

<연구논문>

니들펀치 부직포의 역학적 성질에 미치는 섬유 크림프의 영향

정재호[†] · 이승구* · 강태진

서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과, *충남대학교 공과대학 섬유공학과
(1999. 2. 4. 접수)

Effect of Fiber Crimp on the Mechanical Properties of Needle Punched Nonwoven Fabrics

Jae Ho Chung[†], Seung Goo Lee* and Tae Jin Kang

Department of Fiber and Polymer Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Department of Textile Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

(Received February 4, 1999)

Abstract : The effect of crimp geometry on the mechanical properties of nonwoven fabrics of different punching densities was studied. The theoretical modulus of crimped fiber assembly was derived and the three factors that affect the contact behavior between fibers in nonwoven fabrics were specified. If the crimped yarn has the same volume and orientation density function as the flat fiber, the contact points were increased proportional to the square of the crimp ratio. The crimp in the yarn acts as the slip barrier, which results in the decrease in slip portion of contact points as well as the contact point load, and thus it results in the increase of the yarn modulus. The modulus of the needle punched nonwoven made with crimped fiber varied with the contact length of the fiber. As the contact distance between two adjacent fiber decreases, the effect of crimp diminishes. These factors generally increase the modulus of the nonwoven fabrics. Especially in bending properties, the increased crimp potential and number of contact points contribute to the increase in bending rigidity along with increasing thickness. Post treatment of the nonwoven fabrics after needle punching removes the residual moment in the nonwoven system and it helps the resilience properties of the nonwoven.

1. 서 론

부직포는 구성섬유를 제직이 아닌 물리, 화학적인 결합방법을 이용하여 집결한 섬유구조물을 말한다. 부직포는 제조방법에 따라 구성섬유간에 결합력을 부여하는 방식에 따라 니들펀칭(needle punching), 방사결합(spun bonding), 용융분사(melt blown), 및 화학결합(chemical bonding) 부직포 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서 니들펀칭 방법은 섬유집합체인 웹(web)을 상하왕복운동을 하는 바늘 사이로 통과시켜 바늘이 섬유집합체를 관통하면서 발생하는 섬유간의 엉킴과 마찰을 통하여 결합력을 갖게하는 방법이다.

19세기 후반부터 시작된 니들펀칭은 방적공정에서 발생하는 낙면이나 화학섬유들을 경제적으로 부직포로 만드는 방법으로 이용되었으나 그 후, 계속된 원료물 질과 생산공정, 장치의 발달로 인해 섬유 제품뿐 아니라 산업용 보강재, 의료분야, 필터용 및 우주 항공분야와 군사분야 등에까지 광범위하게 이용되고 있다. 특히, 폴리에스테르 섬유를 이용한 니들펀치 부직포는 제조공정성이나 비용 등의 면에서 다른 섬유로 만든 부직포보다 장점이 많아서 고밀도 펠트 부직포, 각종 시트 및 흡수제지 등 넓은 용도를 갖는다. 일반적으로 폴리에스테르 펠트 부직포는 부직포 제조공정전에 원사에 스테퍼박스 텍스처가공(Stuffer-box texturing)을 하여 크림프(crimp)를 부여한 후 웹을 제작하여 펀칭하고 후처리공정으로 캘린더링(calendering)을 하는 것이 대표적인 제조공정이다. 텍스처 가공된 섬

[†]To whom correspondence should be addressed.
love@textile.snu.ac.kr

유로 제조된 니들펀치 부직포의 물성은 가공을 하지 않은 경우보다 인장 및 굽힘특성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 특히 굽힘 및 인장 회복성이 우수하고 표면도 더 매끄러운 것으로 알려져 있는데 이에 대한 이론적, 실험적인 규명은 아직까지 실행되지 않고 있다. 일반적인 부직포의 물성에 대한 실험적, 해석적인 연구는 1960년대부터 Hearle[1]에 의하여 주도되었다. Hearle과 Sultan, Steavenson 등[1-4]은 일련의 논문을 통하여 니들펀치 부직포의 역학적 성질에 미치는 영향을 연구하였다. 이들의 연구결과를 요약해보면 펀칭밀도의 증가에 따라 부직포의 질량 손실이 있으나 전반적인 물성은 향상되며, 반면에 과도한 펀칭밀도에서는 지나친 섬유의 손상으로 인하여 물성이 저하된다. 섬유길이가 길수록, 섬유간의 마찰계수가 클수록 부직포의 물성은 향상되며, 웹 속의 섬유의 방향성은 부직포의 이방성에 직접적인 영향을 주게 된다. 그러나 이들의 연구는 니들펀치 부직포의 구조를 단순한 방사결합 망상구조에 국한하는 한계를 갖고 있다. 한편, Wan Wyk[5]는 랜덤 섬유집합체의 접촉점의 수를 이론적으로 계산하였고, Komori 등[6]은 Wan Wyk의 결과로부터 일반적인 배향함수를 가지는 섬유집합체의 평균 접촉점 수를 계산하였다. Lee[7]는 Komori의 결과를 토대로 이론적인 섬유집합체의 초기압축 탄성계수와 포아손비를 계산하였고, Pan[8]은 그들의 결과를 보완하여 랜덤 섬유집합체의 초기 압축거동을 접촉점에서의 변위와 히스테리시스를 고려한 모델로써 설명하려 하였다. 이들 연구의 공통적인 한계점은 섬유를 직선형태로만 가정하고 이론을 전개하므로써 크립프의 기하학적 특성이 부직포의 물성에 미치는 영향을 설명하지 못한다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 크립프된 섬유로 제조한 부직포와 직선섬유(flat fiber)로 제조한 부직포에 대하여 이론적으로 구조적 차이를 고찰하고, 크립프가 부직포의 물성에 미치는 영향에 대하여 규명하고자 하였다. 특히, 크립프의 기하학적 특성에서 오는 세가지 효과- 크립프에 의한 접촉점 수의 변화, 접촉점의 변위 및 미끄러짐의 기준에 초점을 맞추어 이론을 전개하였다. 또한 이론적 해석결과를 크립프섬유 부직포와 직선섬유 부직포의 물성실험 결과와 비교고찰하였으며, 특히 펀칭밀도 변화에 따라 물성차이가 어떠한 양상을 갖는지 규명하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

섬유집합체의 변형거동의 해석에 있어서 전체 하중

은 각 접촉점의 점하중의 합으로 작용한다는 개념이 많은 학자들에 의해 응용되었다. Komori 등[6]이 최초로 배향밀도함수의 개념을 도입하여 이방성 섬유집합체의 평균 접촉점 수를 계산한 이후 많은 연구가 진행되어 왔다. 본절에서는 지금까지 이루어진 이론적인 연구들에 대하여 간략히 요약하였다.

2.1. 원통형 섬유집합체의 섬유-섬유간 평균 접촉점의 수

Komori[6]는 섬유집합체를 구성하는 섬유는 모두 길이가 λ 이며, 지름이 2D인 원통형 섬유라고 가정하였다. Komori의 결과에 의하면 한 섬유가 다른 섬유와 접촉할 확률은 그 섬유의 지름의 2배를 높이로 하고 섬유의 길이를 한번으로 하는 평행육면체의 내부에 다른 섬유의 질량중심이 들어갈 확률이 된다. 구해진 확률을 각각의 배향함수로 적분하여 평균을 구하면 계에 존재하는 접촉점의 총 수가 된다. 즉, 한 섬유가 다른 섬유와 접촉할 확률은 계의 전체부피에 대한 주어진 두 섬유로 만들어지는 평행육면체의 부피비를 배향평균한 값이 된다. Komori의 결과에 의한 섬유간 평균 접촉점의 수는 다음과 같다.

$$n = \frac{DL^2I}{V} \quad (1)$$

여기서,

$$I = \int_0^\pi \int_0^\pi \int_0^\pi \int_0^\pi \sin\chi \cdot \Omega(\theta, \phi) \sin\theta \Omega(\theta', \phi') \sin\theta' d\theta d\theta' d\phi d\phi'$$

여기서 V는 계의 부피, L은 총 섬유의 길이의 합이고 I는 섬유의 배향에 의존하는 기하학적인 양이며, Ω 는 방위각(θ)과 편각(ϕ)에 의존하는 배향밀도함수이다. χ 는 두 섬유에 의하여 만들어지는 접촉각이며 식 (2)와 같은 관계가 성립한다.

$$\cos\chi = \cos\theta \cos\theta' + \sin\theta \sin\theta' \cos(\phi - \phi') \quad (2)$$

2.2. 원통형 섬유집합체의 하중에 의한 접촉점의 변위 및 미끄러짐

Pan[8]은 Komori[6]와 Lee[7]의 결과를 인용하여 압축하중을 받는 섬유집합체의 접촉점의 변위를 계산하였다. Pan은 접촉점에서의 변위는 섬유의 굽힘변형에 의한 것이고 인장변형은 없다고 가정하였다. 계에 가해지는 외력은 각 접촉점에 작용하는 하중으로 나타나는데, 하중을 받는 모든 접촉점이 다 굽힘변형을 하는 것은 아니며 일정조건을 만족하는 섬유간 접촉점만이 굽힘변형을 하고 이를 만족하지 못하는 접촉점에서는 미끄러짐 현상이 생긴다고 생각하였다. 또한, 접촉점의 굽힘변형을 계산할 때 양쪽 끝점에서 굽

힘모멘트가 존재하는 붙박이보(built-in beam)의 중앙처짐(central deflection)을 계산하였다. Pan[8]의 결과에 의한 원통형 섬유 접촉점에서의 평균처짐량은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\langle \delta_z \rangle = \frac{Cb_{fl}^3}{6B} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta \Omega \sin \theta d\theta d\phi, b_{fl} = \frac{V}{2DLI} \quad (3)$$

한편 접촉점에서 일어나는 미끄러짐 현상은 식 (4)와 같은 미끄러짐 기준식으로 나타낼 수 있다. 즉, 방위각이 θ_c 보다 작은 섬유의 접촉점들은 미끄러짐 현상이 발생하고 이 값 이상의 섬유의 접촉점들은 미끄러짐 현상이 없이 하중을 받는다. 임계 미끄러짐 방위각을 결정하는 기준은 섬유내부의 잔류응력과 마찰력의 합과 외력(C)의 섬유방향 성분이 같아질 때가 된다.

$$C_p \geq \mu C_n + Fb$$

$$C \cos \theta - \mu C \sin \theta \geq Fb$$

$$\theta_c = \arctan \frac{1}{\mu} - \arcsin \frac{Fb}{C\sqrt{1+\mu^2}} \quad (4)$$

여기서, C_p , C_n 은 각각 점하중의 섬유방향 성분과 수직방향 성분이고, μ 는 섬유와 섬유간의 마찰계수, θ_c 는 미끄러짐이 일어나는 임계방위각이며 F는 단위길이당 잔류응력의 평균치이다.

3. 실험

실험에 사용된 니들펀칭기는 자동화된 기계(BNC-2700 M/C, 184 ppsc)와 수작업 기계(10 ppsc)를 동시에 사용하였다. 부직포 제조는 100% 폴리에스테르 섬유(2 den, 길이 61 mm와 6 den, 61 mm의 50/50 혼합사) 웹과 텍스처 가공된 섬유(STPSY: Stuffer-box Textured Polyester Staple Yarn, 2 den, 51 mm) 웹을 체적분율 33.3%로 삼입하여, 자동화된 기계에서 각각 1회 및 2회 통과시켜 부직포를 제조하였다. 제조된 부직포를 다시 수작업기계로 각각 20, 60, 100 ppsc의 추가 펀칭을 행하여 Table 1과 같이 각각 4단계씩의 펀칭밀도를 갖도록 부직포를 제조한 후 10 cm × 10 cm의 크기의 시편을 각각 취하여 기초중량을 측정하였다.

Table 1. Nonwoven samples with different punching densities used in this study

Specimen no.	1	2	3	4	5	6	7	8
Punching density (ppsc)	184	204	244	284	368	388	428	468

제조된 부직포에 대한 물성실험은 Kawabata Evaluating System을 사용하여 압축, 인장, 굽힘, 표면성질을 측정하였으며 실험조건은 다음과 같다. 압축성질은 KES-FB3 압축시험기에 하중 30 gf/cm², 변형속도 50 mm/sec의 조건으로 측정하여 압축회복률과 최대하중하에서의 부직포의 두께를 측정하였다. 굽힘성질은 KES-FB2 굽힘시험기로 20 × 20 cm²의 시료를 사용하여 측정하였고, 단위길이당 굽힘강성과 곡률이 0일 때의 잔류모멘트를 비교하였다. 표면성질은 KES-FB4 표면시험기에서 평균마찰계수를 측정하였다. 인장성질은 KES-FB1 인장시험기로 15 × 15 cm² 시료를 시험하여 시료의 두께로부터 인장탄성계수(tensile modulus)를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 크립프의 영향에 대한 이론해석

본 연구에서 중점적으로 고려하는 크립프된 섬유를 사용한 경우의 니들펀치 부직포의 물성에 대한 이론을 다음과 같이 전개시키고자 하였다. 일반적으로 크립프가 있는 경우의 섬유집합체는 크립프가 없는 경우보다 인장 및 굽힘물성이 높게 나타나는데 이는 크립프의 기하학적인 형상에서 기인된다. 즉, 크립프의 존재가 섬유집합체의 접촉점의 수, 접촉점의 변위, 접촉점의 미끄러짐 현상에 영향을 주게 되어 직선섬유와는 다른 양상을 보인다고 할 수 있다. 본 연구에서는 크립프가 있는 경우를 고려하여 다음의 세가지 사항에 중점을 두어 이론을 전개하였다.

- 크립프에 의한 접촉점 수의 변화
- 크립프가 있는 경우의 접촉점의 변위
- 크립프가 있는 경우의 접촉점에서의 미끄러짐 현상

크립프에 의한 접촉점 수의 변화: Komori[6]의 결과에 의하면 동일한 섬유수와 배향함수를 가지는 섬유 집합체에서는 개개의 섬유가 직선모양이든 크립프를 갖든, 그 접촉점의 수는 동일하다. 이는 접촉확률이 전체부피에 대한 평행육면체의 부피비로 주어지기 때문에 크립프가 존재하여 생기는 부피변화(전체부피 및 주어진 평행육면체의 부피변화)의 비가 일정하기 때문이다. 즉, 직선섬유 집합체와 동일한 접촉점 수를 갖는 크립프 섬유집합체는 두께가 두꺼워진 만큼 길이가 줄어들게 된다. 일반적으로 크립프 섬유와 직선섬유의 부직포 물성을 비교할 때 같은 중량보다는 같은 면적의 두 부직포에 대해서 비교하므로, 같은 면적(두께는 크립프 섬유의 부직포가 더 두껍다)의 같은 배향밀도

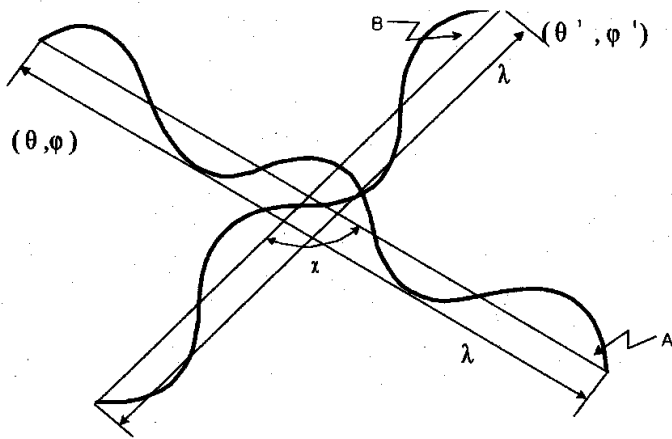


Figure 1. Contact point of two crimped fibers.

를 가질 경우 크립프 섬유 부직포가 직선섬유 부직포보다 평균 접촉점의 수가 많아짐을 알 수 있다. 섬유의 크립프 곡선이 항상 두께방향에 수직인 평면위에 있다고 가정하여 정량적으로 나타내면 다음과 같다.

Figure 1과 같이 길이가 λ, 지름이 D인 크립프가 있는 두 섬유 A, B가 있고 이 섬유의 중심선이 χ의 각도를 이루며 배향해 있을 때, 두 섬유가 접촉할 확률은 섬유 A의 질량 중심이 섬유 B의 위 아래로 섬유의 표면을 타고 미끄러져서 얻어지는 굴곡이 있는 평행입체의 부피 안에 들어갈 때의 확률과 같다. 그런데 이 부피는 Figure 2와 같이 두 섬유를 곧게 뻗을 때 같은 방법으로 얻어지는 평행육면체의 부피와 같으므로 그 확률 P는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{2D \lambda^2 (1 + \epsilon)^2}{V_{cr}} \sin \chi \quad (5)$$

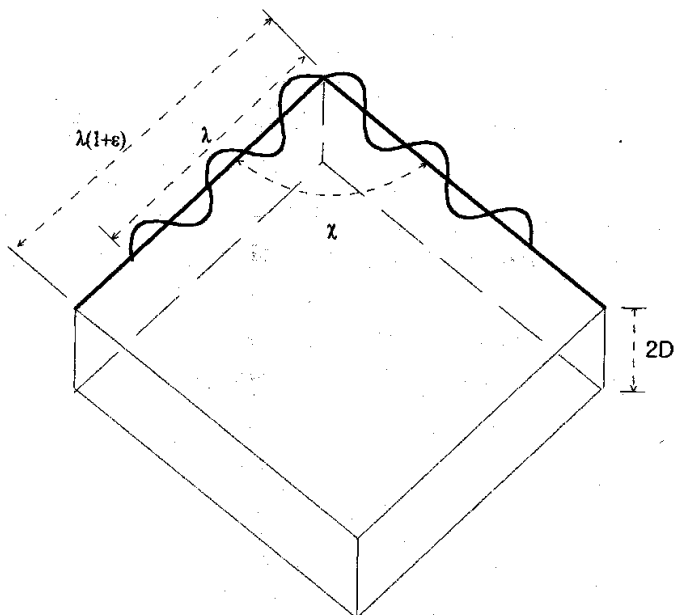


Figure 2. Volume formed by two contacting fibers.

여기서, $\epsilon = \Delta\lambda/\lambda$ 이고, D는 섬유의 지름, V_{cr} 은 계의 부피, ϵ 은 크립프를 곧게 뻗을 때의 길이 증가율이다. 따라서 배향밀도함수 $\Omega(\theta, \phi) \sin \theta$ 와 $\Omega'(\theta', \phi') \sin \theta'$ 를 사용하여 적분하여 평균을 구하면 계에 존재하는 총 접촉점의 수와 접촉점 간의 평균섬유길이를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_v = \frac{DL^2(1 + \epsilon)^2}{V} I$$

$$b_{cr} = \frac{V_{cr}}{2DLI(1 + \epsilon)^2} \quad (6)$$

따라서 동일한 배향함수를 가지는 크립프 섬유 부직포 내부의 접촉점의 수 ($(n_v)_{cr}$)와 직선섬유 부직포 내부의 접촉점 수 ($(n_v)_{fl}$)의 비는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{(n_v)_{cr}}{(n_v)_{fl}} = \frac{\frac{DL^2(1 + \epsilon)^2}{V_{cr}} I}{\frac{DL^2}{V_{fl}} I} = (1 + \epsilon)^2 \frac{t_{fl}}{t_{cr}} \quad (7)$$

따라서, 두 부직포의 두께비를 비교하면 접촉점의 비를 계산할 수도 있다. 그런데, 일반적으로 크립프를 곧게 뻗을 때의 길이가 크립프 골의 최대 높이보다 훨씬 크므로 크립프 골의 최대높이에 의한 두께 신장보다 크립프를 뻗을 때의 길이 신장이 더 크게 나타난다. 그러므로 식 (7)의 값은 항상 1보다 크다고 할 수 있으며, 이는 크립프에 의한 길이 신장비율이 두께의 증가비율보다 커서 계에 존재하는 평균 접촉점의 수를 증가시킴을 의미한다. 즉, 크립프섬유 부직포는 같은 면적을 갖는 직선섬유 부직포보다 섬유 울수가 많기 때문에 접촉점의 수와 중량이 크다.

크립프가 있는 경우의 접촉점의 변위: 다음은 크립프가 있는 섬유의 접촉점의 변위를 계산하기 위하여 다음과 같은 가정하에서 이론을 전개하였다. ① 섬유 크립프 모형은 동일 평면상에 존재하는 싸인곡선 모양이다. ② 섬유의 크립프 곡선은 항상 두께방향에 수직인 평면위에 있으며, ③ 접촉점은 항상 크립프의 골에 형성된다. 또한, Figure 3과 같이 접촉점간의 거리가 b_{cr} 인 싸인곡선 형태의 크립프를 가지는 배향위치 (θ, ϕ) 의 섬유의 한 개의 접촉점에 Z축 방향으로 C의 응력이 가해진다고 설정하였다.

접촉점의 한쪽을 원점으로 하여 구면좌표계를 적용하면, 다음 접촉점까지의 위치벡터는 식 (8)과 같이 나타내어진다.

$$\vec{P} = b_{cr} (\sin \theta \cos \phi \vec{i} + \sin \theta \sin \phi \vec{j} + \cos \theta \vec{k})$$

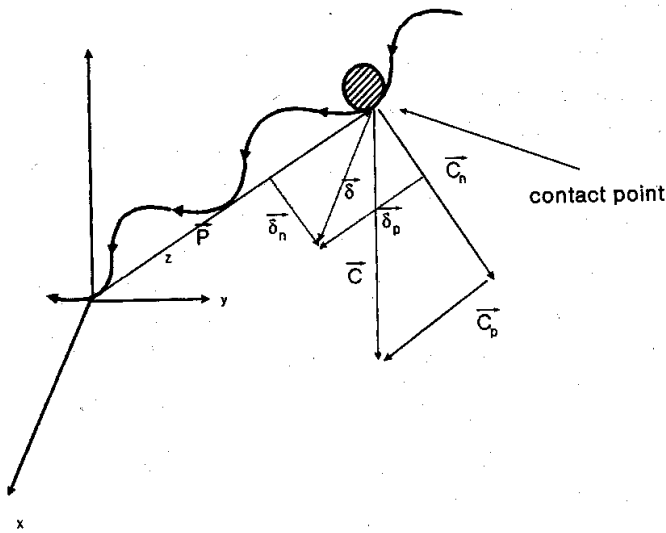


Figure 3. Displacement of contact point for crimped fiber.

$$b_{cr} = \frac{V_{cr}}{2DLI(1 + \epsilon)^2} \quad (8)$$

단, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 는 각각 x, y, z축 방향의 단위벡터를 나타낸다. 이 섬유에 작용하는 응력의 길이방향의 성분과 수직방향의 성분은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C\vec{k} &= \vec{C}_p + \vec{C}_n, C_p = C \cos\theta, C_n = C \sin\theta \\ \vec{C}_p &= -C \cos\theta(\sin\theta \cos\phi \vec{i} + \sin\theta \sin\phi \vec{j} + \cos\theta \vec{k}) \\ \vec{C}_n &= C\vec{k} - \vec{C}_p = -C(-\sin\theta \cos\theta \cos\phi \vec{i} \\ &\quad - \sin\theta \cos\theta \sin\phi \vec{j} + \sin^2\theta \vec{k}) \end{aligned} \quad (9)$$

블박이 보의 굽힘 방정식을 적용하여 이 응력성분들이 각각 섬유길이방향과 수직방향의 변위를 구하면 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{\delta}_n = -\frac{|C_n| b_{cr}^3}{24B} \frac{\vec{C}_n}{|C_n|} = -\frac{C b_{cr}^3}{24B} (-\sin\theta \cos\theta \cos\phi \vec{i} - \sin\theta \cos\theta \sin\phi \vec{j} + \sin^2\theta \vec{k}) \quad (10)$$

$$\vec{\delta}_p = -\frac{|C_p|}{R} \frac{\vec{C}_p}{|C_p|} = -\frac{C}{R} (\sin\theta \cos\theta \cos\phi \vec{i} + \sin\theta \cos\theta \sin\phi \vec{j} + \cos^2\theta \vec{k}) \quad (11)$$

단, B와 R은 각각 crimped fiber의 bending rigidity와 단위길이의 섬유의 크립트를 펴는데 필요한 응력 즉, crimp resistance이다. Lee[7]는 크립트가 없는 섬유의 경우에 한정하여 $\vec{\delta}_p$ 의 계산시 섬유 축방향의 인장 효과는 무시할 수 있다고 가정하여 $\vec{\delta}_p = \vec{0}$ 으로 계산하였다. 섬유가 크립트를 갖는 경우는 크립트를 펴는데 필요한 힘이 섬유를 직접 신장하는 경우보다 작으므로 섬유길이방향의 신장효과도 있을 것이다. 이 두 효

과를 고려하여 접촉점의 변위를 구하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{\delta} &= \vec{\delta}_n + \vec{\delta}_p \\ &= -Cb_{cr} \left\{ \left(\frac{1}{Rb_{cr}} - \frac{b_{cr}^2}{24B} \right) \sin\theta \cos\theta \cos\phi \vec{i} \right. \\ &\quad + \left(\frac{1}{Rb_{cr}} - \frac{b_{cr}^2}{24B} \right) \sin\theta \cos\theta \sin\phi \vec{j} \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{Rb_{cr}} \cos^2\theta + \frac{b_{cr}^2}{24B} \sin^2\theta \right) \vec{k} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

배향밀도함수 $\Omega(\theta, \phi) \sin\theta$ 를 사용하여 변위의 평균을 구해보면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} \langle \vec{\delta} \rangle &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \vec{\delta} \Omega \sin\theta d\theta d\phi \\ &= \langle \delta_x \rangle \vec{i} + \langle \delta_y \rangle \vec{j} + \langle \delta_z \rangle \vec{k} \\ \langle \delta_x \rangle &= -4Cb_{cr} \left(\frac{1}{Rb_{cr}} - \frac{b_{cr}^2}{24B} \right) \\ &\quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin^2\theta \cos\theta \cos\phi d\theta d\phi \\ \langle \delta_y \rangle &= -4Cb_{cr} \left(\frac{1}{Rb_{cr}} - \frac{b_{cr}^2}{24B} \right) \\ &\quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin^2\theta \cos\theta \sin\phi d\theta d\phi \\ \langle \delta_z \rangle &= -4Cb_{cr} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1}{Rb_{cr}} \cos^2\theta + \frac{b_{cr}^2}{24B} \sin^2\theta \right) \\ &\quad \Omega \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (13)$$

따라서, 같은 배향밀도함수를 갖는 크립트 부직포와 직선섬유 부직포의 경우 접촉점에서의 변위를 비교하면 크립트가 섬유집합체의 초기 탄성계수값에 어떤 영향을 주는지 알 수 있다. 식 (8)을 식 (13)의 결과에 대입하고 이를 식 (3)과 비교하면 다음 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \{(\vec{\delta}_z)_f - (\vec{\delta}_z)_{cr}\} &= \frac{C_{cr}}{R} \cos^2\theta + \frac{C_{cr} b_{f1}^3}{24} \frac{1}{B_{cr}(1 + \epsilon)^6} \\ &\quad \sin^2\theta - \frac{C_{f1} b_{f1}^3}{24} \frac{1}{B_{f1}} \sin^2\theta \end{aligned} \quad (14)$$

단, B_{cr} 은 크립트 섬유의 굽힘강성, B_{f1} 은 직선섬유의 굽힘강성을 나타낸다. 식 (14)에서 점하중을 C_{cr}, C_{f1} 로 구분한 이유는 접촉점의 미끄러짐 분율감소에 의한

접하중의 변화를 고려하기 위해서이다. 식 (14)의 우변의 첫 두항은 언제나 양수이지만 셋째항은 음수가 된다. 따라서 식 (14)의 부호는 두 경우의 굽힘강성의 차이와 크립프 신장비에 의해 결정되는데 식 (14)에서 배향평균한 변위의 차이값은 양수가 된다.

크립프가 있는 경우의 접촉점에서의 미끄러짐 현상: 섬유에 크립프가 있으면 크립프의 골-마루 구조가 접촉점의 미끄러짐을 방지하는 역할을 하게 된다. 섬유의 접촉점 부근에선 그 섬유소의 형태가 직선이라고 할 수 있으나 크립프의 곡선형태에 의해서 접촉점이 형성되는 위치의 방위각은 접촉점이 형성되는 위치에 따라 결정된다. 따라서 접촉점에 인접해 있는 골-마루 구조가 미끄러지는 섬유를 구속하게 된다.

Figure 4와 같이 방위각이 $\theta (<\theta_c)$ 인 섬유의 접촉점에 접하중 C가 가해졌을 때, 이 접촉점은 임계각에 도달할 때까지 미끄러지다가 정지하게 되므로 섬유의 실제 임계각은 $\theta_c - \alpha$ 가 된다. 단, α 는 접촉점에서의 접선의 방위각과 섬유 중심축선이 섬유의 크립프와 만나는 점에서의 접선의 방위각의 차이이며 크립프의 기하학적 구조에 의존하는 양이다. 이는 미끄러짐이 일어나는 접촉점의 분율을 저하시키는 효과를 갖는데 이 경우 미끄러짐이 일어나는 접촉점의 분율(ρ)은 배향밀도함수 $\Omega(\theta, \phi)\sin\theta$ 를 사용하여 다음 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \int_0^{\theta_c - \alpha} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta d\theta d\phi \quad (15)$$

한편 Pan[8]과 Lee[7]의 결과를 인용하여 단위 단면적에 높이 V인 섬유집합체 내부에 z축 방향으로 가해지는 하중 P는 식 (16)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$P = \rho n_{<b_z>} C_s + (1-\rho)n_{<b_z>} C \quad (16)$$

여기서, C_s 는 단위접촉점 수당 slip resistance의 평균

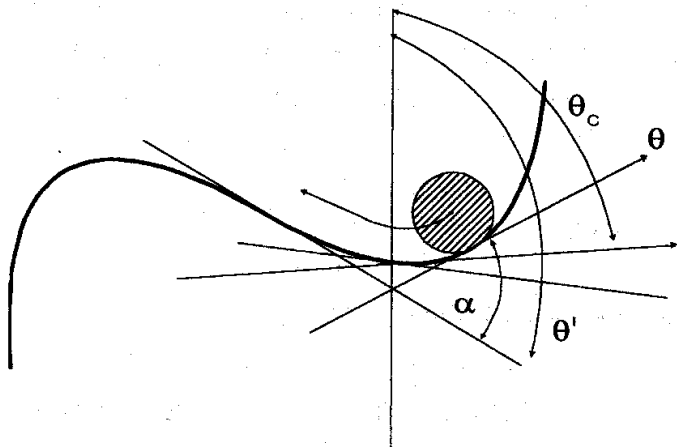


Figure 4. Slip barrier effect for crimped fiber.

값이고 $n_{<b_z>}$ 은 미소부피 b_z 내에 존재하는 평균접촉점의 수이며 b_z 는 접촉점간의 평균섬유길이 b의 z방향 평균이 된다. Komori[6]와 Lee[7]의 결과를 크립프가 있는 경우로 확장하면 접촉점의 수 $n_{<b_z>}$ 는 식 (17)과 같이 된다.

$$n_{<b_z>} = n_v \frac{<b_z>}{V} = \frac{DL^2 I (1 + \epsilon)^2}{V} \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{2V}{DLI(1 + \epsilon)^2} K_z = \frac{2L}{V} K_z \quad (17)$$

$$\begin{aligned} <b_z> &= \int_0^\pi \int_0^\pi b_{cr} \cos\theta \Omega \sin\theta d\theta d\phi \\ &= 4b_{cr} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta \cos\theta d\theta d\phi \\ &= \frac{2V}{DLI(1 + \epsilon)^2} K_z \end{aligned}$$

여기서, $K_z = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta \cos\theta d\theta d\phi$

$$b_{cr} = \frac{V}{2DLI(1 + \epsilon)^2}$$

또한 C_s 와 ρ 는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_s &= 4 \int_0^{\theta_c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{F b_{cr}}{\cos\theta - \mu \sin\theta} \Omega \sin\theta d\theta d\phi \\ \rho &= 4 \int_0^{\theta_c - \alpha} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (18)$$

앞에서 고찰한 바와 같이, 섬유에 크립프가 있으면 같은 배향을 갖는 직선형의 섬유집합체의 경우보다 ρ 값이 낮아지게 된다. 이때의 접촉점 분율의 차이는 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\rho = \int_{\theta_c - \alpha}^{\theta_c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta d\theta d\phi \quad (19)$$

즉, 굽힘하중을 받는 점이 증가하기 때문에 C값이 작아지고 식 (13)에서 $<\delta_z> \propto C$ 이기 때문에 변위가 작아지게 되며, 따라서 탄성계수 $E_{zz} = P / (<\delta_z> / <b_z>)$ 의 값이 상승되는 영향을 받게 된다. 그러므로 크립프의 장벽효과가 접촉점의 미끄러짐 분율을 낮추고, 접하중의 값을 감소시키기 때문에 탄성계수를 증가시킨다고 할 수 있다. 즉, $<\delta_z>_{flat} - <\delta_z>_{crimped} > 0$ 이므로 식 (20)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &(E_{zz})_{crimped} - (E_{zz})_{flat} \\ &= P <b_z> \frac{<\delta_z>_{flat} - <\delta_z>_{crimped}}{<\delta_z>_{crimped} \cdot <\delta_z>_{flat}} > 0 \end{aligned} \quad (20)$$

4.2. 부직포의 물성에 미치는 영향 예측

앞절에서 유도된 결과로부터 부직포의 물성에 대한 예측이 가능한데 그 내용을 요약하면 다음과 같다. 같은 배향함수를 갖는 크림프 부직포의 직선섬유 부직포에 대한 접촉점의 비는 식 (7)과 같이 표현되며 크림프섬유 부직포의 접촉점의 수와 중량은 동일한 면적과 배향함수를 갖는 직선섬유 부직포의 경우보다 많다. 이는 크림프가공이 부직포의 단위면적당 섬유수를 증가시키는 역할을 하기 때문이다. 크림프 부직포와 직선섬유 부직포의 접촉점에서의 변위값의 차이에 대한 식 (14)에서 변위의 차이를 결정하는 인자는, 크림프를 펴는데 필요한 힘(R), 크림프 신장비(ϵ)와 점하중의 값이며 접촉점의 수가 많아질수록 접촉점간 거리가 크림프 골-마루 위치보다 작아져 크림프 신장 효과는 사라지고 두 변위의 차이는 0에 수렴하게 된다. 크림프는 섬유 접촉점의 미끄러짐 임계방위각을 증가시키며 변형에 기여하는 접촉점의 수를 증가시켜 점하중을 감소시킨다. 이를 결정하는 인자는 크림프 중심선에서의 싸인곡선의 접선과 축이 이루는 각 α 이며 크림프 신장비가 클수록 미끄러짐 방지효과는 커진다. 따라서 이론적인 결과를 토대로 크림프 존재시에 다음과 같은 부직포의 물성상승효과를 기대할 수 있다.

인장 및 굽힘 성질: 인장이나 굽힘의 경우는 섬유길이방향(z축)으로 인장력이 작용한다고 생각한다. 만일 랜덤 섬유집합체처럼 섬유들의 배향성에 구속이 없다면 섬유집합체는 등방성을 갖게되나, 섬유길이와 부직포의 두께의 제한된 범위 내에서 섬유의 방위각이 집중되기 때문에 인장에서 미끄러짐이 일어나는 분율은 Figure 5와 같이 압축의 경우보다 높아지게 된다. 대부분의 섬유들이 하중방향으로 배향되어 있으므로 접촉점의 미끄러짐 현상이 커지고, 따라서 크

림프에 의한 미끄러짐 방지 효과에 의한 탄성계수의 상승효과는 압축의 경우보다 현저해진다. 다만, 인장에서는 접촉점의 급격한 증가현상이 일어나지 않고 미끄러짐 방지에 의한 접촉점 수의 변화도 적으므로 압축곡선과는 달리 거의 직선관계를 나타내게 된다.

부직포의 굽힘강성은 $B=E_{zz}(I_{z})_{nonwoven}$ 와 같이 표현할 수 있고 두꺼운 시료일수록 상승효과는 더 현저해지는데, 크림프 섬유의 경우가 더 두껍기 때문에 초기의 편칭밀도 대역에선 큰 상승효과를 가져오지만, 편칭밀도 증가에 따라 두께가 감소하여 관성모멘트의 값이 감소하면 이러한 상승효과는 작아지게 된다. 또한 미끄러짐 방지효과는 편칭밀도의 증가에 큰 영향을 받지 않으므로 섬유손상에 의한 크림프 신장비(ϵ)의 감소와 섬유길이의 감소가 물성감소의 주 원인이 된다.

압축 성질: 압축거동의 경우 접촉점 증가에 의한 탄성계수 상승효과 이외에 크림프의 장벽효과에 의한 탄성계수 증가효과는 상대적으로 인장이나 굽힘의 경우보다는 작다. 이는 부직포내의 섬유들이 하중의 수직방향으로 더 많이 배향해 있기 때문이다. 단, 압축이 진행되면서 부직포의 두께가 감소하면 접촉점의 수가 많아지기 때문에, 압축곡선은 직선모양이 아닌 상향곡선 형태가 된다. 크림프가 있을 경우엔 내부섬유들이 강제적으로 동일평면에 있을 확률이 커지므로 크림프에 따른 접촉점 가중효과로 인하여 두께가 최대하중 부근에 왔을 때 접촉점의 수는 급격히 증가하게 되고 탄성계수의 증가율도 급격히 커지게 된다. 따라서 동일하중하에서의 크림프섬유 부직포의 두께는 직선섬유 부직포의 경우보다 크게 된다. 마찬가지로 편칭밀도가 증가하여 최적편칭밀도를 넘어가면 섬유의 손상을 유발하여 크림프 신장비(ϵ)와 섬유길이를 감소시키기 때문에 이러한 효과는 점점 감소하게 된다.

표면 성질: 부직포의 표면마찰계수는 섬유자체의 마찰계수뿐 아니라 부직포 표면의 잔털의 엉킴정도에 의존하는 값이다. 크림프 섬유의 경우 부직포의 표면에 노출되는 섬유잔털의 형태가 복잡하므로 이에 의한 엉킴현상 등으로 직선섬유의 경우보다 큰 마찰계수값을 가지게 된다. 단, 편칭밀도가 증가함에 따라 부직포 표면의 섬유잔털의 수가 변하면 마찰계수값도 변하게 된다.

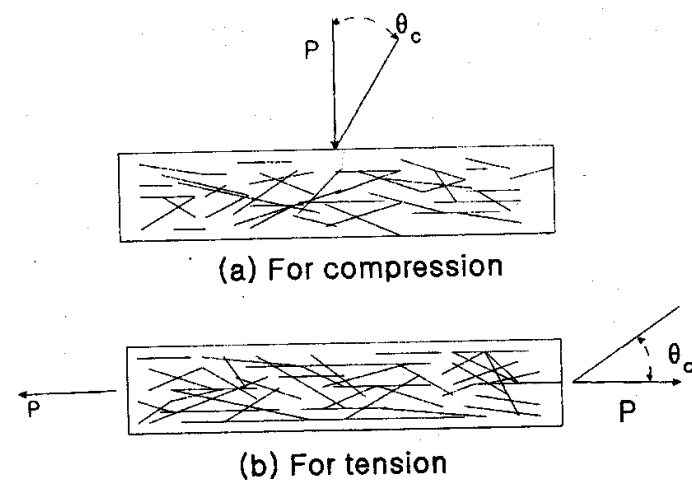


Figure 5. Variation of orientation of fibers under tensile and compressional load.

4.3. 이론예측과 실험결과의 비교 고찰

이상의 이론을 바탕으로 실제 니들펀치 부직포의 역학적 성질에 미치는 섬유 크림프의 영향을 살펴보면 다음과 같다. Table 2는 기초중량을 측정된 결과로 크림프섬유 부직포는 직선섬유 부직포에 비하여 2배

Table 2. Basic weights of nonwoven samples with different punching densities

Type of nonwoven	Specimen no.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Flat fiber(g/m ²)	71	83	95	106	115	117	116	117
Crimped fiber(g/m ²)	208	205	206	204	203	204	205	206

정도의 중량을 갖게 되는데, 이는 3.1절에서 예측한 결과처럼 크립프가 부직포의 단위면적당 섬유의 수를 증가시키는 역할을 하기 때문으로 생각된다. 펀칭밀도 증가에 따라 직선섬유 부직포의 경우 약 115의 값으로 수렴해가지만, 크립프섬유 부직포의 경우 203의 값을 크게 벗어나지 않는다. 그러므로 직선섬유 부직포의 최적펀칭밀도는 368 ppsc 영역인 반면, 크립프섬유 부직포의 최적펀칭밀도는 184 ppsc 영역임을 알 수 있다. 따라서 섬유 크립프의 존재는 부직포의 최적펀칭밀도를 낮추어 공정의 편의성과 비용절감 효과를 줄 수 있음을 알 수 있다.

압축회복률(compression resilience)을 측정한 결과를 Figure 6에 도시하였는데 다른 두 대역의 펀칭밀도에 따른 압축회복률의 경향을 잘 알 수 있다. 두 시

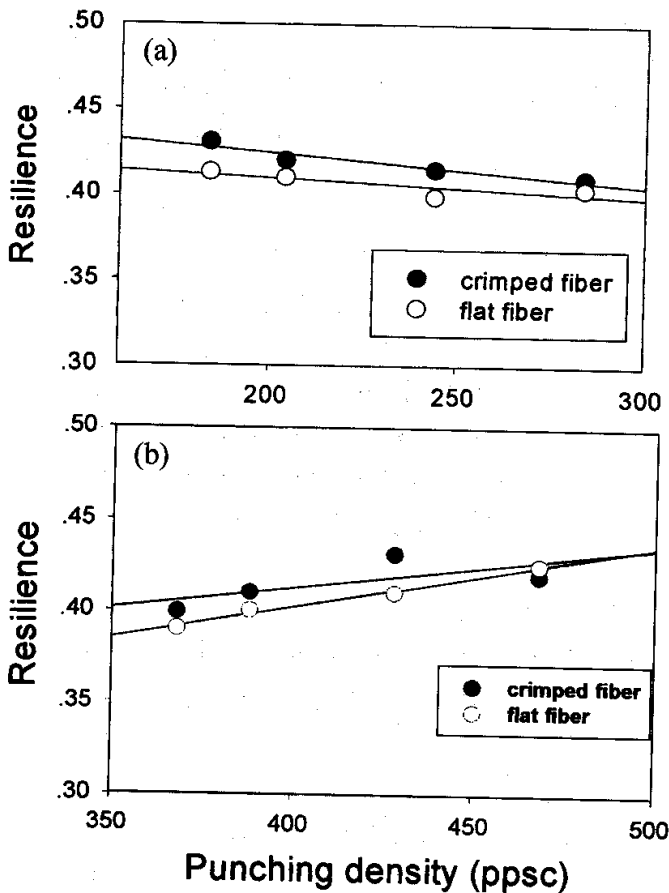


Figure 6. Changes in compressional resilience of needle punched nonwovens with different punching densities. (a) 184-284 ppsc, (b) 368-468 ppsc.

료의 회복률의 차이는 그리 크지 않으며 모두 40% 내외의 회복률을 가짐을 알 수 있다. 회복률의 차이가 크지 않은 이유는 압축변형이 섬유소들의 배향을 하중방향에 수직이 되도록 배향함수를 변화시켜서 크립프를 펴는 효과가 생기게 되므로 크립프 포텐셜 효과를 상쇄시키기 때문($\alpha \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 0$)인 것으로 생각된다. 즉, 대부분의 접촉점이 임계방위각(θ_c)보다 큰 상태이고 압축변형이 인장이나 굽힘처럼 큰 변형이 아니므로, 접촉점의 미끄러짐이 거의 일어나지 않기 때문에 직선섬유의 경우와 비슷한 회복률을 나타내게 된다.

Figure 7은 압축하중 30 gf/cm²에서의 부직포의 두께를 나타내는데, 크립프된 섬유를 삽입한 시료가 더 두꺼움을 알 수 있다. 이는 이론에서 예상한대로 크립프의 장벽효과에 의하여 압축변형에 참여하는 접촉점의 분율을 증가시켜($\Delta\rho = \int_{\theta_c - \alpha}^{\theta_c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta d\theta d\phi > 0$)

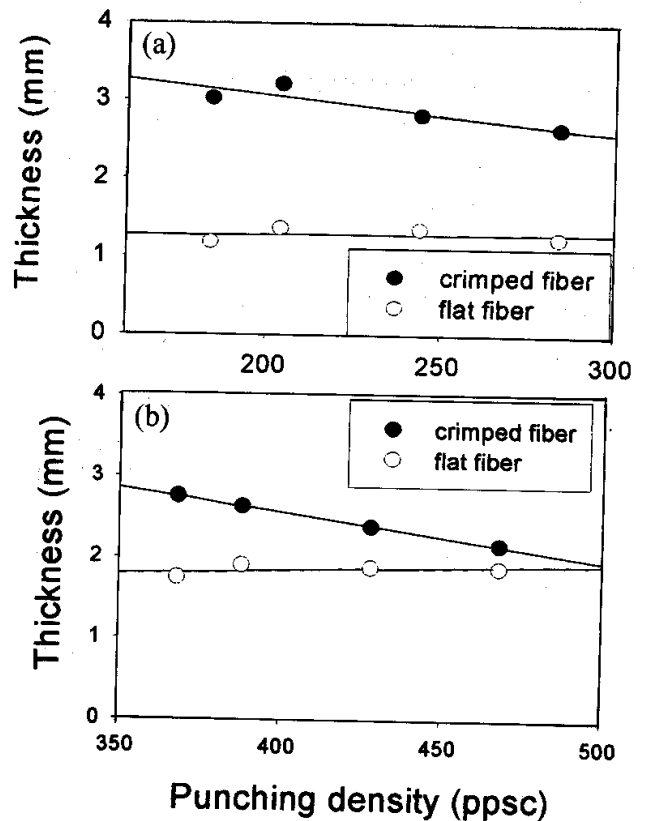


Figure 7. Changes in thickness under maximum load with different punching densities. (a) 184-284 ppsc, (b) 368-468 ppsc.

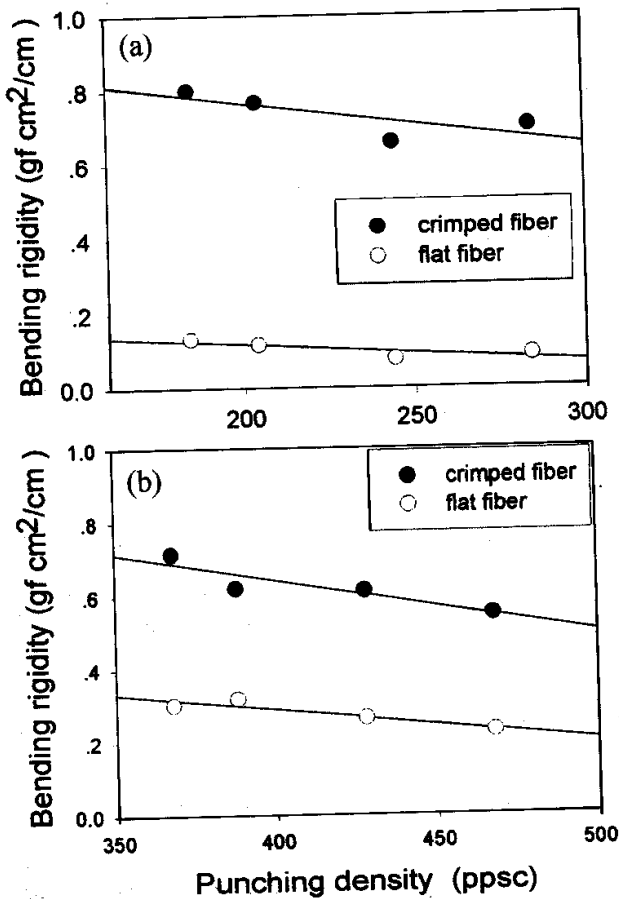


Figure 8. Changes in specific bending rigidity with different punching densities. (a) 184-284 ppsc, (b) 368-468 ppsc.

접촉점의 변위가 낮아지기 때문에 일정하중에서의 부직포의 두께는 크림프 부직포가 직선섬유 경우보다 큰 값을 나타내게 된다. 즉, 접촉점의 변위가 줄어든 만큼 부직포의 압축탄성계수는 증가하게 된다. 그러나 펀칭밀도가 증가하면서 접촉점간의 거리(b)가 감소하고 섬유의 파단현상 등으로 이러한 포텐셜 효과는 점점 감소($\epsilon \rightarrow 0$)하여 접촉점간의 섬유형태가 거의 직선에 가까워지기 때문에 두 시료가 점점 동일한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

Figure 8은 비굽힘강성(specific bending rigidity) 측정결과를 나타낸 것으로 각기 다른 펀칭밀도 대역에서의 비굽힘강성값을 나타낸다. 예상대로 크림프 섬유 부직포가 직선섬유 부직포보다 굽힘강성이 높음을 알 수 있다. 이는 굽힘강성이 인장탄성계수와 관성모멘트의 곱의 형태이므로 관성모멘트가 부직포의 두께가 증가할수록 커지며, 두께가 두꺼울수록 그 상승효과가 현저해지기 때문이다. 펀칭밀도 증가에 따라 굽힘강성의 값이 낮아지는데 접촉점간의 거리(b)가 감소하고 섬유의 파단현상 등으로 이러한 포텐셜 효과가 점점 감소($\epsilon \rightarrow 0$)하여 접촉점간의 섬유의 형태

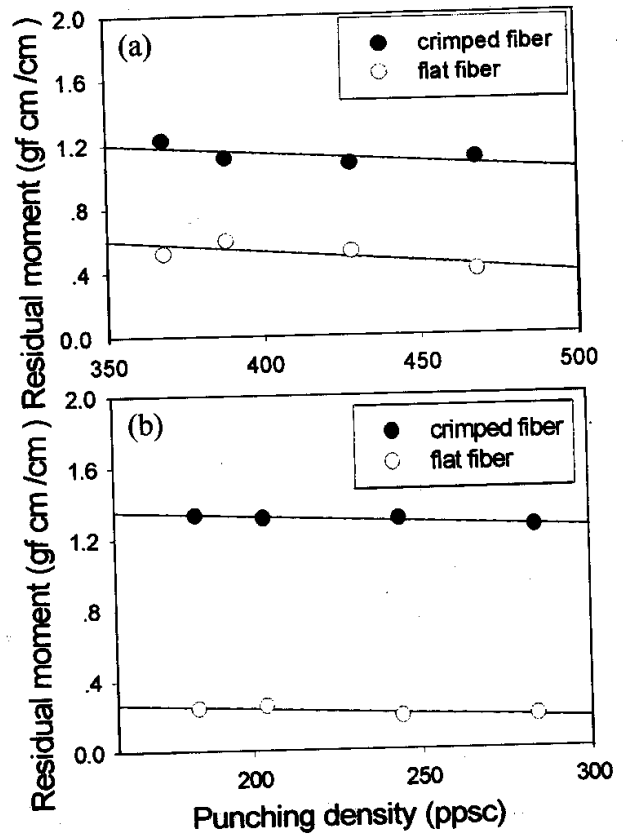


Figure 9. Changes in residual moment with different punching densities. (a) 184-284 ppsc, (b) 368-468 ppsc.

가 거의 직선에 가까워지기 때문에 두 시료간의 물성 차이도 차츰 작아짐을 알 수 있다.

Figure 9는 곡률이 0일 때의 잔류모멘트를 두 펀칭대역에서 나타낸 결과이다. 잔류에너지가 존재하는 이유는 부직포의 경우 외력을 가하지 않아도 입체장애(steric hindrance)에 의한 굽힘에너지가 잔존하기 때문이다. 결과에서 잔류모멘트도 크림프된 섬유의 경우가 높음을 알 수 있는데 그 이유는 굽힘변형이 압축변형에 비하여 큰 변형이어서 접촉점에서의 변형이 크림프의 골-마루구조를 변화시켜 α 값을 감소시켜 임계방위각을 낮추기 때문이라고 생각된다. 접촉점의 방위각이 임계방위각 이하로 되면 접촉점은 미끄러지다가 다음 골-마루구조로 넘어가서 다시 α 값을 회복시키는 양상으로 된다. 그러므로 회복시에는 크림프의 골-마루구조가 오히려 회복을 방해하는 장벽의 역할을 하게 된다.

Figure 10은 크림프섬유와 직선섬유 부직포의 마찰계수를 측정한 결과로 크림프된 경우가 더 높은 값을 보이며 펀칭밀도 증가에 따라 두 경우가 같은 범위로 수렴하는 경향을 보임을 알 수 있다. 직선섬유의 경우 펀칭밀도가 증가하면서 일시적으로 섬유잔털이 모이면서 마찰계수가 증가하다가 섬유의 절단현상이 심해

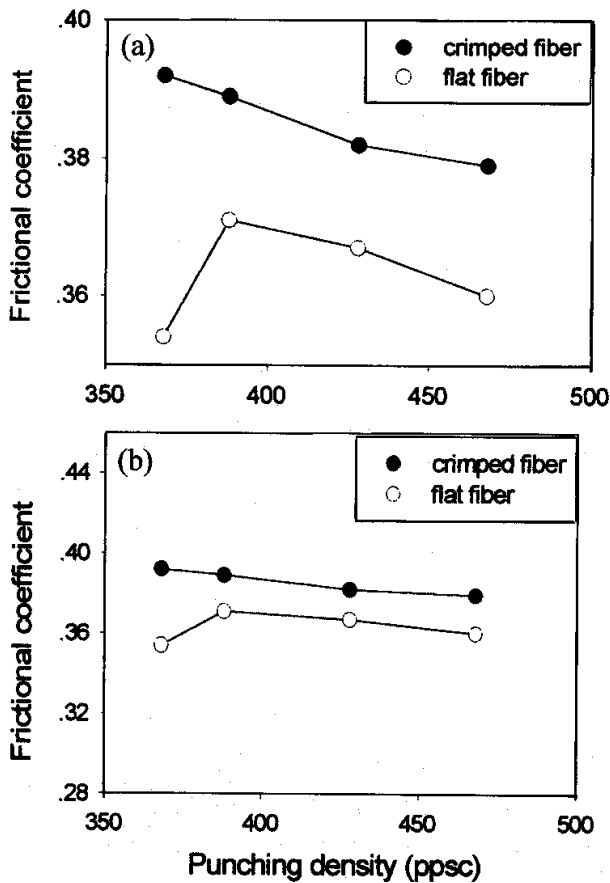


Figure 10. Changes in frictional coefficient with different punching densities. (a) 184-284 ppsc, (b) 368-468 ppsc.

지면서 다시 하락하게 되고 크립프된 섬유의 경우 펀칭밀도 증가에 따라 섬유잔털이 계속 흩어지면서 마찰계수가 감소했음을 알 수 있다.

Figure 11은 인장탄성계수를 나타낸 것으로 크립프 섬유 부직포가 더 높은 값을 나타내는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 크립프에 의한 접촉점의 증가와 미끄러짐 방지효과에 의한 것이다. 인장실험에서 하중이 계속 가해지면서 영구변형이 생겨 변형회복이 되지 않아 회복률은 측정할 수가 없는데, 이는 배향함수가 부직포의 두께에 의하여 제한을 받기 때문에 Figure 5와 같이 미끄러짐에 기여하는 접촉점의 수가 압축이나 굽힘의 경우보다 크다. 또한 인장시의 접촉점의 변형이 큰 변형이어서 미끄러짐이 일어나지 않는 접촉점도 변형이 계속되면 크립프의 골-마루구조를 변화시켜 α 값이 감소하게 된다. 따라서 접촉점의 임계방위각이 낮아지게 되고 접촉점의 방위각이 임계방위각 이하의 값을 가지면, 접촉점은 미끄러지다가 다음 골-마루구조로 넘어가므로 접촉점은 영구변형하게 된다. 그러므로 하중을 제거하여도 접촉점은 원래의 위치로 돌아오지 않으므로 회복률은 급격히 낮아지게 된다. 인장탄성계수가 펀칭밀도 증가에 따라 계속

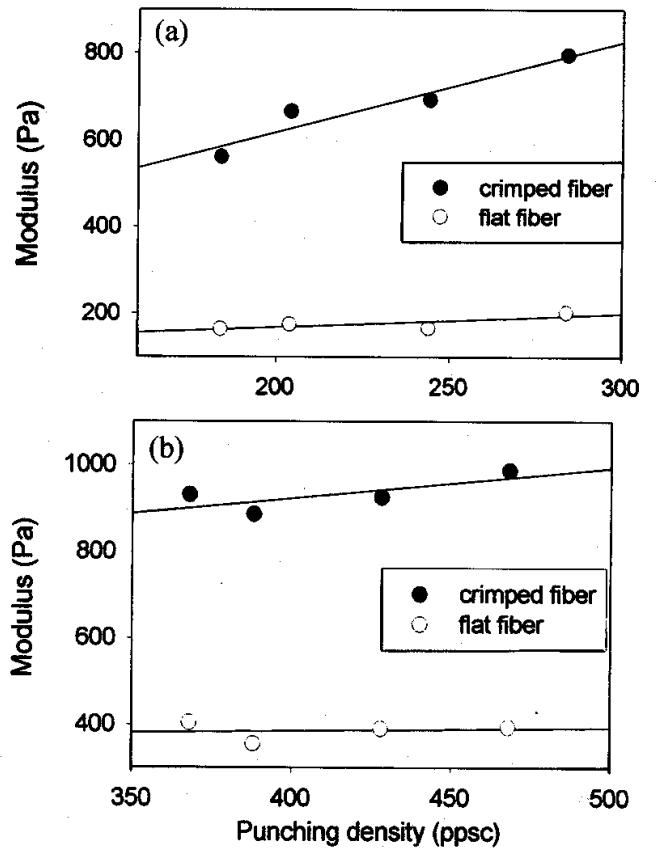


Figure 11. Changes in modulus with different punching densities. (a) 184-284 ppsc, (b) 368-468 ppsc.

증가하는데, 이는 펀칭밀도가 증가할수록 두 시료의 두께가 동일한 값으로 수렴하기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

크립프가 있는 섬유로 제조된 니들펀치 부직포의 구조에 대하여 이론적으로 해석하였고, 부직포의 물성을 실험하여 직선섬유로 제조된 니들펀치 부직포와 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 이론적인 해석 결과, 동일한 배향함수를 가지는 크립프 섬유 부직포 내부의 접촉점의 수와 직선섬유 부직포의 접촉점 수의 비는 다음 식과 같이 표시할 수 있었다.

$$\frac{(n_v)_{cr}}{(n_v)_{fl}} = \frac{\frac{DL^2(1+\epsilon)^2 I}{V_{cr}}}{\frac{DL^2 I}{V_{fl}}} = (1+\epsilon)^2 \frac{t_{fl}}{t_{cr}}$$

2. 섬유 크립프는 부직포에서 단위면적당 섬유수를 증가시키는 역할을 하며, 크립프섬유 부직포와 직선섬유 부직포의 접촉점에서의 변위의 차이는 다

음 식과 같이 표현할 수 있었다.

$$\{(\vec{\delta}_z)_{fl} - (\vec{\delta}_z)_{cr}\} = \frac{C_{cr}}{R} \cos^2\theta + \frac{C_{cr} b_{fl}^3}{24}$$

$$\frac{1}{B_{cr}(1+\epsilon)^6} \sin^2\theta - \frac{C_{fl} b_{fl}^3}{24} - \frac{1}{B_{fl}} \sin^2\theta$$

3. 크립프의 존재는 부직포의 접촉점에서의 미끄러짐 분율을 낮추어 하중을 균일하게 전달하게 하는 역할을 하며, 이때 접촉점의 미끄러짐 분율의 차이값은 다음 식과 같이 구할 수 있었다.

$$\Delta\rho = \int_{\theta_c - \alpha}^{\theta_c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Omega \sin\theta d\theta d\phi$$

4. 굽힘성질에서 이론예측과 같이 크립프섬유 부직포가 평균 3배의 물성향상 효과를 얻을 수 있었으나, 미끄러짐 장벽이 변형회복시에도 장벽으로 작용하기 때문에 회복성은 저하되었다.
5. 인장성질의 경우 크립프섬유 부직포가 평균 3배 정도의 물성향상 효과를 가져오나, 미끄러짐에 의한 영구변형효과가 상당히 크기 때문에 회복성은 압축성질, 굽힘성질에서보다 더 불량함을 알 수 있었다.
6. 압축성질에서 크립프된 섬유의 효과로 하중이 가해질수록 부직포의 두께가 얇아지면서 접촉점의 가중 효과로 인해 탄성계수 값이 급격히 상승하였다.

7. 표면마찰계수는 크립프섬유 부직포의 경우가 직선 섬유의 경우보다 더 큰 값을 보이며 편칭밀도가 높아지면서 마찰계수값이 감소하였다.
8. 섬유에 크립프를 가해주면 크립프섬유 부직포는 전반적인 물성향상효과를 나타내나, 회복성과 표면특성은 저하되므로 이를 개선하기 위한 후처리 공정이 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. J. W. S. Hearle and M. A. I. Sultan, *J. Tex. Inst.*, **58**, 251(1967).
2. J. W. S. Hearle and M. A. I. Sultan, *J. Tex. Inst.*, **59**, 103(1968).
3. J. W. S. Hearle and M. A. I. Sultan, *J. Tex. Inst.*, **59**, 137(1968).
4. J. W. S. Hearle and M. A. I. Sultan, *J. Tex. Inst.*, **59**, 183(1968).
5. V. Wyk, *J. Tex. Inst.*, **37**, 285(1946).
6. T. Komori and K. Makishima, *Textile Res. J.*, **47**, 13(1977).
7. D. H. Lee, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, 1985.
8. N. Pan and G. A. Carnaby, *Textile Res. J.*, **59**, 275(1989).