

모서리가 제거된 팔면체 인장모델을 이용한 다공성 폴리머 박막의 반복변형거동 수치해석

Numerical Analysis of Cyclic Deformation of Polymer Foam Film Using Stretched Truncated Octahedron Model

유위경^{1,✉}, 이영석^{1,✉}
Ui Kyung Yoo¹ and Youngseog Lee^{1,✉}

¹ 중앙대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Chung-ang Univ.)
✉ Corresponding author: ysl@cau.ac.kr, Tel: 02-820-5256

Manuscript received: 2009.6.29 / Revised: 2009.11.19 / Accepted: 2010.1.13

Cyclic deformations of polymer foam film are simulated using the finite element method. Material of polymer foam film is polypropylene (PP). The calculated polymer foam film is micro-scale thin film has cellular structure. The polymer foam film is used in ferro-electret applications. The polymer foam film is idealized to one cell structure as lens shaped stretched truncated octahedron model. Cyclic deformation is performed by uniaxial stretching. Stretching direction is perpendicular to plane of cellular film. Various cyclic strain amplitudes, pore wall thicknesses, pore shape are investigated to find deformation tendency of cellular structure. Consequently, cellular structure has various macroscopic stresses on cyclic deformation with various pore thickness and pore shape.

Key Words: Polymer Foam Film (다공성 폴리머 박막), Bergstrom-Boyce Model (백스트롬-보이스 모델), Stretched Truncated Octahedron Model (모서리가 제거된 팔면체 인장모델), Polymer Electrets (폴리머 일렉트릿)

기호설명

T = Thickness of the polymer foam film
h = height of the pore
w = width of the pore
t = wall thickness of the pore
 μ_A = initial shear modulus
 λ^{lock} = limiting chain stretch
 κ = bulk modulus
s = Stress scaling factor
A = creep parameter
m = effective stress exponent
C = creep strain exponent

$\sigma(\epsilon)$ = Engineering stress at ϵ
 ϵ = Engineering strain
E (2t) = Young's modulus at 2t
E_r = Relative young's modulus
E_s = Young's modulus of solid
D_r = Relative density
P_s = Shape parameter
R_{hw} = Height-width ratio

1. 서론

다공성 폴리머 박막(Polymer foam film)은 전기-기계적(Electro-mechanical)거동을 보이는 다공성 재

료(Foam)이다.¹ 그리고 전기-기계적 거동현상을 보이는 다공성 폴리머 박막은 음향시스템, 의료진단장치, 비파괴 검사장치, 감시장시 시스템 등과 같은 여러 첨단장치에 쓰이는 센서(Sensor)나 액츄에이터(Actuator)의 소재로써 활용될 수 있는 소재이다. 따라서 다공성 폴리머 박막에 대한 제작방법, 응용방법 등의 여러 연구가 많이 진행되고 있다.²⁻⁵

다공성 폴리머 박막의 기계적 거동에 관한 기존의 연구에서는 다공성 폴리머 박막이 탄성거동만 하는 것으로 연구되었다.⁶⁻⁸ 하지만 다공성 폴리머 박막은 센서나 액츄에이터로써 작동 시 기계적으로 반복 변형거동(cyclic deformation)을 한다. 그리고 다공성 폴리머 박막을 이루는 폴리머 재료는 초탄성(Hyperelastic)재료이면서 반복변형에 따라 연화되는 재료이다. 따라서 다공성 폴리머 박막의 변형거동을 탄성거동으로 가정한 기존의 연구는 맞지 않다.

다공성 폴리머 박막은 3 차원 렌즈모양의 기공을 기본단위로 많은 기공이 내부에 적층된 미세구조를 가지고 있다. 하지만 기존 연구에서 다공성 폴리머 박막의 미세구조는 적층된 판 형태^{6,7} 나, 2 차원의 기공구조물의 형태⁸ 등으로 가정되어 연구되었다. 또 다공성 폴리머 박막은 미세구조체가 아닌 기공을 포함하고 초탄성 성질을 가지는 연속체 모델(Continuum model)⁹ 로 연구되기도 하였다. 하지만 다공성 폴리머 박막의 3 차원 미세구조에 따른 기계적 거동현상에 대해서는 연구가 미비하다. 특히 다공성 폴리머 박막의 제조공정에서 조절이 가능한 미세기공의 형태, 크기 등 미세구조에 따른 기계적 반복변형 거동에 대해 연구한 경우는 전무하다. 따라서 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 폴리프로필렌(Polypropylene)로 이루어진 다공성 폴리머 박막의 미세구조가 반복 변형 거동 시 변형거동에 미치는 영향에 대하여 해석적으로 연구하였다. 이를 위해 다공성 폴리머 박막을 연화거동을 보이는 초탄성 3 차원 미세기공모델로 가정하였다. 다공성 폴리머 박막의 3 차원 미세기공모델은 본 연구에서 제안하였다. 연화거동을 보이는 폴리머 재료의 연속체 구성방정식 모델은 벅스트롬 보이스(Bergstrom-Boyce) 모델¹⁰⁻¹² 을 가정하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 다공성 폴리머 박막의 유한요소모델의 반복변형을 해석하였다. 특히 다공성 폴리머 박막 내부의 기공의 두께와 형상에 따른 거시적인 거동변화를 계산하였다. 그리고 이에 따른 다공성 폴리머 박막의 거시적 기계거동현상의 경향을 분석하였다.

2. 다공성 폴리머 박막모델

2.1 미세기공형상모델

Fig. 1 은 다공성 폴리머 박막의 단면 확대 사진이다. Fig. 1 에서와 같이 다공성 폴리머 박막은 납작한 기공이 적층된 형상을 가지고 있다.

Fig. 2(a)는 다공성 폴리머 박막의 구조를 도식화한 그림이다. 본 논문에서 Fig. 2(a)와 같이 다공성 폴리머 박막이 단일 형상과 치수의 기공(Pore)이 적층된 형태로 되어있다고 가정하였다. Fig. 2(b)는 다공성 폴리머 박막을 이루고 있는 기공 1 개의 형상그림이다. 기공의 2 차원 형상을 결정하는 변수는 높이(h), 너비(w), 기공두께(2t)이다.

Table 1 은 Fig. 1 의 다공성 폴리머 박막의 단면 형상에서 Fig. 2 의 형상변수를 측정된 결과이다.

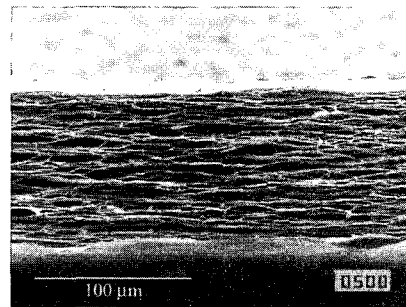


Fig. 1 Cross section of polymer(PP, Polypropylene) electrets, SEM¹³

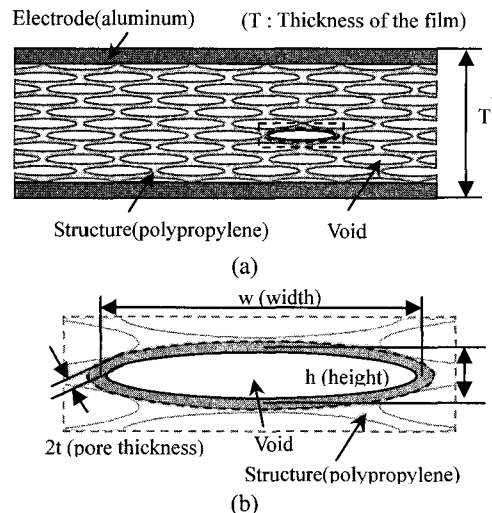


Fig. 2 (a) 2-dimensional schematic of polymer foam film
(b) Pore in the polymer foam film

Table 1 Shape parameter of cellular polymer film and pore in cellular polymer film

Polymer foam film	The pore in polymer foam film		
T(μm)	w(μm)	h(μm)	2t(μm)
100~110	10~60	3~30	0.1~5

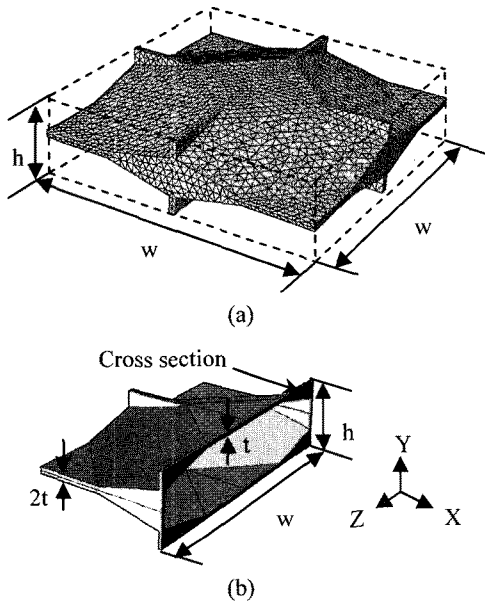


Fig. 3 Stretched truncated octahedron model (a) One pore model (b) Half pore model

다공성 재료에 대한 연구에서 기공형태는 대부분 베르누이(Voronoi), 켈빈(Kelvin),¹⁴ 위어-필란(Weaire-Phelan)¹⁵ 등의 공간분할모델의 기공모델형상이 쓰이고 있다. 본 연구에서는 다공성 폴리머 박막의 내부기공이 단일한 형상으로 균일하게 분포될 수 있는 켈빈모델의 형상을 변형하여 기공형상 모델로 사용하였다. 유한요소해석에서 기공의 형상을 재현하기 위해서 제안된 기공모델은 Fig. 3(a), (b)와 같이 3 차원 형상의 모서리가 제거된 팔면체의 인장(Stretched Truncated octahedron)형상모델이다. Fig. 3(b)는 기공모델의 단면을 보여준다.

유한요소 해석에서 기공의 형상변수는 Table 1의 형상 변수 범위 안에서, 높이(h)-너비(w)가 4-10, 4-20, 4-30, 4-40, 8-40, 12-40 μm 인 형상에 기공두께(2t)로는 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 μm 로 해석하였다.

유한요소 해석 프로그램으로는 상용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.7 을 사용하였다. 요소는 C3D4 를 사용하였다.

2.2 폴리머 재료거동모델

본 연구에서 사용한 연화거동을 보이는 폴리머 재료의 연속체 구정방정식 모델은 ABAQUS 에서 기본적으로 제공하는 벡스트롬-보이스 모델¹⁰⁻¹² 이다. 벡스트롬-보이스 모델은 재료의 미시적인 네트워크 구조의 거동현상을 기본으로 만들어진 재료 모델이다. 따라서 두께가 0.1~5 μm 정도 되는 기공의 적층구조로 이루어진 다공성 폴리머 박막재료의 거동현상을 표현하는데 적절하다. 또 보이스(Boyce)¹⁶의 연구에 따르면 벡스트롬-보이스 모델이 폴리머 재료 중의 하나인 폴리프로필렌의 부하(loading), 완화(releasing)거동을 잘 표현한다고 한다.

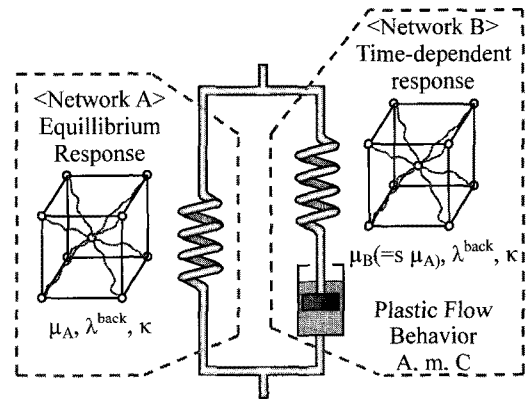


Fig. 4 Schematic diagram of Bergstrom-Boyce model¹⁰⁻¹²

유한요소 해석에서는 벡스트롬-보이스 모델에서 변형률에 따른 재료의 전체 응력(Total cauchy stress, \mathbf{T})은 Fig. 4 와 같이 8-체인모델로 이루어진 네트워크 A 의 응력 \mathbf{T}_A 와 소성변형 거동(Plastic flow behavior)을 보이는 8-체인 모델인 네트워크 B 의 응력 \mathbf{T}_B 의 합으로 계산된다.¹⁰⁻¹²

네트워크 A 와 B 의 재료상수는 초기 전단계수 μ_A, μ_B , 한계 체인인장길이인 λ^{back} , 체적탄성률인 κ 가 있다. 네트워크 B 의 초기 전단변형계수 μ_B 는 응력기준인자(Stress scaling factor) s 와 네트워크 A 의 초기 전단변형계수 μ_A 의 곱의 형태로 나타낼 수 있다. 소성변형 거동은 네트워크 B 에서만 일어나고, 이에 대한 재료상수는 크립 매개변수(creep parameter)인 A, 유효응력지수(effective strain exponent)인 m, 크립 변형률 지수(creep strain exponent)인 C 이다.¹⁰⁻¹²

박막의 구조를 이루는 재료인 폴리프로필렌의 벡스트롬-보이스 모델의 재료상수를 얻기 위해서

Table 2 Material constants of 8 chain model of polypropylene on BB- model from experimental test data¹⁶ for a polypropylene cyclic uniaxial deformation

μ_A	λ^{lock}	κ	s
14	1.8	0.0025	35

Table 3 Material constants of plastic flow of polypropylene on BB- model from experimental test data¹⁶ for a polypropylene cyclic uniaxial deformation

A	m	C
1e-6	2	0

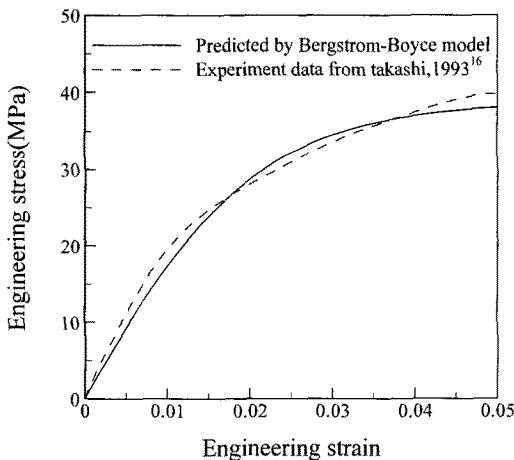


Fig. 5 Comparison between prediction of Bergstrom-Boyce model and experimental data of polypropylene

백스트롬-보이스^{10,11} 가 제안한 수치대입법을 사용하였다. Table 1 은 타카시(Takashi)¹⁷ 의 실험에서 얻은 폴리프로필렌 재료의 백스트롬-보이스 재료상수다.

Fig. 5 는 타카시(Takashi)¹⁷ 의 실험에서 얻은 폴리프로필렌 재료의 응력-변형률과 백스트롬-보이스 모델로 예측한 응력-변형률을 보여주고 있다.

3. 유한요소해석

다공성 폴리머 재료는 액츄에이터나, 센서로 작동 시 Fig. 3 의 y 축인 두께방향으로 반복적인 인장, 압축 거동을 한다.

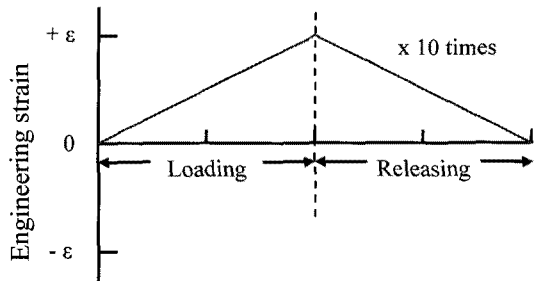


Fig. 6 Amplitude of y-direction strain of polymer foam film

본 논문에서는 이러한 반복적인 인장, 압축 거동을 Fig. 6 과 같이 변형률 제어방법을 통하여 모사하였다. 여기서 최대 변형률인 h 는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 로 4 가지 경우를 선택하였다. 부하시간(Loading time), 완화시간(Release time)은 서로 작동 시간은 같되, 변수 h 에 따라서 변형률속도(strain rate)가 0.001/s 로 일정하도록 적절히 설정하였다. 인장압축의 반복횟수는 10 회로 하였다.

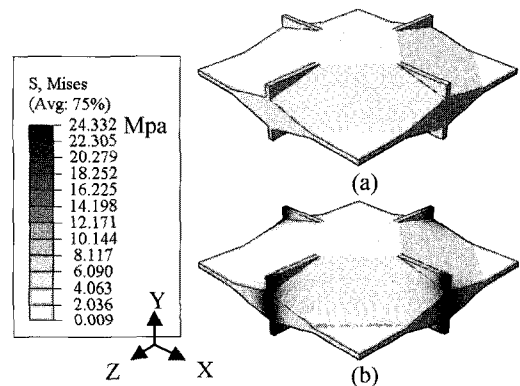


Fig. 7 Calculated results of finite element analysis. (a) Initial model shape, (b) deformed model shape

다공성 폴리머 박막의 기공두께와 형태 따른 변형 거동을 비교하기 위해서는 y 축 방향의 단축 응력-변형률을 계산하였다. Fig. 7 은 유한요소해석에서 기공모델을 y 축 방향으로 인장시킨 결과를 보여준다. Fig. 7 을 보면 기공이 y 축으로 인장변형했을 때, 각각 z 축과 x 축에 수직인 부분에서 집중 응력이 걸리는 것을 알 수 있다.

4. 상대 응력과 기공의두께, 변형률의 관계

Fig. 8 은 기공의 단축(h)의 길이가 4 μm, 장축

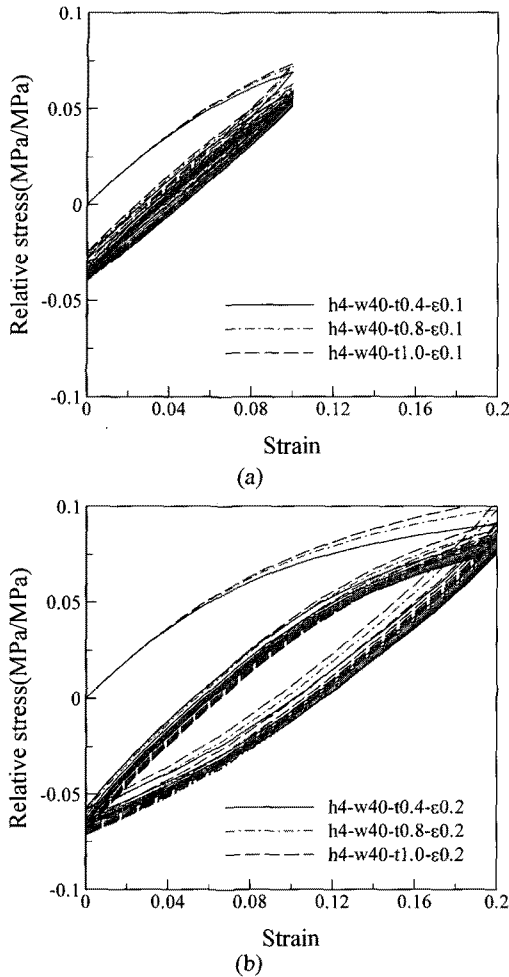


Fig. 8 Cyclic stress-strain curve of polypropylene foam film at maximum strain amplitude of cyclic strain (a) 0.1 (b) 0.2

(w)의 길이가 40 μm, 두께(2t)가 0.4~1.0 μm 인 기공의 반복변형에 따른 상대 응력(Relative Stress) 결과이다. 여기서 상대응력은 여러 두께와 값을 가지는 각각의 기공의 반복변형에서 계산된 응력 값인 α(ε)을 각각의 기공 두께에 따른 탄성계수 값 E(2t)로 나눈 결과이다. 각각의 두께에 따른 기공의 탄성계수는 유한요소해석에서 계산된 응력-변형률에서 구하였다.

Fig. 8 을 보면 다공성 폴리머 박막 재료의 반복 변형 거동은 연화되는 초탄성 고체 재료의 반복 변형 거동¹⁷ 과 같은 거동 특징을 가진다. 연화되는 초탄성 고체 재료는 첫 부하의 최대 변형률에서 최대 응력을 가진다. 그리고 반복변형에 횟수의 증

가에 따라서 박막 재료는 연화된다. 즉 반복되는 최대 변형률 값에 따른 최대 응력값이 반복횟수가 증가함에 따라 감소한다. Fig. 8 에서 연화되는 초탄성 고체 재료의 특징을 다공성 폴리머 박막 재료도 동일하게 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8 에서 다공성 폴리머 박막 재료의 변형률에 따른 상대응력 값은 반복변형 거동 시 기공 두께(2t)에 상관없이 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 하중이 부과되어 변형률이 최대일 때, 변형률에 따른 상대응력 값은 기공의 두께에 상관없이 거의 같다. 그리고 반복변형에 따른 상대 응력 루프가 기공의 두께에 상관없이 같은 곡선을 이루고 있다. 또 변형의 반복 횟수의 증가에 따라서 상대 응력 루프가 기공 두께에 상관없이 점점 일치해가는 것을 볼 수 있다. 따라서 다공성 폴리머 박막의 반복변형거동은 기공의 두께에 따라 달라지는 탄성계수 값에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

유한요소 해석의 결과를 정리하면, 다공성 폴리머 박막의 변형률에 따른 응력관계를 식(1)과 같이 쓸 수 있다. 이는 일반적으로 알려진 단순인장 거동에서의 결과와 같다.

$$\frac{\sigma_{foam1}(\epsilon)}{E_{foam1}(2t)} = \frac{\sigma_{foam2}(\epsilon)}{E_{foam2}(2t)} \quad (1)$$

식(1)은 두 개의 폼 재료(foam1, foam2)의 변형률에 따른 응력인 σ_{foam}(ε)을 기공의 두께(2t)의 함수인 각각의 폼 재료의 탄성계수인 E_{foam}(2t)으로 나눈 상대응력(Relative stress)이다.

식(1)에 다공성 재료의 탄성계수를 계산하기 위해 자주 쓰이는 상대 탄성계수(E_R)를 대입하면 식(2)와 같다. 상대 탄성계수(Relative Young's modulus, E_R)는 기공재료의 탄성계수인 E_{foam}(2t)에 기공이 없는 같은 재료의 탄성계수 E_{solid}를 나눈 값이다.

$$\sigma_{foam2}(\epsilon) = \frac{E_{R,foam1}(2t)}{E_{R,foam2}(2t)} \sigma_{foam1}(\epsilon) \quad (2)$$

식(2)를 통해 다양한 기공두께를 가진 다공성 폴리머 박막재료의 응력-변형률 거동을 특정한 기공 두께에 따른 반복변형 시험에서 얻어진 응력-변형률과 상대 탄성계수의 비로 예측할 수 있다.

5. 기공의 두께, 형태와 탄성계수의 관계

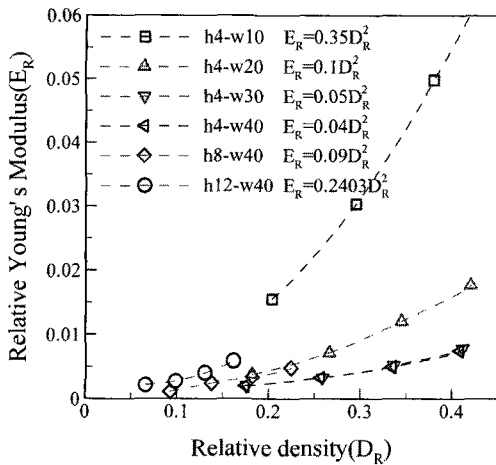


Fig. 9 Relative young's modulus against thickness of pore wall, pore shape and relative density

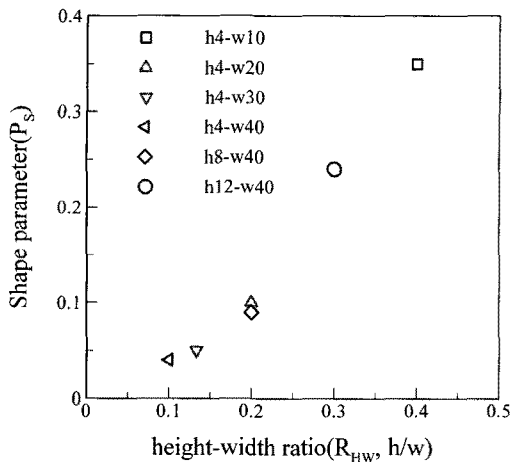


Fig. 10 Shape parameter against pore shape (height-width ratio)

Fig 9 는 다양한 기공형태, 기공두께를 가지는 다공성 폴리머 박막의 인장거동을 해석하여 얻은 상대 탄성계수 값이다. 특히 기공의 형태, 두께에 따른 다공성 재료의 변수를 기공분율(D_R)로 환산하여 나타내었다. 기공분율은 기공이 있는 재료의 밀도를 기공이 없을 때 재료의 밀도로 나눈 값이다. 대부분의 다공성 재료에 대한 기존 연구에서는 탄성계수를 정의하기 위해서 기공분율을 변수로 많이 사용하고 있다.

Fig. 9 를 보면 다양한 기공의 형태, 두께에 따른 상대 탄성계수가 특히 기공분율(D_R)의 제곱에 비례하는 함수로 나타낼 수 있는 것을 알 수 있다.

또 기공의 너비에 따른 높이 비가 클수록 다공성 폴리머 박막 재료는 기공분율의 증가에 따른 상대 탄성계수의 증가가 큰 것을 알 수 있다.

기공분율의 제곱으로 이루어진 함수의 계수를 다공성 폴리머 박막 재료 기공의 높이, 너비의 비 (R_{HW})에 따른 형상변수(Shape parameter, P_s)로 가정하면 상대탄성 계수의 식은 식(3)과 같다.

$$E_R(R_{HW}, D_R) = P_s(R_{HW})D_R^2 \quad (3)$$

기공의 높이, 너비의 비(R_{HW})를 기공의 높이를 너비로 나눈 값으로 가정하면, 형상변수는 Fig. 10, 과 같은 관계를 가진다. Fig. 10 을 보면 기공의 높이, 너비의 비에 따른 형상변수는 선형관계이다. 따라서 기공의 높이, 너비 비와 기공분율에 따른 식은 (4)와 같다.

$$E_R(R_{HW}, D_R) = (1.077R_{HW} - 0.0945)D_R^2 \quad (4)$$

6. 결론

본 연구에서 초탄성 재료모델과 제안한 미세형상구조모델로 여러 기공형상과 두께를 가지는 다공성 폴리머 박막의 반복변형 거동을 모사하였다. 유한요소 해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 다공성 폴리머 박막 재료는 반복 변형 거동 시 거동현상이 탄성계수에 의존적이다.
- (2) 다공성 폴리머 박막 재료의 탄성계수는 기공분율의 제곱에 비례하는 함수이다.
- (3) 다공성 폴리머 박막 재료의 탄성계수는 기공형상의 높이, 너비 비에 대해서는 선형적 관계를 가진 형상변수와 기공분율의 제곱의 곱으로 표현이 가능하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10358-0(2009))지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Sessler, G. M., "Electrets," Springer-Verlag, 1980.
2. Gerhard-Mulhaupt, R., "Less can be More Holes in Polymers lead to a New Paradigm of Piezoelectric

- Materials for Electret Transducers,” IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 5, pp. 850-859, 2002.
3. Bauer, S., Gerhard-Multhaupt, R. and Sessler, G. M., “Ferroelectrets: Soft electroactive foams for transducers,” Physics Today, Vol. 57, No. 2, pp. 37-43, 2004.
 4. Sessler, G. M. and Hillenbrand, J., “Electromechanical response of cellular electret films,” Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 21, pp. 3406-3407, 1999.
 5. Mellinger, A., “Dielectric Resonance Spectroscopy: a Versatile Tool in the Quest for Better Piezoelectric Polymers,” IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 5, pp. 842-861, 2003.
 6. Paajanen, M., Välimäki, H. and Leikkala, J., “Modelling the electromechanical film (EMFi),” Journal of Electrostatics, Vol. 48, No. 3-4, pp. 193-204, 2000.
 7. Hillenbrand, J., Sessler, G. M. and Zhang, X., “Verification of a model for the piezoelectric d_{33} coefficient of cellular electrets films,” Journal of Applied Physics, Vol. 98, No. 6, Paper No. 064105, 2005.
 8. Tuncer, E., “Numerical calculation of effective elastic properties of two cellular structures,” Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 38, No. 3, pp. 497-503, 2005.
 9. Ehlers, W. and Markert, B., “A macroscopic finite strain model for cellular polymers,” International Journal of Plasticity, Vol. 19, No. 7, pp. 961-976, 2003.
 10. Bergström, J. S. and Boyce, M. C., “Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers,” Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 46, No. 5, pp. 931-954, 1998.
 11. Bergström, J. S. and Boyce, M. C., “Constitutive modeling of the time-dependent and cyclic loading of elastomers and application to soft biological tissues,” Mechanics of Materials, Vol. 33, No. 9, pp. 523-530, 2001.
 12. Bergström, J. S., Kurtz, S. M., Rimnac, C. M. and Edidin, A. A., “Constitutive modeling of ultra-high molecular weight polyethylene under large-deformation and cyclic loading conditions,” Biomaterials, Vol. 23, No. 11, pp. 2329-2343, 2002.
 13. Paajanen, M., Wegener, M. and Gerhard-Multhaupt, R., “Charging of cellular spacecharge electret films in various gas atmospheres,” Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 24-27, 2001.
 14. Kelvin, W. T., “On the Division of Space with Minimum Partitional Area,” Philosophical Magazine, Vol. 24, No. 151, pp. 503-514, 1887.
 15. Weaire, D. and Phelan, R., “A counter-example to Kelvin’s conjecture on minimal surfaces,” Philosophical Magazine Letter, Vol. 69, No. 2, pp. 107-110, 1994.
 16. Boyce, M. C., Kear, K., Socrate, S. and Shaw, K., “Deformation of thermoplastic vulcanizates,” Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 49, No. 5, pp. 1073-1098, 2001.
 17. Ariyama, T., “Cyclic deformation behaviour and morphology of polypropylene,” Journal of Materials Science, Vol. 28, No. 14, pp. 3845-3850, 1993.