

직물의 구조적 모델과 역학적 특성간의 관계

전봉수, 김성희, 양철곤, 배지현

성균관대학교 섬유공학과

1. 서 론

지금까지 직물의 역학적 특성을 고찰하기 위하여 직물의 구조에 대한 기하학적인 모델들이 많은 연구자들에 의해 소개되어 왔다. 1937년에 Peirce¹가 원형 단면의 모델을 제안하면서부터 이 모델을 기본으로 한 기하학적 모델에 대한 연구가 활발히 진행되어 race track 모델, lenticular 모델, circular arc 모델, 직선 모델등 여러 가지 모델이 제시되었다. 이러한 모델들은 직물의 종류와 이완상태에 따라 직물의 역학적 특성을 예측하는데 있어 커다란 차이가 있다. 그럼에도 불구하고 지금까지는 주로 하나의 모델만을 선택하여 모든 직물의 역학적 거동을 예측하여 왔는데, 본 연구에서는 이러한 모델들간의 차이를 직물의 종류와 이완정도에 따라 이론치와 실험치를 비교 검토함으로써 가장 적합한 모델을 선택할 수 있는 방법을 도출해내고자 하였다. 일반적으로 이러한 기하학적 모델들을 이용하여 역학적 거동을 나타내는 방법으로는 힘의 평형을 이용하는 방법과 에너지 방법이 있다. 이 중 에너지 방법은 다양한 직물 구조와 여러 형태의 변형들에 대한 관계를 나타내는데 있어 보다 간단하게 접근할 수 있는 방법이다. 그러므로 본 연구에서는 앞에서 언급한 몇 가지 기하학적 모델에 에너지 방법을 적용하여 직물의 역학적 특성을 예측할 수 있는 식을 유도하고 유도된 식으로부터 각 변수들이 미치는 영향에 대하여 고찰해 보고자 한다.

2. 이 론

2.1 Energy method

직물의 단위 셀(unit cell)에 x축과 y축 두 방향으로 인장력 F_x 와 F_y 가 작용할 때 Hearle 등^{2,3}에 의하면 직물의 내부에 저장되는 총 에너지는 식(1)로서 나타낼 수가 있다.

$$U = -F_x x - F_y y + U_1(l_1) + U_2(l_2) + U_3(\theta_1, \theta_2, D) \quad \dots\dots (1)$$

여기서 U_1, U_2 : 각각 경사와 위사의 길이 변화에 따른 탄성에너지

U_3 : 굽힘 에너지

저장되어 있는 총에너지를 최소로 할 때 직물은 평형 상태를 이루기 때문에 식(1)의 변수 중 x, l_1, l_2 를 독립변수로 생각한다면 식(2)과 같은 조건의 식이 성립한다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial l_1} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial l_2} = 0 \quad \dots\dots\dots\dots\dots (2)$$

2.2 직물 모델

2.2.1 Peirce 모델

Peirce 모델의 경우 직물은 식(3)과 같은 구조로 되어 있다. 여기서 1,2로 표시된 숫자는 각각 경사와 위사를 나타낸다. 프라임이 붙은 변수는 변형전의 값을 나타내고 붙지 않은 변수는 변형후의 값을 나타낸다.

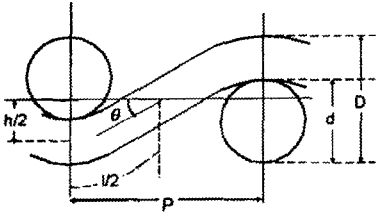


Figure 1 Peirce model

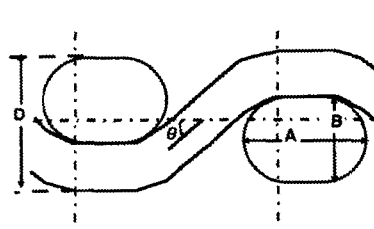


Figure 2. Racetrack model

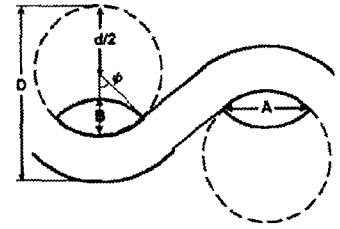


Figure 3. Lenticular model

$$\begin{cases}
 x' = (l_1' - D\theta_1') \cos \theta_1' + D \sin \theta_1' \\
 y' = (l_2' - D\theta_2') \cos \theta_2' + D \sin \theta_2' \\
 h_1' = (l_1' - D\theta_1') \sin \theta_1' + D(1 - \cos \theta_1') \\
 h_2' = (l_2' - D\theta_2') \sin \theta_2' + D(1 - \cos \theta_2') \\
 h_1' + h_2' = D \\
 D = d_1' + d_2'
 \end{cases}
 \quad
 \begin{cases}
 x = (l_1 - D\theta_1) \cos \theta_1 + D \sin \theta_1 \\
 y = (l_2 - D\theta_2) \cos \theta_2 + D \sin \theta_2 \\
 h_1 = (l_1 - D\theta_1) \sin \theta_1 + D(1 - \cos \theta_1) \\
 h_2 = (l_2 - D\theta_2) \sin \theta_2 + D(1 - \cos \theta_2) \\
 h_1 + h_2 = D \\
 D = d_1 + d_2
 \end{cases}
 \quad (3)$$

2.2.2 racetrack 모델

실의 단면을 비원형의 형태로 고려해보고자 시도한 모델이 Figure 2의 racetrack⁴⁵ 모델이다. 이 모델의 경우 flattening factor(q)가 도입되었으며 평직이 아닌 다른 여러가지 조직의 직물인 경우에도 쉽게 응용할 수가 있다. 구조식은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 p_i &= A_i - B_i + [(l_i - e_i d_i) - D\theta_i] \cos \theta_i + D \sin \theta_i + e_i d_i \\
 h_i &= (l_i' - D\theta_i) \sin \theta_i + D(1 - \cos \theta_i) \quad \dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

$$h_i + h_j = D, \quad D = d_i + d_j, \quad q_i = A_i / B_i, \quad B_i = d_i, \quad A_i = (1 + e_i) d_i$$

여기서 A 는 장직경, B 는 단직경, e 는 단직경과 장직경의 차이에 대한 비를 나타내며 다른 인자들은 Peirce model과 같다.

2.2.3 lenticular 모델

이 모델은 racetrack model에서 마주치게 되는 어려움들을 피하기 위한 시도로 만들어졌으며 Figure 3에서 볼 수 있는 것과 같이 단면이 렌즈 모양으로 표현되어 있으며 구조식은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 p_i &= (l_i - D_i \theta_i) \cos \theta_i + D_i \sin \theta_i \\
 h_i &= (l_i - D_i \theta_i) \sin \theta_i + D_i (1 - \cos \theta_i) \quad \dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

$$h_i + h_j = B_i + B_j, \quad D_i = d_i + B_i, \quad q_i = A_i / B_i, \quad A_i = d_i \sin \phi_i, \quad B_i = d_i (1 - \cos \phi_i)$$

3. 실험

3.1 직물 구조 특성

이완 상태에 따라 가장 적합한 구조 모델을 결정하기 위하여 직물 전체 구조를 파악하는데 필요한 변수, 밀도 그리고 크립프 등을 측정하였다. 시료는 가공처리가 되어 있지 않은 평직물로서 면직물 2종, 모직물 2종, 그리고 폴리에스테르 직물 2종을 각각 이완상태를 변화시켜 실험하였다. 직물의 구조 변수로서 크립프율을 측정하였는데 Instron으로 인장특성을 5회씩 측정하여 KS K 0451의 방법으로 구하였다. 그리고, 각 상태의 시료에 대해 밀도와 변수 등을 측정하였다.

3.2 역학적 특성

Instron으로 실의 인장 특성을 측정하여 구한 초기 탄성 계수로부터 스프링 상수를 구했으며 KES-F를 이용하여 실의 굽힘 강성을 측정하였다. 또한 KES-F를 이용해 직물의 인장 특성을 측정하였다. 시료의 크기는 폭 20 cm, 파지 거리 5 cm로 하였는데 이러한 조건은 인장을 받지 않는 횡축으로의 길이는 변화가 없는 것으로 볼 수 있기 때문이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 모델을 이용한 직물의 역학적 거동 예측

4.1.1 크립프가 인장 특성에 미치는 영향

Figure 4는 크립프가 인장 특성에 미치는 영향을 관찰한 것으로 Peirce model의 경우는 Figure 4.(a)와 같이 크립프가 증가할수록 변형률에 대한 하중은 작아지는 것을 알 수 있다. Figure 4.(b)는 racetrack model의 경우로 Peirce model과 같은 경향을 나타내고 있다. lenticular model은 Figure 4.(c)와 같이 앞에서 보인 model보다 크립프의 변화에 대한 곡선의 변화 폭이 커지는 것으로 나타났다.

4.1.2 스프링 상수가 인장 특성에 미치는 영향

Figure 5는 스프링 상수가 인장 특성에 미치는 영향을 관찰한 것으로 Figure 5는 Peirce model의 경우로 스프링 상수가 커질수록 변형률에 대한 하중의 값이 상승하는 것을 알 수 있으며 크립프에 대한 경우보다 변화의 폭이 더 큰 것으로 나타났다. 그외에 racetrack model과 lenticular model의 경우도 Peirce model의 경우와 같은 경향을 보인다.

4.1.3 굽힘 강성이 인장 특성에 미치는 영향

Figure 6은 굽힘 강성이 인장 특성에 미치는 영향에 대한 것으로 Peirce model, racetrack model, lenticular model 모두의 경우 실의 굽힘 강성이 직물의 인장 거동에 미치는 영향은 거의 없다.

4.1.4 flattening factor가 인장 특성에 미치는 영향

Figure 7은 flattening factor가 인장 특성에 미치는 영향을 보인 것으로 racetrack model의 경우는 거의 변화가 없으며 lenticular model의 경우는 flattening factor가 증가할수록 racetrack model에 비해 인장 특성에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

4.2 이완 상태에 따른 직물 모델의 적합성

이완 상태에 따라 어떠한 모델이 실험치와 가장 비슷한 거동을 나타내는지를 정량적으로 알아보기 위해 실험치와 각 이론치와의 차이를 제공하여 이론치로 나누어 준 값을 Table 1에 나타내었다. DR 상태일 때는 Peirce model이, WR 상태와 T 상태에서는 lenticular model이 실험치와 근사한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

Table 1. The sum of squares of difference between the expected load and the observed one for A: the dry-relaxed fabric, B: the wet-relaxed fabric, and C: the tumbled fabric.

state model \ strain(%)		0	1	2	3	4	5	6	test value
		A	observed data	0	1.06	3.40	7.66	14.47	25.53
Peirce model	0		3.45	7.08	10.89	14.85	18.96	23.19	2.62
racetrack model	0		3.38	6.94	10.69	14.60	18.65	22.85	2.72
lenticular model	0		3.13	6.51	10.11	13.91	17.90	22.05	2.95
B	observed data	0	0.83	2.08	4.16	6.24	7.90	9.56	
	Peirce model	0	2.32	4.83	7.52	10.39	13.41	16.59	1.20
	racetrack model	0	2.25	4.69	7.33	10.13	13.10	16.23	1.10
	lenticular model	0	1.88	3.99	6.33	8.89	11.66	14.62	0.64
C	observed data	0	0.82	1.64	2.46	3.69	5.33	7.39	
	Peirce model	0	1.88	3.95	6.18	8.59	11.16	13.88	1.59
	racetrack model	0	1.83	3.92					0.63
	lenticular model	0	1.42	3.04	4.88	6.92	9.17	11.61	0.83

5. 결 론

이완 상태에 따라 여러가지 직물의 기하학적인 모델에 대한 역학적 성질을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직물의 인장 성질에 영향을 미치는 실의 역학적 특성과 직물의 구조적 특성들 중 영향력이 큰 요인으로는 스프링 상수, 크립프, flattening factor, 굽힘 강성 등의 순으로 나타났는데 굽힘 강성의 경우는 거의 영향을 주지 못한다.
2. 이완 상태가 커짐에 따라 신장에 대한 응력의 저항도는 감소한다.
3. 직물구조모델을 이용하여 인장 거동을 예측한 결과 이완 상태에 따라 각각 DR 상태에서는 Peirce model이 그리고 WR과 T 상태에서는 lenticular model이 적합하다.

6. 참고 문헌

1. F. T. Peirce, *J. Text. Inst.*, **28**, T45 (1937).
2. A. Kemp, *J. Text. Inst.*, **49**, T44 (1958).
3. J. W. S. Hearle, P. Grosberg and S. Backer, "Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics", John Wiley & Sons, Inc (1969)
4. J. W. S. Hearle and W. J. Shanahan, *J. Text. Inst.*, **69**, 81 (1978).
5. W. J. Shanahan and J. W. S. Hearle, *J. Text. Inst.*, **69**, 92 (1978).

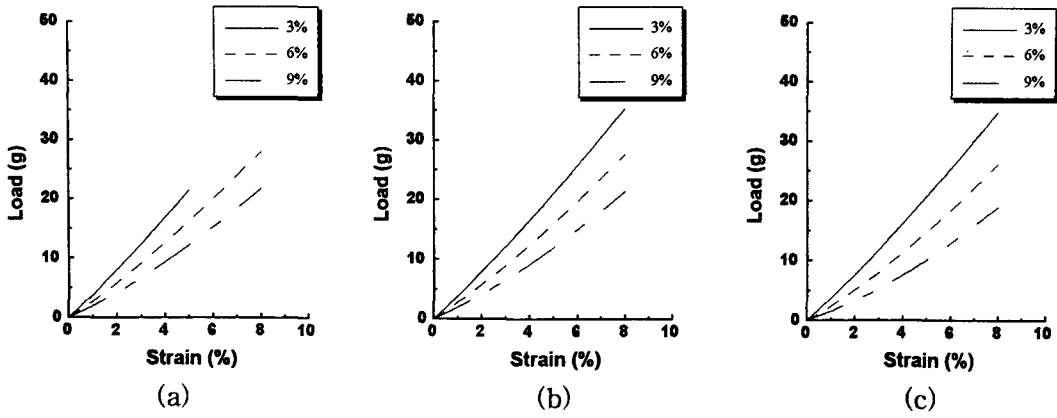


Figure 4. Load vs. strain as a function of crimp in the case of (a) Peirce model, (b) racetrack model and (c) lenticular model

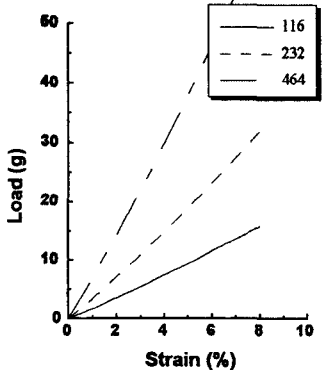


Figure 5. Load vs. strain as a function of spring constant in the case of Peirce model

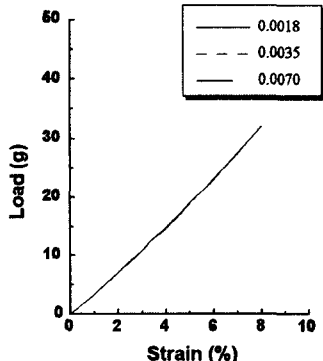


Figure 6. Load vs. strain as a function of bending rigidity in the case of Peirce model

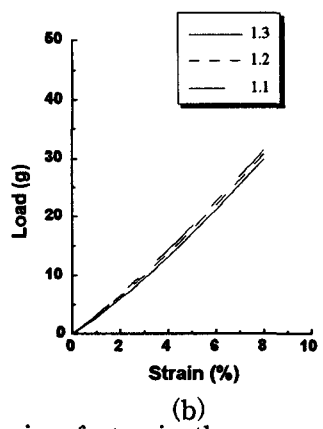
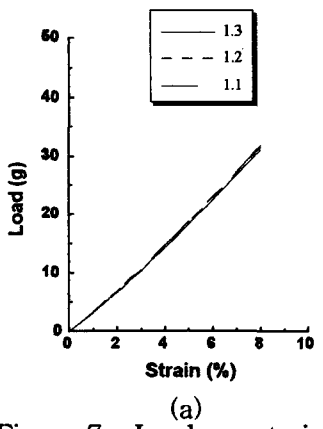


Figure 7. Load vs. strain as a function of flattening factor in the case of (a) racetrack model and (b) lenticular model