되었다[3]. 따라서 본 연구에서는 이러한 현상에 대한 근본 원인을 규명하고, 섬유방향에 따른 하중시 응력완화와 제하시 응력회복(stress recovery)을 실험적으로 비교하고, 유효응력(effective stress)의 개념을 도입하여 거동을 모델링하고자 한다.

유효응력의 개념은 Sun과 Chen[4]에 의해 복합재료의 점소성 거동을 예측하기위해 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 응용하였고, Weeks[8]은 두꺼운 복합재료 평판의 비선형 변형률효과 모델링시 사용하였다. 그리고 Thiruppukuzhi와 Sun[9]은 높은 변형률을 갖는 경우에 대해 적용하였다.

2. 연구 내용

2.1 실험 방법

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 Waterjet절단기로 규격을 완성한다. 시편의 크기는 $152.4\text{mm} \times 12.7\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ 이며, 유리섬유 복합재료를 25.4mm 의 길이로 절단하여 탭을 붙인다. 접착제로는 상온 24시간 경화 에폭시를 사용한다. 인장시험은 인스트론사의 8500재료시험기를 사용하며, 변형을 속도를 조절하여 자료를 획득한다. 이때 사용된 자료 획득 S/W는 LabVIEW이다. 각각 섬유 방향이 다른 시편에 대해 변형률 속도를 $0.00001/s$ $0.0001/s$ $0.001/s$ $0.01/s$ 로 바꿔가며 실험을 수행한다. 응력완화를 살피기 위해 하중 및 제하시에 변위를 고정시키고 응력의 변화를 기록한다.

2.2 실험 결과

AS4/PEEK 재료를 사용한 하중과 제하시 응력과 변형을 관계는 Fig.1에 나타나 있다. 이는 30° 시편이며 하중 및 제하시의 변형률 속도는 $0.0001/s$ 인 경우이다. 이때 변위가 고정된 시간은 100초동안이다. 20° 및 45° 의 경우도 유사한 경향을 보인다. 우선 이 그림에서 보듯이 거동이 매우 비선형적임을 알 수 있다. 하중시 응력완화는 응력이 감소하는 방향으로 진행되고 있지만, 제하시에는 변위 고정시 응력이 상승하고 있음을 알 수 있다. 이는 첫째, 정적평형경로 (static equilibrium path)가 존재함을 의미하며, 하중속도가 매우 느려 거의 준정적 상태로 하중이 가해지게 되면 응력완화와 회복정도는 거의 없어지게 된다. 둘째, 하중시의 정적평형경로는 유한한 변형률 속도 때의 동적평형경로 (dynamic equilibrium path)보다 낮으나, 제하시에는 정적평형경로가 높아진다. 물론 응력완화 및 회복의 양은 변형률 속도와 관계가 있다. 변형률 속도가 커지면 이들의 양도 증가하게 된다. 이러한 양상은 과도응력 개념 (over stress concept)으로 설명 가능하다. 즉 하중 속도와 관련하여 응력의 증가 감소분이 변하는 것은 재료의 점성 감쇄 효과와 밀접한 관계가 있다. 점성 재질의 경우 하중시 하중속도가 빨라지면 저항력이 커져서 순간적으로 과도하중이 걸리게 되고, 실제 재질이 이러한 하중을 견디고 있지만, 변위를 고정시키면 시간이 지남에 따라 저항력이 감소하게 된다. 따라서 오랜시간이 흐르면 과도하중상태는 정적평형경로에 근접하게 된다. 반대로 제하시에는 저항력의 방향이 재질의 수축방향과 반대이므로, 오히려 저항력이 가해지고 있는 하중을 도와주는 역할을 하게 된다. 이 때 변위를 고정시키면 변위를 유지하기위해 하중이 증가해야 한다. 왜냐하면 저항력이 시간에 따라 사라지기 때문이다. 이러한 현상은 저항력이 재질의 운동방향과 항상 반대라는 사실로 설명 가능하다.

그림에서 보듯이 하중곡선과 제하곡선은 반대칭의 형태를 갖고 있으며, 이는 다시말해 하중곡선 말기에 충분한 응력완화가 이루어지면 제하곡선은 하중곡선과 동일한 양상으로 진행된다고 볼 수 있다. 따라서 하중곡선과 제하곡선은 근본적으로 물리적 현상이 동일하다고 할 수 있다.

Fig.2에는 20° , 30° , 40° 시편에 대해 50% 변위위치에서의 응력완화량과 응력회복량을 비교하였다. 증감의 경향은 하중과 제하시 거의 동일함을 알 수 있으며, 이는 앞의 설명을 뒷받침한다 하겠다. 각도에 따른 응력변화를 살펴볼 때 복합재료의 거동이 적절한 변환을 통해 하나의 대표곡선(master curve)으로 귀착될 가능성을 보이고 있다.

따라서 유효응력의 개념을 사용하여 시간에 따른 유효응력을 그려보면 Fig.3 과 같이 각기 다른 각도의 결과가 하나의 대표곡선으로 귀착됨을 알 수 있다. 다시말해 이 대표곡선을 역으로 변환하면 임의의 각도에 대한 하중제하시의 응력증감을 예측할 수 있게 되는 것이다.

3. 결론

AS4/PEEK의 하중-제하시의 응력완화 및 응력회복 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 하중시 정적평형경로는 동적평형경로보다 낮으며, 제하시 정적평형경로는 동적평형경로보다 보다 높다.
- 제하곡선은 하중곡선과 근본적으로 동일하다고 볼 수 있고, 제하시 응력회복, 양상은 재료의 점성에 기인한다고 할 수 있다.
- 하중곡선의 말기에서는 천이영역이 존재하며 이는 과도응력의 개념이 유효함을 보여준다.
- 유효응력의 개념을 이용하면 다른 각도의 시편에 대해 하나의 대표곡선을 얻을 수 있고, 역으로 임의 각도에 대한 거동 예측을 할 수 있다.

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
- [8]Weeks,C.A>,"Nonlinear rate dependent response of thick-section composite laminates,"Ph.D Dissertation, Purdue University. 1995
- [9]Thiruppukuzhi,S.V. and C.T.Sun, "High strain rate characterization of unidirectional fiber and woven glass composites," Proceedings of The American Society for Composites,201-210. 1996

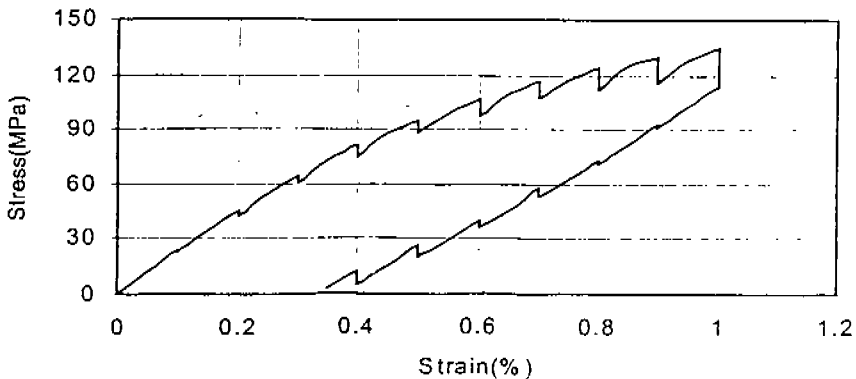


Fig.1. Stress strain curve of 30° AS4/PEEK specimen with stress relaxation and stress recovery (loading and unloading strain rate=0.0001/s, relaxation and recovery time=100seconds)

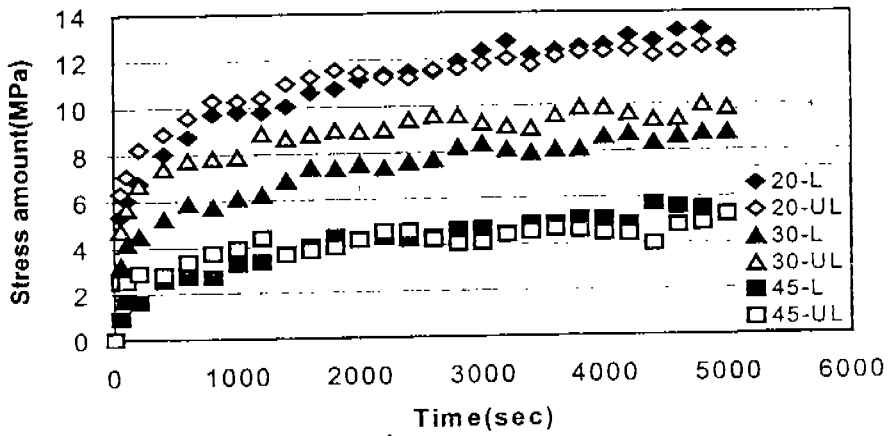


Fig.2. Comparison of the amount of stress relaxation and stress recovery for different off-axis angles (loading and unloading strain rate=0.01/s, compared at 50% loading and unloading strain : L=loading, UL=unloading)

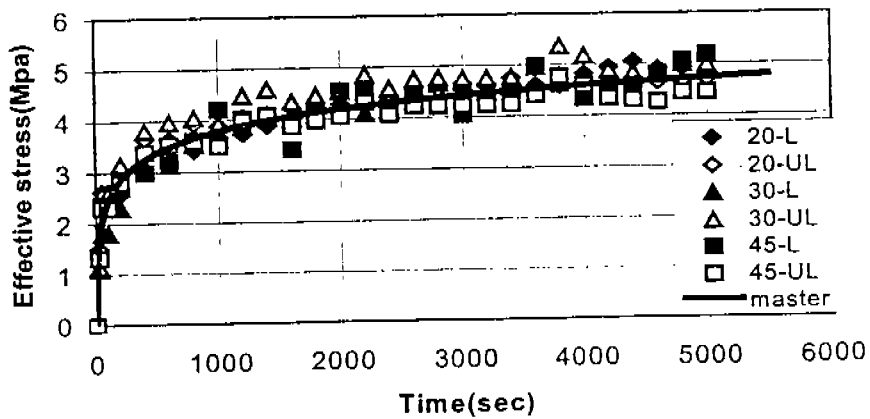


Fig.3. A master curve for different off-axis angles (loading and unloading strain rate=0.01/s, compared at 50% loading and unloading strain : L=loading, UL=unloading)