

입자강화 복합재료의 크리프거동에 관한 연구

A study on the creep behavior of particulate composites

양 범 주* · 김 봉 래** · 이 행 기***

Yang, Beom-Joo · Kim, Bong-Rae · Lee, Haeng-Ki

요 약

본 논문에서는 점탄성 매트릭스와 탄성 강화입자로 구성된 복합재료의 크리프 거동예측을 미세역학 기반의 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 에폭시-고분자로 이루어진 복합재료의 경우 재료 특성상 탄성적 거동뿐 아니라 점성적 거동도 함께 발생하게 된다. 이렇듯 점탄성 거동을 보이는 재료의 경우 탄성만을 고려한 해석방법으로는 한계가 있으며 점성적인 특성 또한 고려되어야 한다. 점탄성 복합재료의 해석을 위해서 손상을 고려한 미세역학 기반의 해석 (Ju and Chen, 1994) 과 Mesquita and Coda (2002)의 근사식을 사용하였다. 이를 통해 구한 재료 물성은 복합재료의 크리프 거동예측을 위한 Kelvin-Voight (KV) 모델과 Standard Linear Solid (SLS) 모델에 적용되었다. 최종적으로 본 연구에서 제안한 손상을 고려한 점탄성 모델의 예측과 시험결과를 비교 수행하여 결과의 타당성을 검증하였다.

keywords : 점탄성 모델, 입자강화 복합재료, 크리프 거동, 미세역학, 재료 손상

1. 서 론

지난 수십 년에 걸쳐 재료의 점탄성 특성에 대한 연구가 다양하게 수행되어져 왔다 (Schapery, 1969; Haj-Ali and Muliana, 2003). 일반적으로 점탄성이란 하중이 가해졌을 때 액체로서의 성질과 고체로서의 성질이 동시에 나타나는 현상을 말하며, 이러한 현상을 동시에 지닌 재료를 점탄성 재료로 정의할 수 있다 (McCrum et al., 1997). 흔히 점탄성 재료의 거동해석을 위하여 재료는 에너지 축적 혹은 탄성을 의미하는 스프링과 에너지 소산 및 점성을 의미하는 댐퍼의 조합으로 표현될 수 있다. 점탄성에 대한 대표적인 거동으로는 크리프 현상 및 응력완화 등을 들 수 있으며, 앞서 언급한 두 가지 성분의 조합을 통해 다양한 점탄성 거동의 해석을 수행할 수 있다 (Lakes, 2009). 스프링과 댐퍼의 물리적인 조합을 통해 나타낼 수 있는 모델로는 Maxwell 모델, Kelvin-Voight (KV) 모델, 그리고 Standard Linear Solid (SLS) 모델 등이 있다. 이러한 모델들은 점탄성 재료의 예측을 위한 다양한 연구에 활용되었으며 실험결과와의 비교에서 좋은 결과를 보여 주었다 (Mesquita and Coda, 2002; Stankovic and Atanackovic, 2002; Yuan et al., 2006; Mahmoodi et al., 2007).

본 연구에서는 폴리머-고무와 같이 점탄성 특징을 가진 매트릭스와 탄성의 강화입자로 이루어진 복합재료의 예측을 위하여 손상을 고려한 미세역학 기반의 해석이 수행되었다 (Ju and Chen, 1994; Ju and Lee, 2000). 또한 매트릭스의 점성적 성질을 나타내기 위해서 Mesquita and Coda (2002)의 근사식을 적용하였다.

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 bumjoo@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사 후 과정 bong-ida@kaist.ac.kr

*** 정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 leeh@kaist.ac.kr

도출된 재료의 전체적인 탄성 및 점성 특성은 KV 모델과 SLS 모델에 적용되어 복합재료의 크리프 현상에 대해 예측을 수행하였다. 최종적으로 지속하중에 따른 점탄성 재료의 크리프 현상에 관한 해석을 수행하였으며, 이의 결과를 Aniskevich와 Hristova에 의해 수행된 시험결과 (Aniskevich and Hristova, 2000)와 비교하여 제안모델에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 미세역학 기반의 점탄성 복합재료 모델

미세역학 기반의 손상을 고려한 탄성구성모델 (Ju and Lee, 2000; Lee, 2001)과 근사적 점성예측방법 (Mesquita and Coda, 2002)을 적용하여 복합재료의 전체적인 탄성 및 점성적 특성을 예측하였다. 이를 통해 알아낸 재료의 전체적인 물성을 KV 모델과 SLS 모델에 적용하여 재료의 크리프 거동을 예측하였다. 그림 1에서 알 수 있듯이 KV 모델은 스프링과 댐퍼를 평행하게 배치한 구조이며 SLS 모델은 KV 모델에 스프링을 추가한 구성이다. KV 모델에서 응력은 스프링과 댐퍼에 동일하게 전달되며 이때 발생하는 총 변형률은 두 성분에서 발생하는 변형률의 합이 된다. SLS 모델 역시 모든 요소에 하중은 동일하게 전달되며 변형률은 각 요소의 변형률의 총합이 된다.

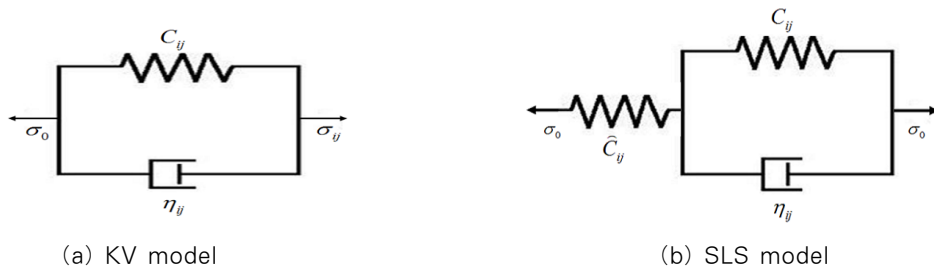


그림 1. KV 모델과 SLS 모델의 개략도

3. 점탄성 복합재료 모델의 시뮬레이션 적용

제안모델에 사용되는 손상 및 점성에 따른 변수별 분석을 위해 파라미터 연구가 수행되었다. 이와 함께, 본 연구를 통한 점탄성 복합재료의 크리프 거동예측의 정확성을 알아보기 위해 시뮬레이션 결과와 폴리머 복합체의 실험결과를 비교 수행하였다 (Aniskevich and Hristova, 2000). 실험을 통한 점탄성 복합재료의 시간-변형률곡선과 KV, SLS 모델을 통한 예측 결과 값을 그림 2에 표시하였다. 비교결과 시뮬레이션 결과와 실험결과의 거동이 유사함을 알 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 제안된 모델의 점탄성 복합재료 거동예측에 대한 가능성을 알 수 있었다.

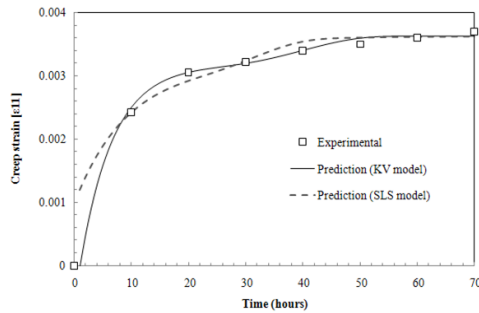


그림 2. 시뮬레이션결과 (KV, SLS 모델)와 실험결과에 따른 시간-변형률 비교곡선

4. 결론

본 논문에서는 점탄성 복합재료의 크리프 거동예측을 위한 미세역학 기반 모델을 소개하였다. 복합재료의 전체적인 거동을 알아보기 위해 손상을 고려한 미세역학과 근사적 점성예측방법을 KV 모델과 SLS 모델에 적용하여 수행하였다. 제안한 모델의 타당성을 위한 크리프 실험과 해석결과, 미세역학을 기반으로 한 본 제안식이 점탄성 복합재료의 크리프 거동을 예측하는데 적합함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비지원(08기술혁신D01)과 U-City 석·박사과정 지원 사업을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Aniskevich, K. and Hristova, J. (2000) Creep of polyester resin filled with minerals, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 77, pp. 45-52.
- Haj-Ali, R.M. and Muliana, A.H. (2003) A micromechanical constitutive framework for the nonlinear viscoelastic behavior of pultruded composite materials, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 1037-1057.
- Ju, J.W. and Chen, T.M. (1994) Micromechanics and effective moduli of elastic composites containing randomly dispersed ellipsoidal inhomogeneities, *Acta Mechanica*, Vol. 103, pp. 103-121.
- Ju, J.W. and Lee, H.K. (2000) A micromechanical damage model for effective elastoplastic behavior of ductile matrix composites considering evolutionary complete particle debonding, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 183, pp. 201-222.
- Lakes, R.S. (2009) Viscoelastic solids, *CRC Press*.
- Lee, H.K. (2001) A computational approach to the investigation of impact damage evolution in discontinuously reinforced fiber composites, *Computational Mechanics*, Vol.27,pp.504-512,
- Mahmoodi, S.N., Khadem, S.E., and Kokabi, M. (2007) Alternative Kelvin viscoelastic procedure for finite elements, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 49, pp. 722-732.
- McCrum, N.G., Buckley, C.P. and Bucknall, C.B. (1997) Principles of polymer engineering, *Oxford*

University Press.

- Mesquita, A.D. and Coda, H.B.** (2002) Non-linear free vibrations of Kelvin-Voigt visco-elastic beams, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 26, pp. 501-516.
- Schapery, R.A.** (1969) On the characterization of nonlinear viscoelastic materials, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 9, pp.295-310.
- Stankovic, B. and Atanackovic, T.M.** (2002) Dynamics of a rod made of generalized Kelvin-Voigt visco-elastic material, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 268, pp. 550-563.
- Yuan, C., Peng S., Zhang, Z., and Liu, Z.** (2006) Seismic wave propagating in Kelvin-Voigt homogeneous visco-elastic media, *Science in China Series D: Earth Sciences*, Vol. 49, pp. 196-211.