직물의 점탄성 특성 측정과 질감해석 연구(I) -응력완화

황성욱, 권영하, 강재식, 박연규*, 강대임*
경희대학교 공과대학 섬유공학과, *한국표준과학연구원, 힘 연구실
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

MEASUREMENT OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF FABRIC FOR TACTILE FEELING (I)-STRESS RELAXATION

Seong Uk Hwang, Young Ha Kwon, Jae Shik Kang, Yon Kyu Park*, Dae Im Kang*
Dept. of Textile Engineering, Kyung Hee University, 1 Seocheon, Kihung, Youngin City, Kyunggi Do, KOREA
Force Group, Division of Mechanical Metrology
Korea Research Institute of Standards and Science

요 약

We have measured viscoelastic properties of fabrics in thickness direction. We assume that Maxwell model is very useful in stress relaxation of viscoelastic theories and appropriate formulas for fabric are calculated. Measurement system constitute of high precession load cell, translator and laser displacement sensor for viscoelastic properties was designed and elastic coefficients and damping coefficients were measured for 10 fabric samples. Elastic coefficients measured were 19~25 kN/m^2 and Damping coefficients measured were 4.8~8.7 $MN \cdot s/m^2$. We concluded that these coefficients are good related with FUKURAMI collected from KESF system

1. 서 론

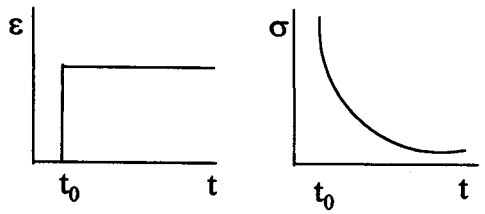
직물을 손으로 만지거나 문지를 때 느끼는 질감의 객관화는 여러 분야에서 다양한 방법으로 연구되어지고 있다. 그 중에서 Kawabata 가 고안한 물리적, 역학적 측정값과 주관적인 질감 표현 사이의 관계를 찾아 객관화시킨 결과는 가장 일반화 되어 세계 각국에서 응용되고 있다.

본 연구에서는 직물을 손으로 눌렀을 때의 직물의 두께 방향으로의 점탄성 성질에 대한 이해를 위해서 두께 방향의 stress relaxation 상태에서 Hooke 의 법칙을 만족하는 탄성이론과 Newton 의 이론을 만족하는 점성이론을 직물에 적용하여 모델화 하고, 모델로부터 얻어지는 방정식으로부터 점성계수와 탄성계수를 구하였다. 측정된 탄성계수와 점성계수를 현재 직물의 객관적 평가기준으로 가와바타의 hand value값과 비교하여 상관계수를 찾아 분석하였다.

2. 압축 점탄성 이론 - stress relaxation

직물이 갖고 있는 점탄성 성질은 인간의 피부와 접촉하고 움직임에 따라 느끼는 촉감을 유발시키는 요소 중의 하나이다. 직물의 점탄성 해석은 길이 또는 폭 방향으로 많은 연구가 이루어져 있으나 두께 방향의 점탄성 측정은 매우 복잡한 구조를 갖고 있는 직물에서는 어려움이 따른다. 점탄성은 탄성체와 점성체의 혼합으로 Maxwell모델과 Voigt모델이 대표적이며 역학적인 현상은 stress relaxation 과 creep으로 해석하고 있다.

점탄성을 측정하는 방법은 일정한 stress를 가했을 때의 strain 또는 일정한 strain을 가했을 때의 stress의 시간적 변화를 관찰하는 정적인 방법과 직물에 주기적인 stress 또는 strain을 가했을 때 어떤 응답을 하는가를 측정하는 동적인 방법이 있다. 이중 이



a. Strain with step function time b. Stress Relaxation with Strain

Fig 1. Ideal Stress Relaxation Curve

번 논문에서는 정적인 방법을 가지고 직물의 점탄성 성질을 해석하였다.

이러한 해석방법에서는 직물에 일정한 strain를 주고 stress의 감소를 살펴보는 stress relaxation과 그 반대로 일정한 stress를 주고 strain의 증가를 다루는 creep현상이 있다. 이번 논문에서는 그러한 성질 중 stress relaxation 상태에서의 직물의 거동을 살펴보았다.

Stress relaxation 은 Fig. 1과 같이 해석될 수 있다. Fig. 1에서 a는 시간 t_0에서 일정한 step함수로 strain을 가한 형태이며, 그림 b 는 이러한 strain 상태에서 시간 t_0에서 감소하는 stress의 형태를 해석한 곡선이다. 이러한 stress relaxation을 역학적으로 해석하기 위해서는 Hooke의 모델을 만족하는 탄성모델과 Newton 의 모델을 만족하는 점성모델이 같이 직물에 적용되어야 한다. Maxwell 모델은 Stress relaxation을 가장 잘 묘사하는 점탄성 거동 모델이다.

Maxwell 모델은 Fig. 2와 같은 spring과 dashpot를 직렬로 연결한 모델이다. 직물의 탄성성질과 점성성질이 직렬형태로 관계가 있다고 가정한 Model임을 의미하며 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{G}\frac{d\sigma}{dt}+\frac{1}{\eta}\sigma=\frac{d\varepsilon}{dt} \qquad \text{(식 1)}$$

여기에서 G 는 탄성계수, η는 점성계수이며, σ는 stress 그리고 ε은 strain이다.

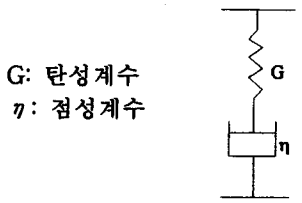


Fig. 2 Maxwell Model

직물의 두께방향으로 일정한 strain을 줄 때 다음과 같은 3가지 경우가 있을 수 있다.

a. 두께 방향으로 일정속도로 직물에 stress을 가할 때
b. 두께 방향으로 일정감속도로 직물에 stress를 가할 때
c. 두께 방향으로 step function으로 직물에 stress를 가할 때

위의 3가지 가정에서 a를 제외한 나머지 가정은 실험실적으로 구사하기 어려운 것이므로, 본 연구에서는 a를 이용하여, 탄성계수와 점성계수를 구하였다.

직물의 두께를 일정한 속도(v)로 누른다고 가정하여 움직인 거리는 vt가 되므로 식 1은 다음과 같이 변환시킬 수 있다.

$$\frac{1}{G}\frac{d\sigma}{dt}+\frac{1}{\eta}\sigma=\frac{vt}{l}\frac{d}{dt} \qquad \text{(식 2)}$$

식 2 를 정리하면

$$\frac{d\sigma}{dt}+\frac{G}{\eta}\sigma=G\frac{vt}{l}\frac{d}{dt} \qquad \text{(식 3)}$$

$\eta/G=\tau$는 완화시간(relaxation time)이라 하며 응력이 최초의 값의 37%로 될 때까지 걸린 시간을 의미한다. 식 3은 $y'+p(x)y=q(x)$ 형태의 1차 선형미분방정식의 형태이므로 해는 식 4 와 같이 나타내어진다.

$$y(x)=e^{-\int p(x)dx}\int qe^{-\int p(x)dx}+Ce^{-\int p(x)dx} \qquad \text{(식 4)}$$

그래서 다음과 같은 1차 선형미분방정식으로 시간과 stress에 대해 나타낼 수 있다.

$$\sigma = e^{-\frac{t}{\tau}} \frac{G}{l}\left(\int v e^{\frac{t}{\tau}} dt\right) + Ce^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{(식 5)}$$

식 5 에서 t=0일 때, σ=0의 초기조건을 이용하여 일반해 C를 구하면

$0 = \frac{\eta v}{l} - C \rightarrow C = \frac{\eta v}{l}$ 이다. C를 다시 식 5 에 대입하여 시간과 stress에 대해 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{\eta v}{l} - \frac{\eta v}{l} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{(식 6)}$$

식 6 을 정리하여 점성계수를 구하면

$$\eta = \frac{\sigma l}{v\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad \text{(식 7)}$$

η/G= τ 이므로 탄성계수를 구하면 식 8 의 형태로 나타내어 질 수 있다.

$$G = \frac{\sigma l}{v\,\tau\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad \text{(식 8)}$$

식 7과 8에서 주어지는 값은 σ(probe를 통해 직물에 가해진 stress : 5 kN/m2), v(두께 방향으로 구동시켜 주는 translator 의 이동속도 : 20 μm/sec)이고 나머지 파라미터는 측정하는 값이다. 그러므로 실험장치를 구성하여, l(직물두께 m)과 t(probe가 직물에 닿은후 5 kN/m^2)이 될때 까지 걸린 시간 sec), 그리고 τ(완화시간 sec)를 측정하였다.

3. 실험장치 및 방법

앞에서 설명한 식 7, 8, G, η을 실험에 의해 구하기 위하여 실험을 하였다. 직물의 두께방향으로의 stress relaxation 실험을 하기 위해 Fig. 3과 같은 장치를 구성하였다. 두께 방향으로의 변화와 힘의 측정은 직물의 두께 방향을 z축으로 가정했을 때, 측정장치의 z축 구동부의 움직이는 거리는 짧고 힘의 크기가 작아야 하므로 특별히 한국표준과학연구원에서 정밀제작하여 자동제어되고 data 수집과 분석을 real-time으로 할 수 있는 장치를 이용하였다. 이때 사용된 센서와 장치는 Table 1 에 나타내고 있다.

Fig. 3 Schematic diagram of spring, damping coefficients measurement system

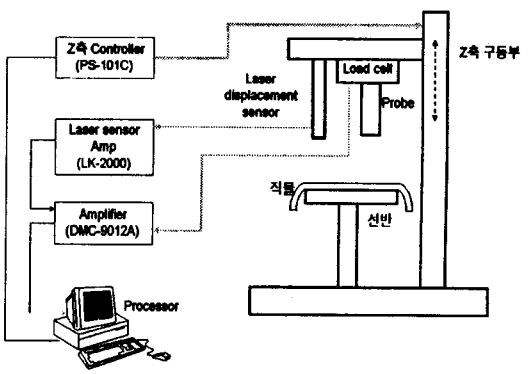


Table.1 Specification of measurement system

Probe	Load cell	Laser displacement sensor	Z축 구동부
면적 4.04㎠ 의 원형	6축 loadcell 200N까지 측정가능 분해능 0.0389N	5mm변위까지측정가능 분해능 1㎛	20cm까지 이동가능

직물들은 10개의 남성용 동복지를 대상으로 하여 측정하였다.

가와바타 시스템에서는 직물에 20 ㎛/sec의 속도로 0.5 gf/㎠(50 N/㎡)의 압력을 가했을때의 두께를 직물의 두께로 정하였다. 본 연구에서도 직물에 대한 두께는 z축을 20 ㎛/sec의 속도로 이동시켜 직물에 닿아 0.5 gf/㎠의 압력이 가해졌을 때까지 이동한 probe의 이동거리와 측정한 선반과 probe사이의 거리의 차이를 가지고 계산했다. Table 3 은 z축이 0.5 gf/㎠에 도달한 값들과 그 값에 도달했을 때 움직인 probe의 이동거리를 통해 구한 각 직물들의 두께이다. probe가 직물에 닿은후 50 gf/㎠에 이르를 때 까지 걸린 시간(sec)은 probe가 0.5 gf/㎠에 도달한 시간을 직물에 닿기 시작한 시간이라 가정하고 50 gf/㎠에 도달한 시간과의 차이를 이용하여 계산하였다. 우리가 직물의 두께를 구

할 때 오차가 약간 발생했는데, 그것은 probe가 직물에 닿아 약 0.5 gf/㎠의 stress에 이르렀을때 probe의 움직임을 정지시키는 타이밍에 작은 오차가 생기기 때문이다. 이 오차는 직물의 두께계산시 오차를 일으킬수 있으나 오차요인이 매우 작으므로 이 실험에서는 무시하였다.

4. 탄성계수, 점성계수의 계산

식 7과 8에서 탄성계수와 점성계수를 구하는 각 파라미터의 설명은 다음과 같다.

σ: Probe를 통해 직물에 가해진 50 gf/㎠ (5 kN/m^2)의 stress (N/m^2)

v : z축 구동부의 이동속도 (m/sec) : 20 ㎛/sec

l: 직물두께 (m)

t: probe가 직물에 닿은후 50 gf/㎠(50 N/m')에 이르를 때 까지 걸린 시간 (sec)

τ: 완화시간 (sec)

이중에서 σ와 v는 정해진 것이며, 나머지는 실험을 통해 얻어질 수 있는 값들이다..

probe를 이용하여 50 gf/㎠(5 kN/m')의 stress를 fabric에 가한 후, 약 10초동안 stress relaxation현상을 측정하였다. 이때 50 gf/㎠에 가까이 도달한 값들은 그 오차가 0.5 % 이내로 무시해도 될만큼 작아서 50 gf/㎠로 그 수치를 보정후 완화시간을 계산했다. 완화시간의 계산은 50gf/㎠에서 시간변화에 따라 stress가 감소하는 곡선의 기울기의 값을 통해 Sigma plot software프로그램을 이용하여 계산했다. Table4.는 구해진 탄성계수와 점성계수 등을 나타내고 있으며, Fig. 4 는 probe를 통해 2번 직물에 대해 stress가 50 gf/㎠(5 kN/m^2)에 도달한 후 시간에 따라 감소하는 stress relaxation현상이다. 전형적으로 exponential 함수로 감소하는 형태를 보여주고 있다.

5. Hand Value 와 탄성계수와 점성계수와의 관계

KESF system으로 측정된 HAND VALUE와 실험에 의해서 구한 두께 방향의 탄성계수와 점성계수와의 관계를 알아보고 감성적인 느낌을 추측하는 연구를 하였다.

Table. 5는 이러한 계수들과 Hand Value 값들을 표시하고 있다.Fig. 5와 Fig. 6 은 탄성,

Table 4. Measured spring, damping coefficients & parameter

직물 번호	탄성계수 (N/m^2)	점성계수 (N*s/m^2)	직물두께 (mm)	50 gf/㎠까지 다다른 시간(sec)	완화시간 (τ: sec)
1	21109.47	5748110	0.5176	6.2	272.3
2	18983.51	4863574	0.6128	8.2	256.2
3	22313.03	7372225	0.4956	5.6	330.4
4	23866.36	7601435	0.4736	5	318.5
5	24328.54	8733947	0.4736	4.9	359
6	23640.06	7697204	0.4785	5.1	325.6
7	20945.47	5567305	0.5298	6.4	265.8
8	20338.04	4826216	0.6006	7.5	237.3
9	25128.86	7661789	0.4688	4.7	304.9
10	23477.08	8367230	0.3921	4.2	356.4

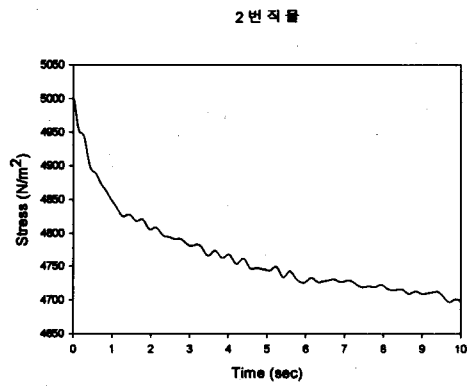


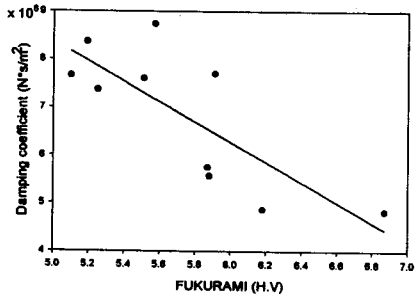
Fig. 4 Stress relaxation curve under 50 gf/cm^2 on the thick fabric (0.6128 mm thickness)

점성계수와 FUKURAMI와의 상관관계를 보여주고 있으며, Fig. 7과 8, Fig.9와 10은 가와바타의 각각 구해진 계수들과 KOSHI, NUMERI와의 상관관계를 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6은 FUKURAMI 와 탄성계수 그리고 점성계수를 비교한 것이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 보여지는 것과 같이 역 상관관계가 있으므로, 점성계수와 탄성계수가 낮을수록 직물의 Fullness가 높은 것을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 KOSHI와 탄성계수, 점성계수를 비교한 것이다. 양의 상관관계가 있으므로 탄성계수와 점성계수가 클수록 stiffness 증가함을 알 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 NUMERI와 탄성계수 그리고 점성계수를 비

교한 것이다. 상관관계가 뚜렷하게 나타나진 않지만, 약간의 양의 상관관계를 보이고 있다. 탄성계수, 점성계수가 증가할수록 smoothness가 약간 증가함을 알 수 있다. 탄성계수, 점성계수와 Hand Value와의 상관관계를 분석해보면, FUKURAMI가 가장 높은 관계를 나타내고 있으며, KOSHI나 NUMERI등은 상관관계가 낮게 나타나고 있는 것으로 알 수 있었다.

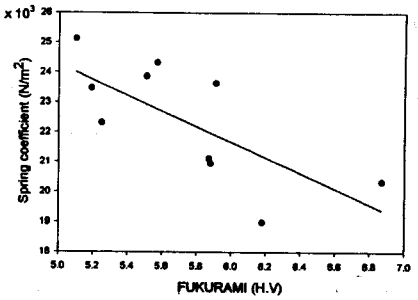
Table 5. spring, damping coefficients and Hand Values

직물번호	탄성계수	점성계수	FUKURAMI	KOSHI	NUMERI
1	21109.47	5748110	5.87	3.25	7.93
2	18983.51	4863574	6.18	3.4	7.68
3	22313.03	7372225	5.25	3.24	7.22
4	23866.36	7601435	5.51	3.12	8.04
5	24328.54	8733947	5.57	2.79	7.86
6	23640.06	7697204	5.91	2.28	8.43
7	20945.47	5567305	5.88	2.5	7.77
8	20338.04	4826216	6.87	1.65	8.12
9	25128.86	7661789	5.1	3.38	7.34
10	23477.08	8367230	5.19	3	8.38



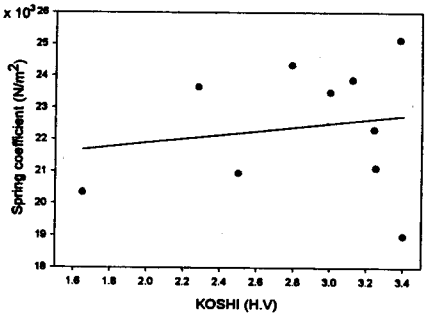
상관계수 : -0.72568

Fig. 5 Correlation spring coefficient with FUKURAMI



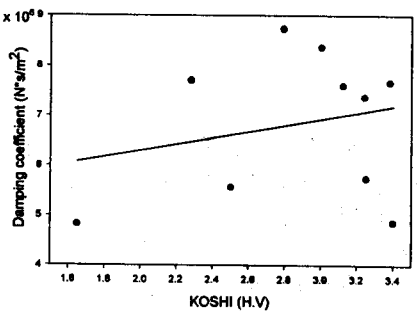
상관계수 : -0.77973

Fig. 6 Correlation damping coefficient with FUKURAMI



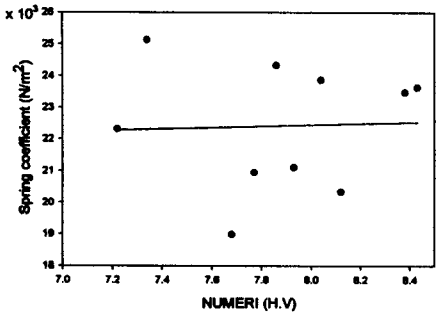
상관계수 : 0.170932

Fig. 7 Correlation spring coefficient with KOSHI



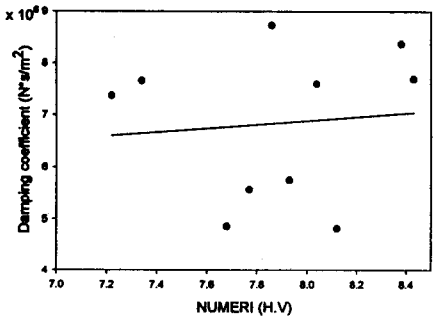
상관계수 : 0.245321

Fig. 8 Correlation damping coefficient with KOSHI



상관계수 : 0.04

Fig. 9 Correlation spring coefficient with NUMERI



상관계수 : 0.100565

Fig. 10 Correlation damping coefficient with NUMERI

5. 결론

직물의 점탄성 특성중의 하나인 stress relaxation을 Maxwell 모델로 가정하고 직물 두께방향의 탄성계수와 점성계수를 정량적으로 구하였다. KESF의 Hand Value중 부피감이 있고, 풍부하고 좋은 맵시에서 오는 느낌을 나타내는 FUKURAMI와 가장 높은 상관관계가 있는 것으로 알 수 있었다. 따라서 주관적 측정을 객과적으로 묘사하는 지표로 직물의 점탄성계수가 사용될 수 있음을 보였다.

6. 참고문헌

1) Sueo Kawabata (1980), "The Standardization and Anlysys of Hand Evaluation" ,The Textile Machinery Society of Japan
2) Erwin Kreyszig (1993) ,"Advanced Engineering Mathematics", John Wiley &Sons Ltd, P22-28
3) Lawerence E. Nielsen (1978) "Mechanical Properties of Polymers & Composites Vol 1, Marcel Dekker INC, p68
4) John J. Aklonis (1983),"Introduction to Polymer Viscoelasticity", John Wiley&Sons Ltd, p139-148
5) John D. Ferry (1980),"Viscoleastic Properties of Polymers", John Wiley&Sons Ltd, p8-10
6) Delors M. Etter (1997),"Engineering Problem Solving with MATLAB", Prentice Hall Inc, p260-262
7) PS-101B Positioning system (1995), SAMICK Precision Ind, p47-54
8) 김상용 (1995), "섬유물리학", 반도출판사, p242-266
9) 이영현, 이기훈 91997), "통계자료분석", 자유 아카데미, p107-109
10) 홍종선, 박홍희 (1996),"조사방법과 통계자료분석", 전영사, p300-302