

삼차원 유한요소법을 이용한 다공성 폴리머 조직의 반복 변형 수치해석 Numerical Calculation of Repeated Deformation on Polymer Foam using Three Dimensional Finite Element Method

*유위경¹, #이영석²

*U. K. Yoo¹, #Y. Lee(ysl@cau.ac.kr)²

¹ 중앙대학교 기계공학부, ² 중앙대학교 기계공학부

Key words : Residual stress, Truncated octahedron , Kelvin model, Polymer, Foam, Cellular solid

1. 서론

폼(foam), 다공성 재료(cellular solid)는 일반적 고체재료(true solid)에 비해 유용한 기계적, 열적 성질 등을 가진다. 즉 다공성 재료는 일반 고체재료에 비해서 낮은 밀도, 낮은 열전도율, 낮은 강성에 큰 압축 변형률을 가지기 때문에 경량재료, 단열재료, 충격흡수제 등 여러 분야에서 활용될 수 있다.[1]

다공성 재료 중 미세 발포기술의 발달에 따라 만들어진 다공성 폴리머 박막은 이러한 응용재료 중 하나이다. 다공성 폴리머 박막은 기공(Dipole)에서 준영구적(Quasi-permanent)으로 분극하는 성질을 지니고, 폴리머 일렉트릿(Polymer Electret)으로 불린다. 이 일렉트릿(Electrets)은 액츄에이터(Actuator)나 센서(Sensor)로 쓰이는 소재이다. 따라서 다공성 폴리머에 관해서는 전기-기계적(Electro-mechanical) 거동에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. 특히 기계적 거동은 대부분의 연구에서 거시적으로 탄성영역에서만 일어나는 것으로 가정된다. 또 폴리머 일렉트릿의 구조모델은 여러 관 형태의 일반 고체재료(True solid)가 적층된 간단한 2차원 구조형태 정도로만 고려되어 연구되고 있다. [2]

그런데 이러한 기계적, 구조적 기본가정은 다공성 폴리머가 센서, 액츄에이터로 쓰일 때 나타나는 반복적 인장압축 거동을 서술하는데 문제가 있다. 다공성 폴리머는 렌즈 모양의 기공을 기본단위로 많은 기공이 내부에 교차적으로 적층된 미세구조로 되어 있다. 반복적 인장압축 거동에서는 이러한 내부 미세구조의 영향에 의해 잔류응력의 생성, 분포가 일반고체재료와 다를 가능성이 많다. 따라서 다공성 폴리머의 반복 인장압축에서의 기계적 거동은 기공 구조체(Cellular solid)의 거동으로 접근되어야 한다.

기공 구조체에 대한 기초적인 기계적 거동은 실험과 이론적 접근방법을 통해 Gibson & Ashby[1]가 기공분율과 관련이 있음을 밝혀냈다. 또 이론적, 수치해석적 연구로도 다양한 연구결과들이 있다. [3, 4] 하지만 다공성 폴리머 박막의 반복적 인장압축 거동에서 미시적 구조가 거시적 거동에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구는 없었다.

본 논문에서는 다공성 폴리머 박막의 반복적 인장압축 거동 시 미시적 구조로 인해 거시적 거동에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해, 우선 다공성 폴리머 박막의 기본이 되는 3차원 기공모델을 제안하였다. 그리고 이 모델을 이용해 기공 구조체를 제작하고, 유한요소해석 방법(Finite Element Method)을 통하여 일반고체재료 모델과 반복적 인장압축에서 거시적 거동을 비교하였다.

2. 다공성 폴리머 기공모델 및 비교모델

본 논문에서 사용한 다공성 폴리머 박막은 Fig. 1의 (a)와 같다. 단면사진을 보면 다공성 폴리머 박막은 렌즈형태의 기공이 교차적으로 적층되어 있는 구조인 것을 알 수 있다. Fig. 1의 (b), (c)는 다공성 폴리머 박막의 기본 기공 1개를 모사하기 위해서 본 논문에서 제안한 모델과 그 단면 형태를 보여준다. Fig. 1의 (d)는 미세구조를 가진 기공모델과 거동을 비교하기 위해 설정된 일반 고체재료 모델이다.

본 논문에서는 Fig. 1 (b), (c)와 같은 기본기공의 형상을

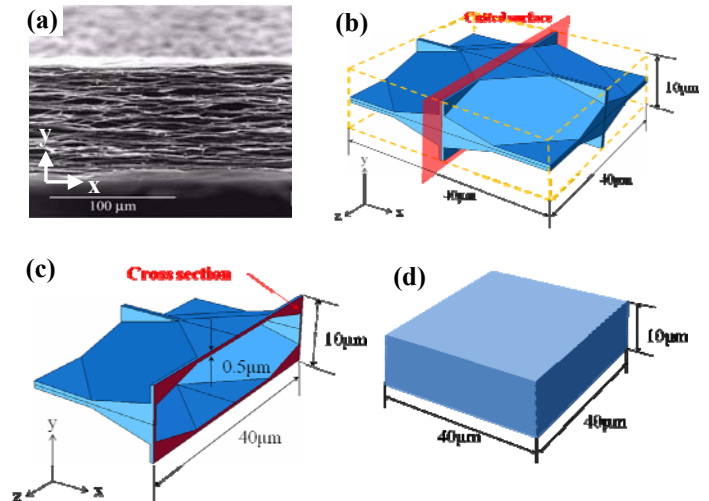


Fig. 1 Polymer foam model and Cross section of polymer electret (a) Cross section of polymer electret(SEM) (b) Stretched truncated octahedron structure model, (c) Cutted half model of (b), (d) True solid model

Table 1 Polypropylene ISO 527 specimen uniaxial tensile test data

E(MPa)	YS(MPa)	YS strain	v	t(μm)
1603	21.0894	0.016	0.4	4000

Table 2 Uniaxial(y-direction) tensile data of stretched truncated octahedron structure(Polypropylene) FEM model

E(MPa)	YS(MPa)	YS strain	v
10.6406	0.1281	0.013	0.4

3차원의 모서리가 제거된 팔면체의 인장된 형상(Stretched Truncated octahedron)으로 제안하였다. 이러한 형상은 다공성 폴리머 박막의 기본 기공형태가 렌즈형태인 것에 부합한다. 또 이 기공이 서로 교차되어 적층된 구조를 가진 것에도 부합한다. 그리고 기공모델과 일반고체 모델은 둘 다 탄성 변형, 소성변형이 모두 고려되었다. 또 두 모델 모두 등방성 소성변형(Isotropic hardening)을 하는 것으로 가정되었다.

기공모델에 입력된 물성은 ISO 527 시편[5]을 사용한 폴리프로필렌(Polypropylene)의 일축인장시험 데이터를 이용하였다. 인장시험 시 인장속도는 50mm/min을 사용하였다. 인장시험 결과를 요약하면 Table 1과 같다.

비교모델인 일반 고체모델(True solid model)에는 기공모델(Stretched Truncated octahedron model)의 y축 인장해석의 결과를 물성으로 입력하였다. 기공모델의 인장해석 결과를 요약하면 Table 2와 같다.

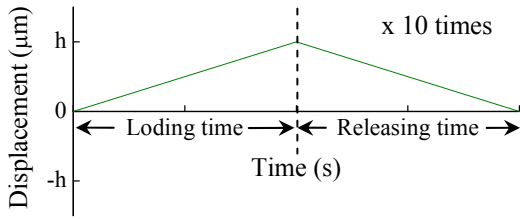


Fig. 2 Amplitude graph of y-direction deformation by time

3. 반복적인 인장, 압축 모사

다공성 폴리머 재료는 액츄에이터나, 센서로 작동 시 Fig. 1의 y 축 방향으로 반복적인 인장, 압축 거동을 한다. 본 논문에서는 이러한 반복적인 인장, 압축 거동을 Fig. 2와 같이 변형률(변위) 제어방법을 통하여 모사하였다. 여기서 최대 변형변위인 h는 1~4μm 범위로 하였다. 그리고 인장시간(Loding time), 압축시간(Release time)은 서로 작동시간은 같되, 변수 h에 따라서 변형률속도(strain rate)가 0.001/s로 일정하도록 적절히 설정하였다. 인장압축의 반복횟수는 10회로 하였다.

반복적인 인장압축에 의한 기공모델과 일반고체모델의 거시적 거동을 비교하기 위해서, y 축 방향의 단축 응력-변형률을 Fig. 1의 (b), (d) 모델에서 각각 뽑아냈다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 렌즈모양의 모서리가 제거된 팔면체의 인장 모델을 이용하여 미세구조를 가진 다공성 폴리머의 다양한 반복적인 인장압축 거동에서 거시적 변화를 계산하였다. 그리고 이러한 거동을 동일 크기의 일반 고체재료 모델에 적용하여 비교하였다. 주요 결과는 Fig. 3~4와 같다.

Fig. 3는 일반 고체재료 모델의 반복적인 인장, 압축을 해석한 결과를 보여준다. Fig.3에서 재료는 처음에는 탄소성 변형을 한다. 그리고 인장, 압축의 반복횟수의 증가에 따라서 소성변형을 하는 변형률 구간이 점점 줄어들고 있다. 그리고 어느 인장압축 횟수를 넘어서면 결국 거의 선형적인 탄성거동을 보인다. 특히 이 때 10회 반복거동(h=4μm) 후 재료에 작용하는 최대 응력이 1회의 인장에서 최대응력의 2배 가까이 증가하는 것을 보여준다.

Fig. 4는 기공 모델의 반복적인 인장, 압축거동 결과이다. 기공모델의 경우에는 Fig. 3의 일반 고체재료 모델과 다르게, 인장압축 거동의 반복에 따라 탄소성 거동이 급격히 탄성거동으로 변하지 않는다. 그리고 인장, 압축 반복횟수에 따라서 점점 증가하는 최대응력의 크기가 고체모델에 비해 그리 크지 않다. 이는 기공모델이 등방성 소성모델로 거동하는 얇은(1μm) 박판으로 이루어진 미세구조 때문이다. 일반고체 모델은 내부에 모든 요소들이 인장, 압축 시 균일하게 3축 응력을 받는다. 따라서 소성변형에 의한 영구변형이 모든 요소들에 균일하게 남아있게 된다. 그런데 기공모델에서는 내부 미세구조물이 박판으로 거의 2축 응력만을 받는다. 그래서 소성 변형 시 기공 모델 내부 구조 중 Fig. 1의 x-y, y-z 평면에 평행한 박판에만 영구변형이 집중된다. 즉, 일반 고체재료에 비해 기공모델에서 영구변형을 하는 요소들이 부피가 상대적으로 적다. 따라서 반복적인 인장, 압축에서 기공모델은 일반 고체재료 모델에 비해 상대적으로 응력-변형률 관계의 변화가 적은 것이다.

본 연구에서 유한요소법을 통하여 얻은 기공모델의 형상에 의한 효과에 대한 앞의 결과에 따라서, 앞으로의 연구에 다음과 같은 사항이 고려되어야 할 것이다. 우선 기공재료의 반복적 인장, 압축에서의 거시적 응력-변형률 거동은 반복횟수에 영향을 덜 받는다. 또 기공재료의 파괴 기준을 설정하기 위해서는 재료의 거시적 변형보다는 집중응력이 걸리는 미시적 변형이 더 적절하다.

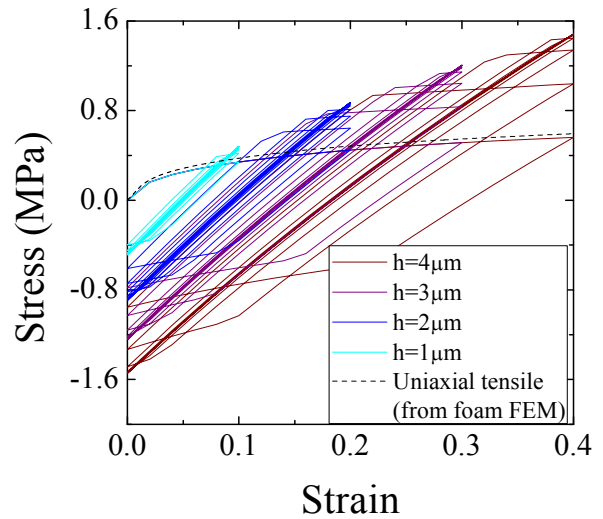


Fig. 3 Stress-strain curve by repeated deformation of isotropic true soild structure

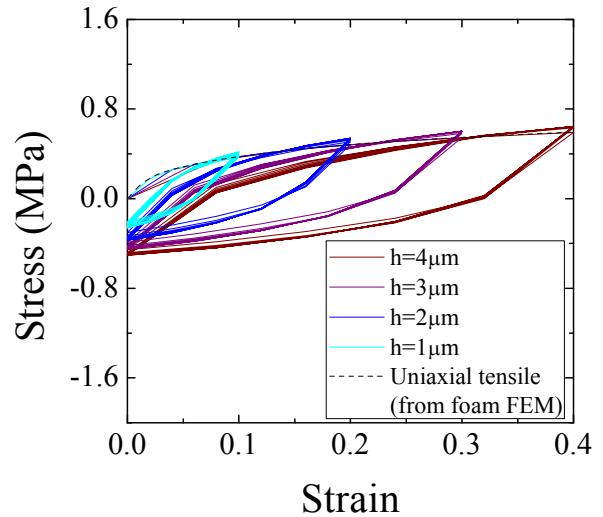


Fig. 4 Stress-strain curve by repeated deformation of stretched truncated octahedron structure

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10358-0(2008))지원으로 수행 되었음.

참고문헌

1. G. M. Sessler, "Electrets", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980.
2. Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby, "Cellular solids : Structure and properties 2nd edition", Cambridge University Press, 1997.
3. W. T. Kim, H. Y. Choi, "Finite Element Modeling of Low Density Polyurethane Foam Material", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineering, Vol. 4, No. 2, 183-188, 1996.
4. Enis Tuncer, "Numerical calculation of effective elastic properties of two cellular structures", Journal of Physics D : Applied Physics, **38**, 497-503, 2005.
5. A. Arriaga, J. M. Lazkano, R. Pagaldai, A. M. Zaldua, R. Hernandez, R. Atxuraa, A. Chrysostomou, "Finite-element analysis of quasi-static characterization tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS", Polymer Testing, **26**, 284-305, 2007.