

필링 발생기구에 관한 역학적 모형

본고는 Journal of the Textile Institute 1974년 3월호에 게재한 W. Conti and E. Tassinari씨가 쓴 “A Simplified Kinetic Model for the Mechanism of Pilling”을 옮긴 글이다.

1. 서 언

Pilling은 스프직물에서도 존재하기는 하지만, 이것이 심각한 문제가 된 것은 합성섬유가 개발된 이후이다. 문헌에 의하면, Pilling의 발생 및 마모기구는 다음의 3단계로 나눌 수 있다.

(a) 물리적 작용에 의하여 섬유가 직물의 표면에서부터 당겨져서 잔털을 형성한다.

(b) 잔털이 엉켜서 Pill을 형성한다.

(c) 물리적 작용이 계속됨에 따라 Pill이 마모를 받아 떨어져 나간다.

Pill의 형성에 관련한 연구는 상당히 많으며, 이러한 연구에 의하여 잔털의 형성은 섬유간의 마찰력과 섬유의 강경도(bending stiffness)가 중요한 요인이라는 것과 잔털이 엉키는 경향은 섬유의 선밀도, 단면형태 및 강경도와 밀접한 상관관계가 있다는 것 및 pill의 마모는 마찰강력과 강경도 및 flexlife에 따라 달라진다는 것이 알려졌다. 또한 Pill의 형성 및 마모과정을 유추할 수 있는 모형 및 장치에 관한 연구도 있다.

이러한 연구에서 pill의 거동을 설명하는 가장 일반적인 방법은 “pill곡선” 즉, 외부의 물리적 작용시간에 따른 단위면적 당의 pill 수 또는 pilling정도였

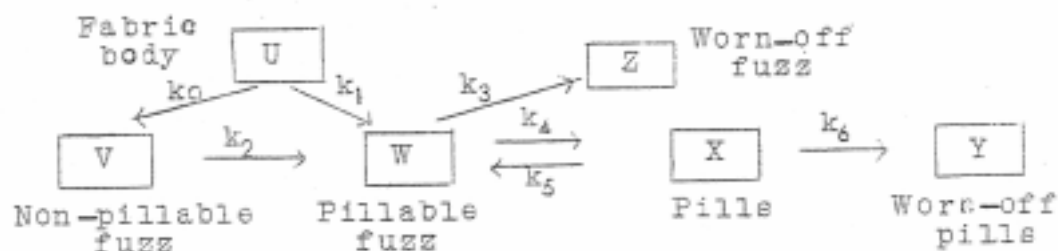
다.

특히 Brand와 Bohmfalk가 제안한 수학적 모형은 pill곡선의 3 단계를 별도로 설명하기는 하지만, 매개변수가 7개로서 너무 복잡할 뿐만 아니라 판정의 일부가 비현실적이라는 잘못도 있다.

본 논고에서는 보다 단순화한 모형을 제시하기로 하며, 이 모형은 분석과정을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 이종직물의 평가와 각 단계별 평가에 적합하기도 하다.

2. 모 형

Brand와 Bohmfalk가 제안한 모형은 <그림 1>에 보인다.



<그림 1> Model of Brand and Bohmfalk

각 단계는 그 단계에서의 섬유 또는 pill의 수와 상수 K_j 에 따라 진행속도가 결정된다. 이 모형은 가능한 범위내에서는 가장 일반적인 것 같지만, 마모된 잔털(Z)이 Pill을 형성치 않는 잔털(V)에서도 일어날 수 있음을 간과한 것이다.

Gintis Mead(1)는 외력에 의한 마찰시간이 길어질수록 잔털의 발생량이 pill의 형성 및 마모보다 훨씬 빨리 증가하여 정점에 달한다고 말하고 있다. 그러므로 pill을 형성할 수 있는 잔털(W)이 Pill의 형성에 선행한다는 가정이 성

립하며 결과적으로 <그림 2>와 같은 모형을 예상할 수 있다.



<그림 2> Model Proposed by the authors

이 모형은 <그림 1>의 모형에 비하여 극히 단순화한 것이다. 3종의 역학적 상수와 초기의 pill형성이 가능한 잔털의 양(W_0)만이 포함될 뿐이다. K_1 은 잔털이 엉켜서 pill을 형성하는 속도를 말하며 K_2 는 Pill의 마모속도, K_0 는 엉켜서 pill을 형성하는 속도를 말하며, K_2 는 pill의 마모속도, K_0 는 엉켜진 잔털이 풀림으로써 pill이 그 존재를 소실하는 속도(η)를 가리킨다.

마찰작용이 연속됨에 따라 pill이 엉키는 정도가 커지며, 결과적으로 K_0 는 시간이 지남에 따라 감소한다. 이러한 가정을 도입하면, 복잡성을 피할 수는 없으므로, <그림 2>를 <그림 3>과 같이 바꾸었다.



<그림 3> Model proposed by the authors, equivalent to that of fig. 2

표준시간 동안에 나타나는 pill의 수로 직물을 표시하는 조작은 실용적으로는 적합하겠지만, 섬유의 pilling저항을 연구하는 데에는 부적합하다. 상수 α 는 pill의 형성율이며, ω 는 pill의 마모율이다. 초기의 pill형성이 가능한 잔털

(W_0)은 시험 동안에 발생한 pill의 수로 측정할 수 있다. 그러므로 W_0 는 pill의 수로 볼 수 있다.

이상의 고찰로부터 <그림 3>의 단순화한 모형에 관하여 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

(a) pill형성이 가능한 잔털은 pill이 형성되기 전이나 마모되기 전에 식물에 존재한다. 즉, W_0 는 일정한 상수이다.

(b) 잔털의 마모는 중요하지 않다. 중요한 것은 pill을 형성할 수 있는 잔털이다.

(c) pill의 형성을 α 및 마모율 ω 는 pilling곡선이 유효한 한 상수이다. 이것은 영킨 pill이 풀어지는 것은 유의하지 않으며, 단순히 상수라는 것을 의미한다.

다음과 같은 미분방정식은 위의 모형을 잘 표시하는 식이다.

$$W + \alpha W = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\chi + \omega \chi = \alpha W \quad \dots\dots\dots (2)$$

단, W 는 잠재적 pill의 수로 표시된 잔털의 양이며, χ 는 pill의 수이다.

시간 0에서

$$W = W_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\chi = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

이다.

조건 (3)과 (4)에서 (1)과 (2)를 적분하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\chi = A \{ \exp(-\omega t) - \exp(-\alpha t) \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

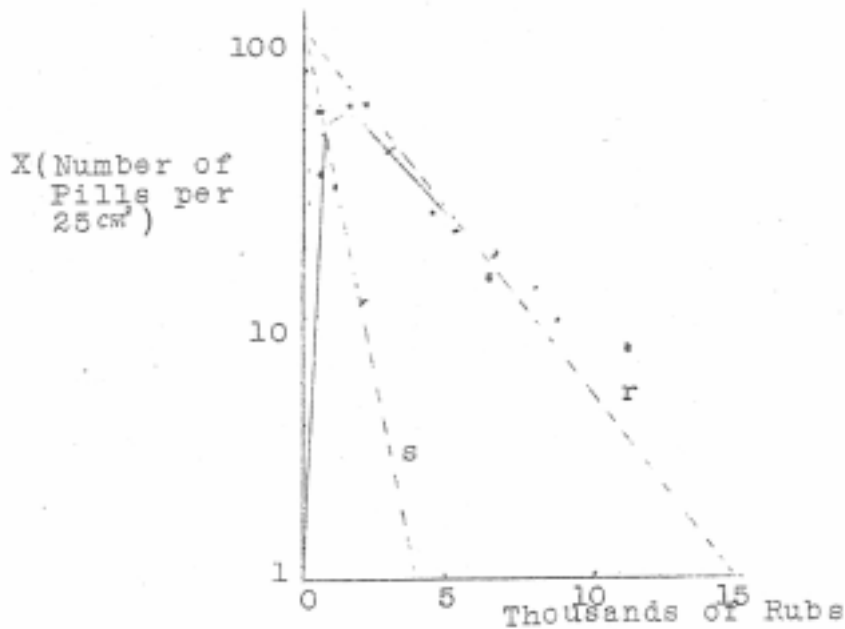
$$\text{단, } A = W_0 \alpha / (\alpha - \omega)$$

식(5)와 동일한 형태의 식은 <그림 2>의 모형에서 유도할 수도 있다. 그러므로 식물의 pill곡선에 관련하여 <그림 2>와 <그림 3>의 모형은 동일한 결

과를 zoom을 알 수 있다.

3. 매개변수의 계산

pill곡선을 식(5)로 표시할 때에는 시간 t 에 대한 $\log \chi(t)$ 는 αt 가 충분히 클 경우에는 직선에 접근할 것이다. 직선의 기울기는 $-\omega/2.3$, 절편은 $\log A$ 가 된다. <그림 4>의 시료에 관하여 $\log \chi(t)$ 를 시간 t 에 따라 그릴 경우 직선(γ)은 거의 pill곡선에 접근하며, 이로부터 ω 와 A 를 계산할 수 있다.



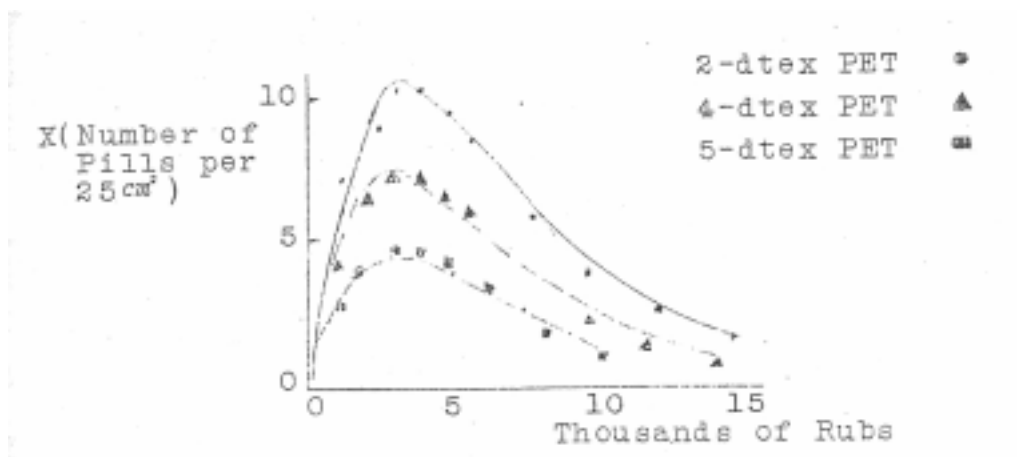
<그림 4> An example of the calculation of the parameters of Equation(5) in the case where $\alpha > \omega$ (Albrecht's experimental data 4, Fig. 8, hollow-section sample)

식(5)는 다음과 같이 쓸 수도 있다.

$$A \exp(-\omega t) - \chi(t) = A \exp(-\alpha t)$$

시간 t 에 따른 $\log\{A \exp(-\omega t) - \chi(t)\}$ 는 직선 S에 접근한다. 이 직선의 기울기는 $-\alpha/2.3$ 이며, 절편은 직선 γ 과 동일하다. <그림 4>와 <그림 5>의 곡선은

실험결과로 구한 상수를 사용하여 식(5)로 계산하여 그릴 수 있다. 이러한 조작은 α 가 ω 에 비하여 충분히 크고 동시에 시간 t 도 충분히 크면 쉽게 적용할 수 있다. α 가 ω 보다 충분히 크지 못할 때에는 $A \exp(-\omega t) - \chi(t)$ 의 값은 직선을 그리지 않는다. 이 경우에는 시행착오를 되풀이 하여야만 직선 γ 을 찾을 수 있다.



<그림 5> Some of Grunewald's experimental data(the curves are computed from the model Equation(5) by using the values of ω_0 , α , and $-\omega$ derived from experimental data)

식(5)는 $\alpha \neq \omega$ 일 때에만 가능하며, $\alpha = \omega$ 이면

$$\chi = \alpha W_0 t \exp(-\alpha t)$$

가 된다. 이 식은 α 와 ω 가 유사한 값일 때에는 근사치로서 유용하다. α 와 W_0 는 시간 t 에 따라 $\log\{\chi(t)/t\}$ 를 그려서 직접 구할 수 있다.

Pill곡선의 시간이 충분히 길지 않을 때에는 이상의 조작을 역으로 하여 분석할 수 있다. $\chi(t)$ 가 서서히 감소하는 현상은 바로 ω 가 α 보다 훨씬 낮다는 것을 의미하며, 결과적으로 짧은 시간 범위에서는

$$\exp(-\omega t) - 1$$

이 되며, 식(5)는

$$A - \chi(t) = A \exp(-\alpha t)$$

로 된다. 시행착오 방식으로 A의 값을 구한 다음에 $\log(A - \chi)$ 를 시간 t에 따라 그린 그래프는 절편이 $\log A$ 인 직선이 된다.

적합도를 알기 위하여 다음과 같은 검정을 행한다.

$$\alpha = \left\{ \frac{\sum (\chi_i - \bar{\chi})^2}{N-3} \right\}^{\frac{1}{2}} / \frac{\sum \chi_i}{N}$$

식에서 χ_i 는 주어진 시간 t에서 측정한 pill의 수, $\bar{\chi}$ 는 식 (5)로 구한 계산치, N은 측정치의 수이며, 자유도는 N-3이 된다.

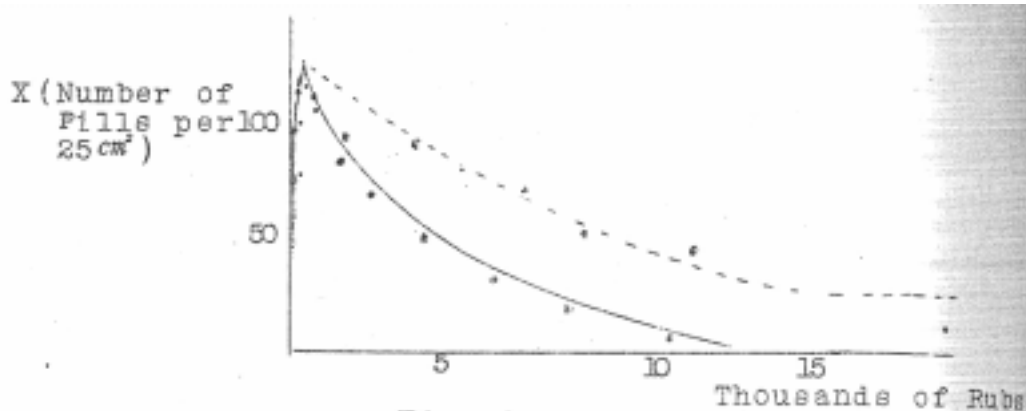
분모는 pill의 수 χ_i 의 평균으로서 실험치 간의 비교를 하기 위하여 도입한 양이다. <그림 5>의 예에서 α 는 0.2이하였다. α 의 값으로 실험결과가 이론치 근처인지 어떤 조직적인 차이가 보이는지를 알 수는 있지만 시각적으로 그래프에서 직접 이상의 여부를 판정할 수도 있다. 즉 α 가 0.2 이하인 <그림 5>에서 시각적으로도 계산으로 구한 곡선이 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

4. 실험결과

본 모형을 검정하기 위하여 여러 문헌에서 적합한 pill곡선을 찾는 것도 용이하지만, 본고에서는 별도의 실험을 행하였다.

단면형태가 원형인 것과 3각형인 2종인 PET 방적사(섬유장 94mm, 섬도 3den)를 선정하여 방출하였으며 변수와 연계수는 각각 29tex, 85였다.

이렇게 방출한사를 사용하여 24-gauge 원형편기로 Plain jersey를 만들었으며, 중량은 약 140g/m²로 하였다. 염색가공은 표준방법에 의하였다.



<그림 6> The present authors' experimental data for circular-section and trilobal-section PET fibre (curves calculated on the basis of Equation(5))

<표 1>

	W_0		α		ω		σ
	Units	Value	Units	Value	Units	Value	
Thimm ²							
Trevira 330	Grade	19	hr ⁻¹	1.42	hr ⁻¹	1.42	0.09
360		12		1.84		1.84	0.10
8621		2.5		3.20		3.20	0.20
Brand and Bohmfalk ⁶	Number						
PET fibre (Table II)	per 25cm ²	42	min ⁻¹	0.073	min ⁻¹	0.011	0.17
Albrecht ⁴							
Diolen (standard)	Number	230	10 ³ /turns	0.25	10 ³ /turns	0.14	0.09
Hollow-section Diolen	per 25cm ²	130		1.28		0.33	0.01
FL		67		3.23		0.32	0.07
X1		49		7.9		0.50	0.04
Grünwald ^{3,5}							
Round-section PET fibre		16		0.43		0.21	0.10
Trilobal-section PET fibre		14		0.35		0.27	0.11
Pentalobal-section PET fibre		8.5		0.44		0.34	0.16
2-dtex PET fibre		20		0.45		0.21	0.16
4-dtex PET fibre		14		0.52		0.22	0.14
5-dtex PET fibre		12		0.34		0.34	0.20
Authors' data							
Round-section PET fibre		132		8 *		0.09	0.2
Trilobal section PET fibre		145		8 *		0.23	0.10

* Approximate values.

Pilling 시험은 ASTM에 준하여 Schiefer장치를 하용하여 pill이 완전히 마모 될 때까지 행하였다.

<그림 6>에 실험결과를 보인다. Thimm Albrecht 및 Grünewald의 실험결과를 동일한 방법으로 분석하였으며, 이의 결과는 <표 1>에 보인다.

5. 실험결과의 검토

Thim에 의하면, pilling방지가공을 한 경우에는 pill의 수(W_0)는 낮아지지만, pill 형성율(α)은 커지며, 더욱이 형성율(α)과 마모율(ω)이 같아진다.

Albrecht에 의하면, pilling저항은 주로 W_0 와 α 에 좌우되지만 ω 도 상당한 관계를 갖고 있음을 보이고 있다.

Grünewald의 연구결과에 따르면, 단면형태를 수정함으로써 pill의 수(W_0)는 상당한 영향을 받지만 마모율(ω)은 거의 영향을 받지 않는다. 섬유의 직경은 pill의 수에는 영향을 주지만 기타 상수에 미치는 영향은 뚜렷하지 않기 때문에 이것은 당연하다.

단면형태가 미치는 영향은 본고의 실험결과에서도 명백하다. 즉 3각형 단면의 경우에는 마모율(ω)이 원형단면보다 마모율이 거의 3배나 높으므로 pilling저항성이 더욱 커진다.

6. 결 론

pill 곡선을 정의하는 데에는 본고에서 제안한 모형에 의한 W_0 (pill의 수), α (pill의 형성율) 및 ω (pill의 마모율)로 충분함을 보였다. 이들 3종의 매개변수는 pilling현상을 정확히 평가하여 필수적인 변수이다.

α 가 ω 에 접근한 값을 보일 때에는 본 모형의 적용에 제한이 따른다.