섬유의 하중 - 신장곡선에 대하여

1. 머릿말

섬유의 일단을 파지하고 다른 일단에 충분한 수직하중을 가하면 그 길이가 늘어난다. 이 때 늘어난 길이에 대응되는 작용 하중을 graph에 plot한 것이 하중-신장곡선(Stress-Strain Curve : 이하 Curve라 칭함)이다. 하중-신장관계로 가장 많이 측정되는 것은 섬유의 형태상 섬유축 방향의 신장(Tensile Stress에 의한 Elongation)에 의한 것이 많다.

측정형식은 옛날부터 여러 가지가 사용되고 있으며 각각 일장일단이 있으나, 현재 보통 사용되고 있는 시험기는 (1) 정속긴장형(Suter형) (2) 정속하중형(Scotto형) (3) 정속신장형(Instron형)의 3가지로 대별되며, 저항선, 변형계를 작용응력의 검출에 이용한 (3)의 형식이 정도 및 내구성에 있어서 가장 우수하고 취급, 정도검정이 쉬운 점 등의 장점이 있어서 널리 쓰이고 있다.

동일품종에서도 섬유는 완전탄성체가 아니기 때문에 변형에 대응하는 응력에는 시간적 인자가 영향을 미칠 뿐만 아니라, 섬유의 이력(fibre history), 시험기구, 방법 등에 따라 그 결과도 다르게 된다. 측정조건 및 시험방법 등은 JIS나 ASTM 등에 규정되어 있으나 측정목적에 따라 임의로 바꿀 수 있음은 물론이다.

방직섬유(Textile Fibre)는 방적공장에 들어가서부터 그 제품이 수명을 다 할 때 까지의 과정에서 수시로 크고 작은 힘(외력)들을 받게 되며 그 때는 그 힘에 대응하는 변형을 일으키게 된다. 따라서 섬유의 Tensile Property를 비롯한 Tensile Recovery 등의 기계적 諸性質이 방적공장 및 이로 만든 포의 특성에 크게 영향을 미치게 된다는 것은 주화의 사실이다.

본문은 방직섬유의 기계적 제성질중 하중-신장곡선의 수량적 해석을 위한

Parameter에 대해 알아보고, Polyester fibre의 Single Test를 중심으로 Curve의 실례와 변화양상에 대해 개략적으로 알아보고자 한다.

2. 섬유의 하중-신장시험 및 그 결과의 표시

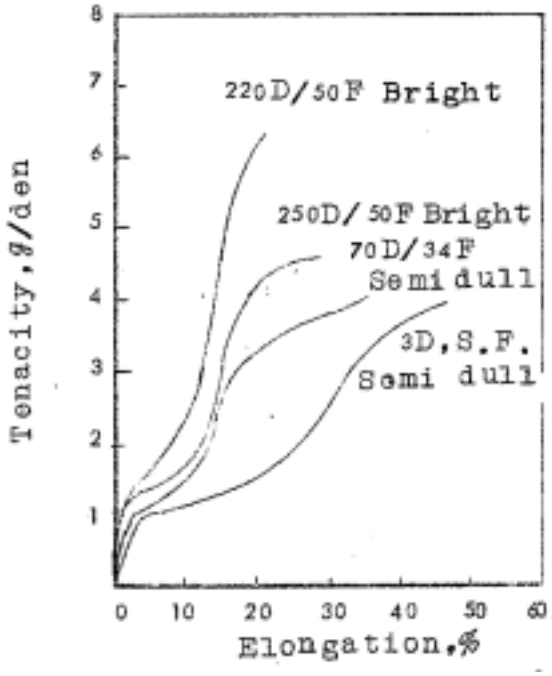
2.1 하중-신장시험

섬유의 하중-신장시험결과는 상호 비교평가될 수 있어야 하며, 따라서 여러 가지 다른 시험방법, 다른 시험기구 또는 다른 조건하에서 얻어진 Data는 평가하기 곤란하게 된다. 일반적으로 시험결과에 영향을 미치는 요소들을 보면 (1) 섬유의 Type 및 시료의 Type(장섬유, 단섬유, 사 etc.) (2) 섬유의 이력(Fibre history ; 권축, 연수, 화학처리 등) (3) 시험기구(시험기형식, clamp type 기록계의 감도 등) (4) 시험조건(공기, 물 등의 Test Medium) (5) 시험방법(실의 전처리, 길이, 신장 또는 하중율, 시료수 등) 등이 있으며 이들은 엄격히 선정, 통제되어야 한다.

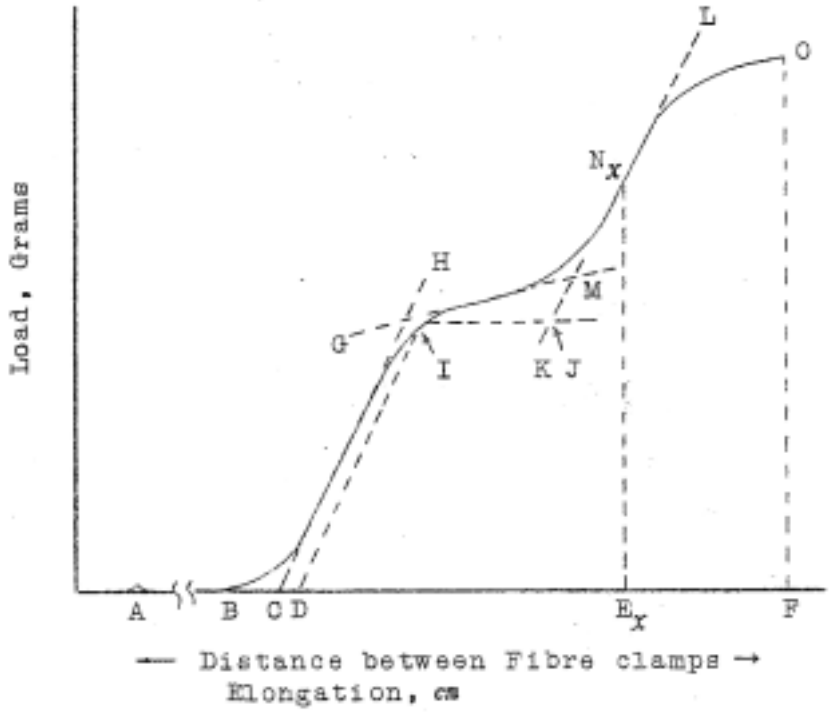
Single fibre Test의 경우 Single Fibre가 절단될 때 까지의 변형에 대응하는 미소한 하중에 대해 고도의 감도 즉, 최소한 0.05g 정도는 쉽게 검출될 수 있어야 하며 구체적으로 시험조건을 설정할 때는 상기의 여러가지 요소를 고려하여 (1) 시료장(Length of Fibre) (2) 신장속도(Cross-head Speed) (3) Full Scale Load (4) Chart Speed 등을 절절히 선정하여야 되며 이 때는 JIS(L1069, L1070, L1071, L1073등) 나 ASTM (D540, D1906등)등 각종 규격을 참조할 필요가 있게 된다.

2.2 결과의 표시

Polyester 섬유의 하중-신장곡선의 예를 보면 <그림 1>과 같이 전형적인 점탄성 뮬질의 거동(Viscoelasctic Behavior)을 나타낸다.



<그림 1> Stress-Strain Curves of Polyester(20℃, 65%)



<그림 2> Stress-Strain Curve Parameters

Curve의 응력(Stress 또는 Tenacity) 축은 하중표시로 Dynes 또는 gram중량으로 표시되나 섬유에서는 상호 비교를 위하여 단위 중량으로 나눈 값 즉, g/Den g/Tex등 Specific Stress로 환산하여 사용하는 것이 편리하다. 변형축은 cm 또는 %로 표시된다.

Curve의 거동을 분석하기 위해 구체적으로 각 Parameter를 수치화시키는 일은 매우 중요한 일이며 <그림 2>의 기호를 기준으로 하면 다음과 같이 정의될 수 있다.

(1) 점 A : Instron Fibre Clamps 사이의 Zero Distance점

(2) 선 AB : Crimped fibre의 길이

(3) 점 C : Estimated Zero Elongation

(4) 선 AC : 외삽법에 의한 Uncrimped Length의 추정치

(5) 선 CE_x : Fibre의 임의의 신장

(6) 선 CF : 절단될 때 까지 늘어난 길이

(7) 선 CH : Line along the initial “Straight Line” Portion of the S-S Curve BN_xO

(8) 선 N_xE_x : 임의의 신장 CE_x까지 늘리는데 요하는 하중

(9) 점 O : 절단점

(10) 선 OF : 절단하중

(11) 절단강도, g/den = $\overline{OF}$/섬도(den)

(12) 절단신도, % = $\overline{CF}/\overline{AC}\times 100$

(13) Initial Modulus, g/den = Slope CH = Stress(g/D)/%

Extension$\times 100$ = ($\overline{N_xE_x}$ /섬도)/ $\overline{CE_x}$ / $\overline{AC}$

(14) Post Yield Modulus, g/den = slope GM = {($N_{x1}E_{x1}$-$N_{x2}E_{x2}$)/섬도}/{CE_{x1}-

$CE_{x2}\}/\overline{AC}$

(15) Yield Point : 여러가지 방법

(16) Reinforcement Modulus와 Displacement

(가) Reinforcement Modulus, g/den = Slope LK

(나) Reinforcement Modulus Displacement, % = 1% 신장시의 점 D에서 선 $\overline{CH}$에 평행하게 그어 Curve와 만나는 점 J와의 거리, 즉 $\overline{IJ}$ 의 % 표시 = $(\overline{IJ}/\overline{AC})\times 100$

(17) Energy to Rupture(Toughness), g-cm/den-cm = Curve Bn_xO F의 면적/(섬도 $\times \overline{AC}$)

(18) 임의신장 x에서의 강도, g/den = E_xN_x/섬도

(19) Work Factor = 파단일양(Work to Break)/ $(\overline{OF}\times\overline{CF})$

(20) Compliance Ratio (순응율) = $\frac{1}{5}(10/L_{10}-5/L_5)$ (단 L_{10}, L_5 = 10% 및 5% 신장시의 응력(g/den)

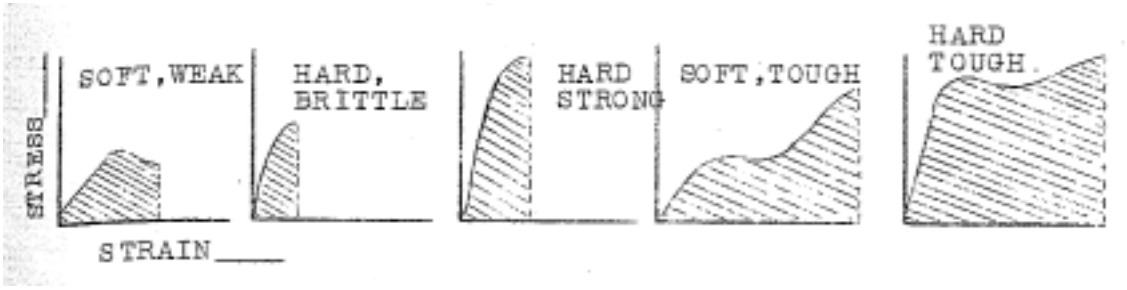
상기의 각 Parameter는 각각 고유의 의미를 가지고 있으며 따라서 평가목적에 따라 그 경중을 달리하게 된다. 예를 들면 절단강도는 rope의 강력을 절단신도는 Weaving에서의 Warp. Evergy는 Parachute의 Shock에 대한 저항성을 잘 대표할 수 있는 점이다.

3. 곡선의 평가

하중-변형-시간 관계는 궁극적으로는 Rheology 분야이므로 여기서는 외력에 의한 변형(회복제외) 실용적, 역학적 성질만을 논의해 본다.

Alfrey는 모든 물질을 그 Curve의 형태에 따라 (1) Soft, Weak (2) Hard, Brittle

(3) Soft, Tough (4) Hard, Strong (5) Hard Tough로 크게 유형별로 구분하여 다음과 같이 말하고 있으며 그것을 graph로 나타내면 <그림 3>과 같다.



<그림 3> Stress-Strain Curves for Different Types of Material

(1) Soft ,weak material : low modulus, low yield point, low elongation at rupture

(2) Hard, Brittle material : High modulus, No well defined yield point, low elongation at break

(3) Hard, Strong material : High modulus, High Yield point, Moderate elongation

(4) Soft, Tough material : Low modulus, Low yield point, High elongation & Stress at Break

(5) Hard, Tough material : High modulus, High yield point, High elongation & Stress at Break

물론 어떤 방직섬유에 대해서도 상기와 같은 종류로 확실히 분류되지는 않지만 기계적 성질의 경향을 이해하는데 도움이 될 수 있다.

방직섬유의 기계적 성질을 평가하는데 있어서 소비자들은 일반적으로 절단강신도만을 중시하는 경향이 있으나 꼭 그렇지는 않다.

즉 면혼용 섬유의 경우는 절단강도보다는 오히려 10% 신장시의 응력이 더 Fibre의 Blending-efficiency에 영향을 준다.

따라서 섬유의 전 Curve의 거동에 대해 충분히 이해하는 것은 중요한 일

이며, Curve의 각 Parameter를 최종직물의 성질(EndUse Performance)과 관련시켜 보면 <표 1>과 같다.

<표 1> Relation of Stress-Strain Curve Parameters to Fabric

Parameter	Fabric Property
Modulus	Drape, Hand, Wash & wear
Yield	Wrinkling, Elastic, Shape reten
Post yield modulus	Reinforcing efficiency in blended
reinforcement modulus and displacement	fabrics and ease of large-Scale defomability of textile structure
Tensile rupture	Fabric processibility, Fabric strength
Energy to rupture	Fabric toughness; Resistance to Fatigue

방직섬유의 전형적인 S-S 거동에 대한 중요한 몇 가지 Parameter에 대해 알아 보면 다음과 같다.

가) 초기탄성영역(Initial Modulus Region)

crimp 제거 이후에 나오는 초기인장저항부분인 직선부분으로서 분자쇄간에 분자간의 2차 Bonding은 물론 분자쇄의 상호간보(interference)으로 인해 Stretch에 대해 강한 저항을 보인다.

이 영역에서는 분자쇄의 주변위(main Displacement)는 나타나지 않으며 Short Chain Segment들이 섬유미세구조에 있는 이중가능한 “holes”로 움직이는 결과로 변형이 일어나게 된다.

이 低변형영역에서 섬유가 Deformation에 저항하는 크기 즉 $E = d\sigma/d\varepsilon$ 가

Initial modulus로 되며 JIS에서는 최대경사를 취하도록 하고 있다. 단위는 보통 kg/㎟를 사용하지만 편의상 g/den, g/Tex를 사용하면 편리하다. 이들 관계는 kg/㎟ = (g/Tex). ρ = (g/den). 9. ρ 이다. (단 ρ : 밀도, g/㎤)

Stiffness란 g/den로 표시된 Young율로 생각해도 좋으며 실용상 1%신도의 응력을 사용하면 편리하다.

Young율의 크기는 Wool, Nylon, 등은 적고, Cellulose 섬유, 견, Polyester 등은 크며, 기타는 그 중간 정도로서 분자구조, 분자량, 결정화도, 배향도 등 섬유 내부구조에 따라 다를 뿐만 아니라 온습도 등 주위조건에 따라 변화하게 되며 그 개략치는 <표 2>와 같다.

<표 2> Tensile Properties of Textile Fibres

Properties / Fibers	den.	Breaking		initial modulus (%)	Work g.cm/d.cm	Tenacity		Compliance ratio
		Ten. (g/d)	Elong. (%)			3% Elong. (g/d)	5% Elong. (g/d)	
Cotton,								
Upland Deltapine	1.81	2.68	8.6	34	0.11	0.81	1.40	-
Egyptian	1.26	3.55	10.9	32	0.18	0.91	1.48	0.004
Wool,								
64'S Merino	4.39	1.02	22.0	19	0.18	0.68	0.75	0.964
Silk,								
13/15 Japan raw	1.23	3.85	17.4	91	0.44	1.87	2.19	0.206
Polyester,								
S.F., Semidull	3.27	3.84	45.3	43	1.03	0.84	0.98	0.750
Nylon,								
S.F., Semidull	3.31	4.09	61.3	17	1.62	0.36	0.48	0.090
Acryl,								
S.F., Semidull	3.20	2.40	25.7	49	0.41	1.08	1.17	0.564

Yong율의 크기는 Fibre, Yarn등을 취급하는 공정중의 장력등과 관계가 있으며 최종직물의 촉감(hand, 風合), Crispness, Drape등에 관계되는 중요한 성질이다.

나) 봉복점 (Yield Point)

봉복점의 봉복응력(Yield Stress)은 그 재료의 영구변형(Permanent Deformation)에 대한 저항성을 나타내는 値이다. 이 점에서는 개개의 분자가 작용된 응력에 의해 분자간인력을 극복하고 서로 미끌어질 수 있는 최소한의 Potential Energy가 요구되며, 두 Chain을 함께 Holding하고 있는 Local Attraction(보통 ionic, Polar, 또는 Van der Waals)의 힘을 이겨 낼 수 있는 최소한의 Energy가 적용될 때 나타나는 현상으로 탄성한계를 벗어나게 되는 분기점이 된다.

이 봉복점은 Curve가 Sharp한 곡선(Inflection)을 보이지 않을 때는 정하는 방법에 따라 크게 차이가 있으므로 일정한 방법의 선택이 필요하다.

그 대표적인 방법은 다음과 같다.

(1) Meredith 방법 : 원점과 Breaking Point를 연결한 직선에 평행한 선을 Curve에 접하도록 그어 만든 접점<그림 4 (a)>

(2) Copolan의 방법 : 초기탄성부분의 접선과 봉복점 이후부분의 접선과 만나는 점을 Yield Stress로 한 점<그림 4 (b)>

(3) 1% Extension Method : 1% 신장점에서 초기탄성부분에 평행하게 그은 선이 Curve와 만나는 점<그림 4 (c)>

(4) 기타 : <그림 4-(b)>에서 점 A(탄성한계점) 또는 B

봉복응력을 초과하는 외력은 영구변형을 남기는 원인이 되며 따라서 최종제품의 잔류름, 탄성거동, 형태안정성, Pleat보지성 등과 관계됨은 물론이다.

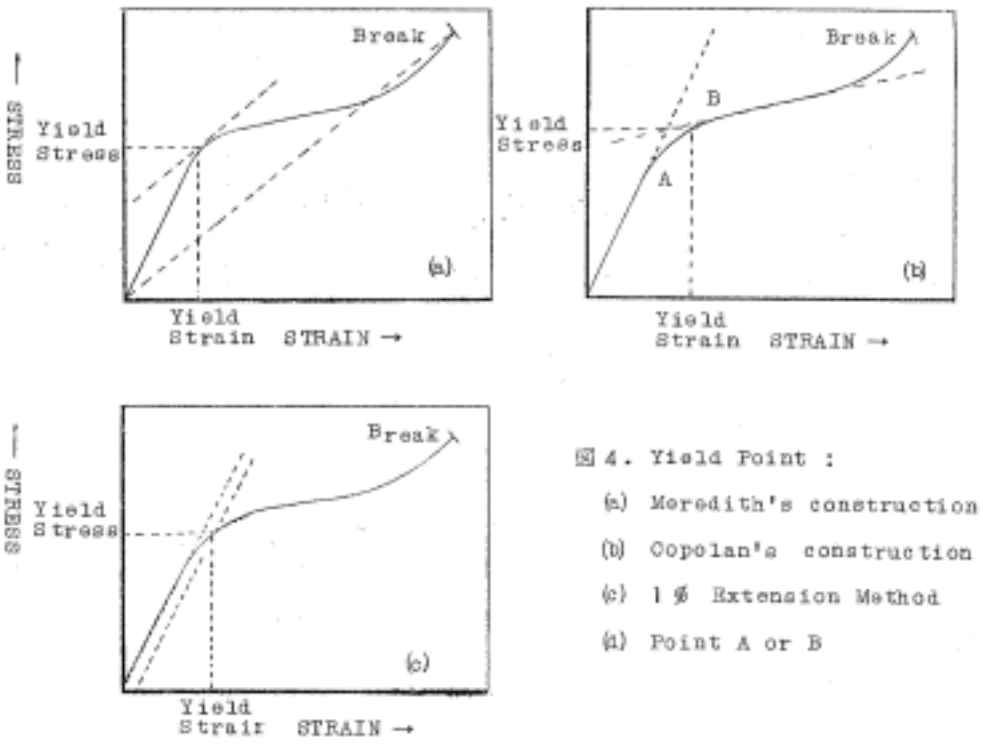


図 4. Yield Point :
(a) Meredith's construction
(b) Copolan's construction
(c) 1 % Extension Method
(d) Point A or B

<표 2>에는 Yield Stress 및 Strain 대신 1%, 3% 신장시의 강도를 적었다.

다) 파단일량(Work to Break or Energy to Rupture)

Curve 하의 면적계산에 의해 g-in/Tex-in 또는 g-cm/den-cm로 나타낸 것으로서 1D, 1cm 섬유의 破斷일量으로서 Toughness라고도 부르며 <표 2>에서 보는 바와 같이 넓은 범위에 걸쳐 있다. 이는 Square Counting 이나 Planimeter 등의 자동연산계로 계산되며 섬유의 기계적 내구성과 비교적 관계가 깊다.

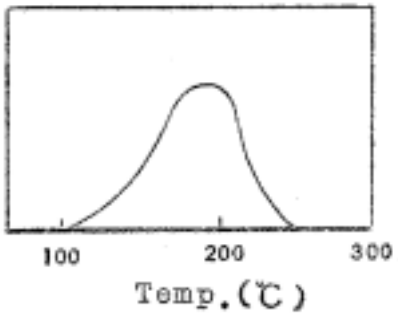
이상의 Parameter 외에도 최종직물의 강신도에 영향을 주는 절단강신도, 초기탄성이후의 Curve의 Bending성을 표시하는 Comliance Ratio등 저 Parameter가 Curve의 특성을 이해하는데 크게 도움이 됨은 물론, Fibre의 제조, 방적공정, 직포, 염색등의 후처리, 섬유기계의 설계 등의 기초로 되지만 아직 그 이용도는 충분치 못하다. 그러나 최근 합성섬유의 혼방에서는 전형태의 하중-신장곡선의 평가로부터 혼방효과를 판정하여 섬유개질방향의 지침으로 삼고

있다.

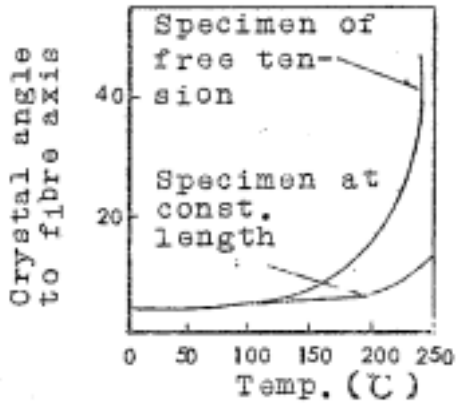
4. S-S Curve의 실례와 변화

4.1 제조조건에 의한 영향

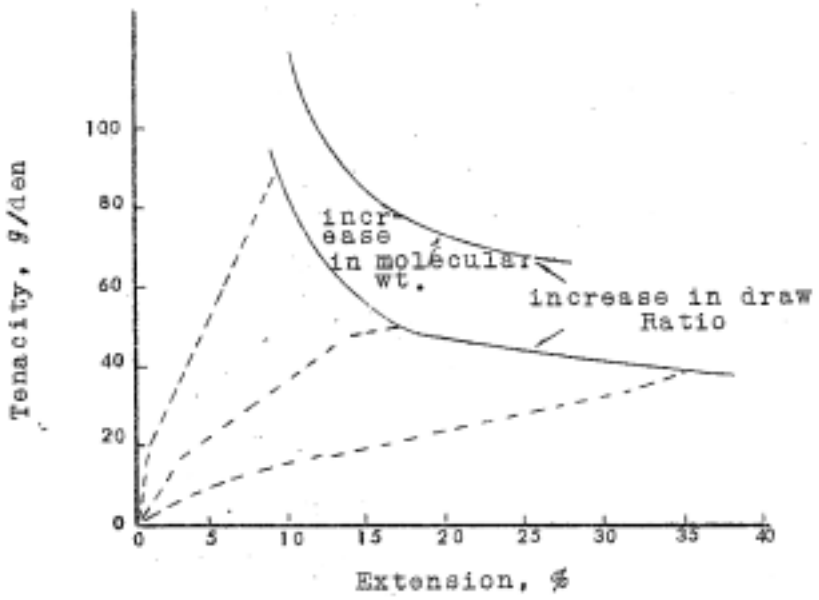
합성섬유에서는 동종의 섬유라도 그 중합도, 배향도, 결정화도 등 내부분자구조가 달라짐에 따라 기계적 성질도 변화됨은 주지의 사실이다. PET 섬유의 결정화도와 배향도에 대한 처리온도의 영향은 <그림 5>, <그림 6>과 같으며 결정화도는 또한 열처리를 받기 전의 섬유축에 대한 분자의 배향상태(전배향) 및 열처리대의 장력에 따라 달라지게 된다.



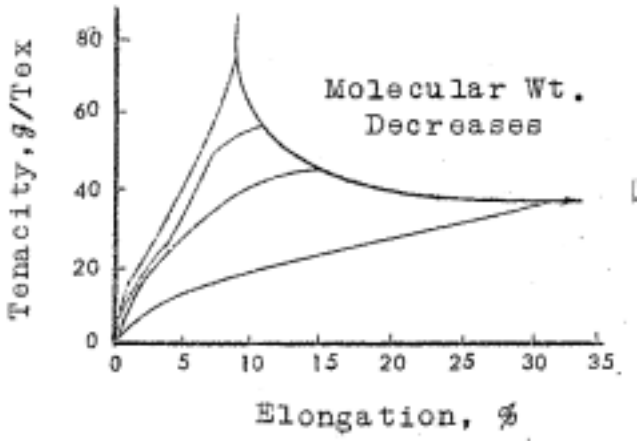
<그림 5> Crystallinity-Temp. relation ship



<그림 6> Orientation-Temp. relation ship



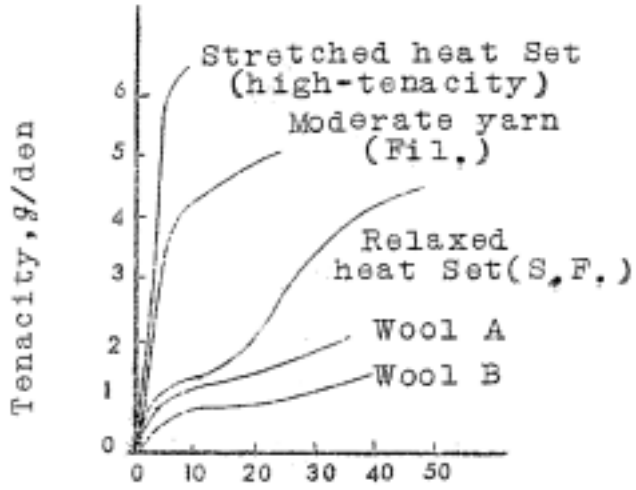
<그림 7> Locus of Stress-Strain Values for varying draw ratio and Molecular weight



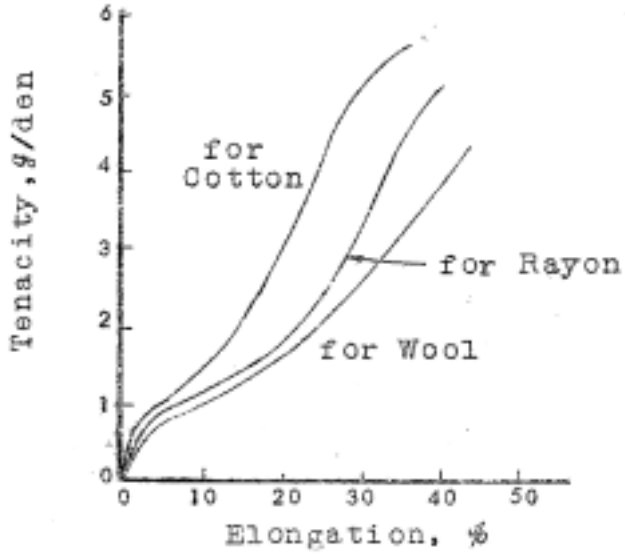
<그림 8> Stress-Strain Curves for Various Molecular Weight

<그림 7>은 분자량 및 연신배율의 변화에 따른 Curve의 변화상태를 <그림 8>은 분자량 변화시의 Curve의 경향을, <그림 9>는 열처리시 장력변화에 따른 Curve의 차이에 대해 PET Fibre의 경우를 예로 하여 본 것이며, 인조섬유 maker는 이러한 성질을 이용하여 용도에 따라 각각 다른 Type의 섬유를 설

계, 제조하게 된다. 그 예로 폴리에스터 스테이플 화이버(Staple Fibre)의 경우 용도별로 면(cotton)혼용, Rayon혼용, 모혼용 등으로 구분 제조되며 그 대표적인 Curve의 형태는 <그림 10>과 같다.



<그림 9> effect of tension on Stress-Strain curves of PET



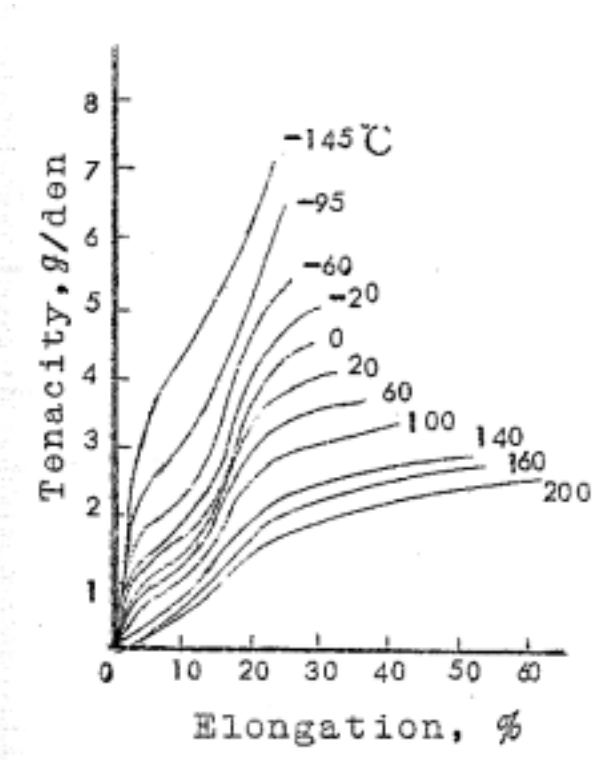
<그림 10> Stress-Strain Curves for various uses of Polyester Staple fibre

4.2 외부 요소에 의한 영향

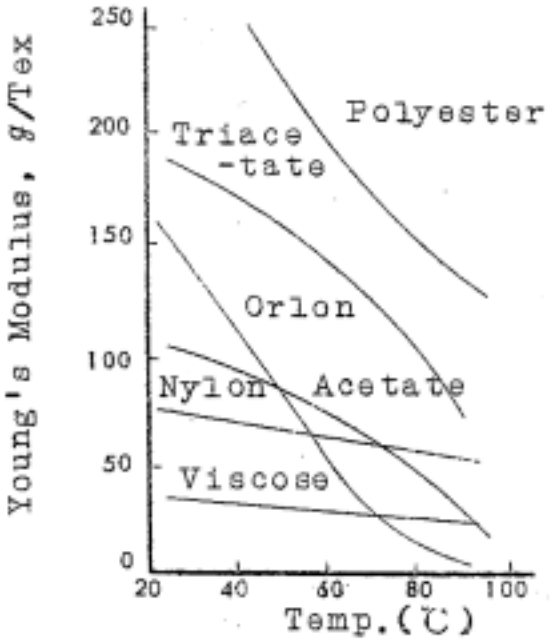
가) 온도의 영향

온도의 상승에 의해 섬유구성 쇄분자의 운동이 활발해 지고 합성섬유에서는 특히 2차전이점을 넘으면 분자 상호작용의 급격한 감소를 보인다. PET Fibre 경우도 <그림 11>에서 보는 바와 같이 타 섬유와 비슷하게 온도의 증가에 따라 강도의 저하, 신도의 증가를 보이며, Young율 및 Yield Stress의 감소 <그림 12>, <그림 13>, <그림 14>를 보인다.

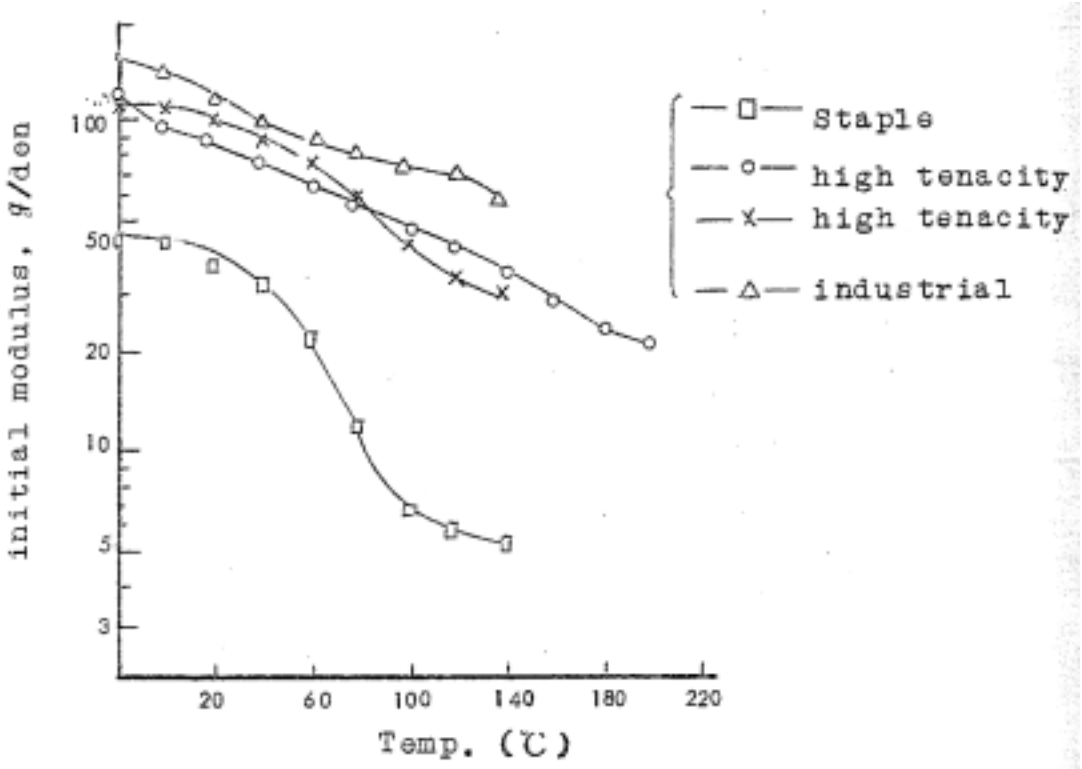
Young율의 2차 전이점(Polyester의 경우 결정상태에서 81℃)근처에서 급격히 저하하는 것은 주목할 만한 일이며<그림 14> 이는 Filament보다 적은 배향, 큰 결정화도를 가진 Staple Fibre의 성질을 이해시키고 있다.



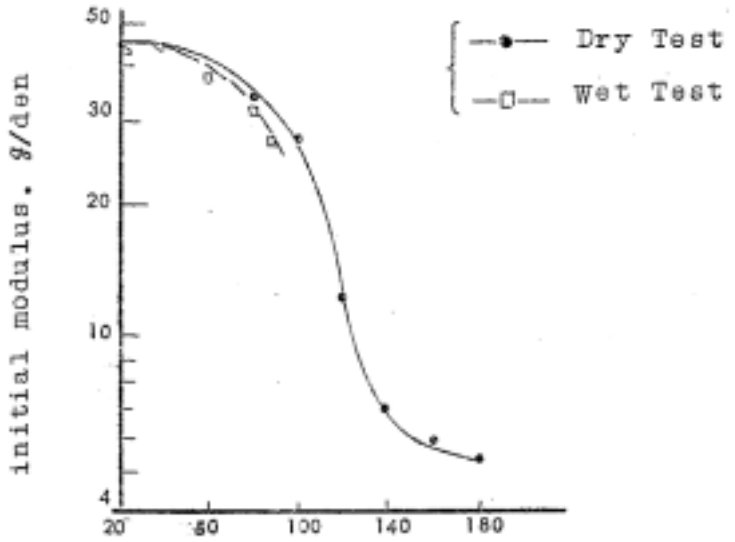
<그림 11> Stress-Strain Curves for various uses of Polyester Staple Fibre



<그림 12> Change in initial modulus of wet fibres with tempexature



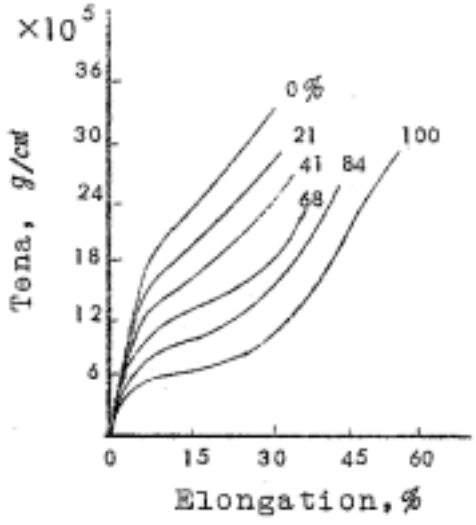
<그림 13> Modulus-Temp. relationship of Polyester fibres tested dry



<그림 14> Initial Modulus-Temp relationship of Polyester S.F.

나) 습도의 영향

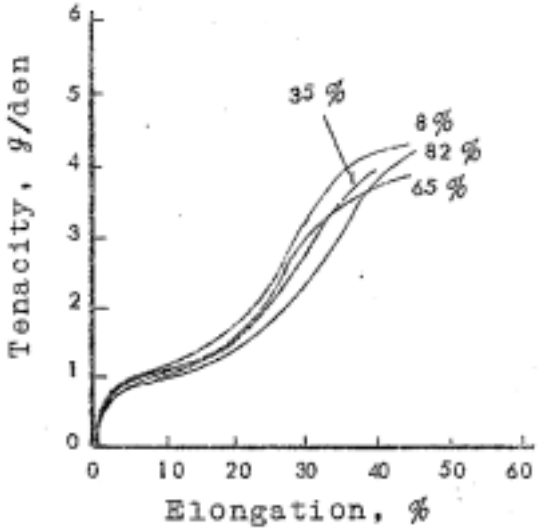
소수성분자로 구성된 섬유에서는 거의 습도의 영향은 나타나지 않는다. 그러나 친수성 섬유에서는 2차결합형성부분의 파괴가 일어나고 가소제적인 효과를 현저히 나타낸다. 친수성 섬유의 일종인 양모의 하중-신장곡선의 습도의존성의 예는 <그림 15>와 같다.



<그림 15> Effect of Humidity on S-S curves of Wool

습도가 증가함에 따라 Young율 및 Yield Stress가 감소하며 절단신도가 증가하고 파단일량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

한편 Polyester의 습도에 대한 영향은 거의 나타나지 않고 있다. <그림 16>



<그림 16> Effect of Humidity on Stress-Strain Curves of PET

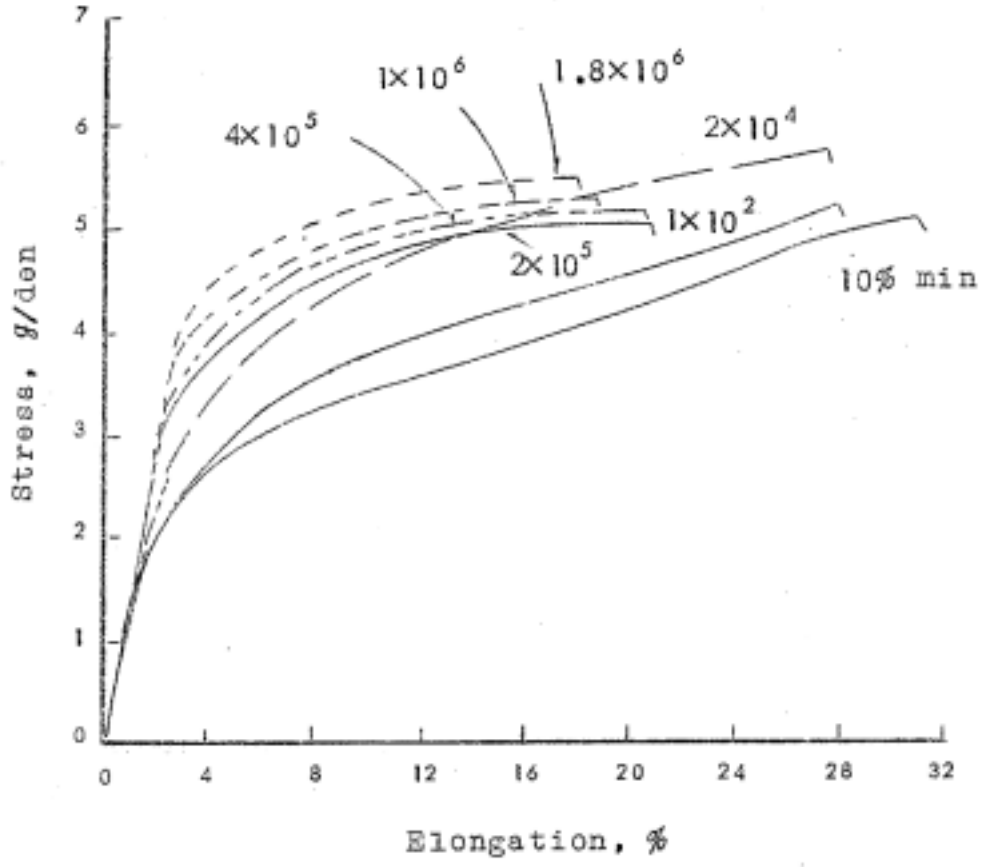
다) 인장속도의 영향

방적섬유에서는 일반적으로 변형속도가 증가하면 주어진 변형에 대응하는 응력치는 접차 증대하고 절단신도는 약간 감소하는 반면 절단강도는 현저하게 증가함으로써 파단일량이 증가되는 경향을 보인다. Polyester의 경우도 변형속도의 증가에 따라 Young율 및 Yield Stress가 증가하는 점은 타섬유와 비슷하나 눈에 띌 만한 강도변화가 없으며 파단일량의 큰 감소가 있는 점이 특징이다.

라) 인장형식의 영향

시험기의 인장형식에 의해 하중-신장곡선은 그 형태를 달리한다. 속도가

일정한 경우(C.R.E)와 하중이 일정한 경우(C.R.L.)의 대표적인 차이를 보면 <그림 17>과 같다. 이 현상은 변형중의 Creep의 영향을 고려하면 쉽게 이해될 수 있을 것이다.

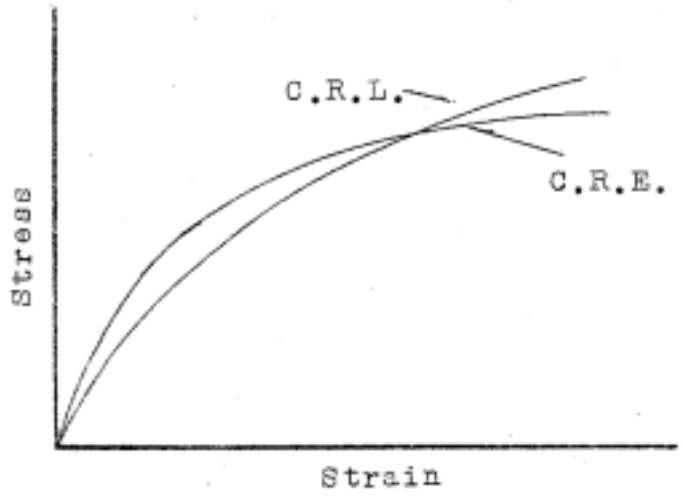


<그림 17> Stress-Strain Curves of Textile Polyester filament at Various Strain rates

지금까지 방직섬유의 하중-신장곡선 해석을 위한 접근방법으로 Curve의 형태를 여러가지 Parameter로 분류, 수치화하는 방법에 대해 알아 본 후 이들 Parameter가 방적공정 및 최종직물의 물성과 어떤 관계가 있는가를 살펴보았다.

섬유의 기계적 저성질이 방적공정이나 직물의 물성에 크게 영향을 미치리

라는 것은 충분히 예견되고 또 구체적으로 구명된 바 적지 않지만, 한편 매우 복잡하고 까다로운 직물의 Behavior와 이를 구성하고 있는 Fibre의 물성과의 관계를 명확하게 파악하여 각 공정이나 용도에 충분히 이용한다는 것은 매우 어려운 일이다.



<그림 18> Difference between Const-rate-of-loading(CRL)and cont.-rate-of-elongation(CRE)Curves

그러나 인조섬유의 경우 분자내부구조 및 섬유형성과정의 Mechanism이 점차 밝혀짐으로써 이를 Fibre의 제조공정, 방적공정, 용도 등에 크게 활용하기에 이르고 있다.

문헌에서 예로 든 Polyester Fibre는 높은 강신도, 높은 Young율 및 Yield Point, 양호한 탄성적 성질 등 우수한 기계적 성질을 가지고 있을 뿐만 아니라 주위의 온습도 영향에 대해서도 대체로 안정성을 보이고 있다. 이는 직물에서 방추성(Wrinkle Resistance), 형태안정성, Pleat 보지성, W&W 성 등 우수한 물리적 성질을 갖게 하는 단면, Hand, Pilling등 문제점의 원인이 되기도 한다.

Fibre의 하중-신장거동을 이해하는 일이 최종직물의 물성을 아는데 도움이

되었으면 한다.