creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

점접촉 클램프를 이용한 직조 원단 주름 최소화 연구

Minimizing wrinkles on woven fabric using point-contact clamps

2022년 8월

서울대학교 대학원

기계공학부

유 서 경

점접촉 클램프를 이용한 직조 원단 주름 최소화 연구

Minimizing wrinkles on woven fabric using point-contact clamps

지도교수 김 호 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 4월

서울대학교 대학원

기계공학부

유 서 경

유서경의 공학석사 학위논문을 인준함

2022년 6월

위 원 장 _____ 송성진 _____ (인)

부위원장 _____ 김호영 _____ (인)

위 원 _____ 황원태 _____ (인)

초 록

의류에서 발생하는 원단 외 변형인 주름(wrinkle)은 우리의 일상 생활에서 흔히 발견되며 원단을 다루는 의류 제조 공정에서는 결함으로 분류되어 생산 품질 결정에 큰 영향을 미친다. 의류 봉제 공정에서 발생하는 오류 중 하나인 주름을 방지하기 위하여 본 연구에서는 평직 직조 원단의 주름 발생 메커니즘을 탐색하고 주름 완화를 위한 클램핑 방법을 도출하였다. 비신장성 섬유로 구성된 원단에서는 섬유간 네트워킹인 직조 구조와 단일 섬유가 가진 크림프 구조에 의해 주름이 발생하며, 임의의 형상의 원단에 인장력을 가하기 위해 점 접촉 클램프를 사용할 경우 두 가지 메커니즘으로 나누어 주름의 발생 과정을 분석할 수 있다. 첫 번째로 탄성 시트와 유사하게 포아송 효과에 의해 주름이 발생하는 경우, 섬유의 신장이 아닌 섬유 크림프 레벨의 교환에 의해 원단에 수축이 발생하며 원단 내에서 광범위한 형태로 나타나게 된다. 두 번째로 마찰력에 의해 섬유가 호 형태로 변형될 경우 직조 구조에서 전단 변형이 발생하여 주름이 발생하게 되고, 이 주름은 클램프 근처에서 locking angle이라는 임계값을 지난 후에 인장력의 45 도 방향으로 주름이 발생하게 된다는 것을 발견하였다. 본 연구의 주름 발생 메커니즘을 적용하여 다양한 클램핑 방법을 적용하면 직조 구조에 평행한 방향과 45 도 방향의 힘이 공존할 때 주름이 최소화됨을 알 수 있다. 평직 직조 원단은 방사형(radial) 클램핑을 사용하는 경우 주름이 완화된다는 것을 이론과 실험적으로 예측하였으며, 이 결과를 바탕으로 실제 의류 산업에 적용할 수 있는 원단 장력 인가 장치를 설계하였다. 방사형 장력 인가를 구현하는 장치를 사용하여 봉제하였을 때 실제 봉제 평가 프레임을 통과하는 준수한 결과물을 도출하였으며, 본 연구의 주름

발생 메커니즘의 이해는 노동 집약적인 의류 산업의 자동화에 기여할 것으로 기대한다.

주요어: Woven fabric, Biaxial extension, Wrinkling, Point-contact, Crimp level

학 번: 2020-21397

목 차

1. 서 론 1
1.1 연구의 배경 1
1.2 연구의 내용 4

2. 실험 장치 및 실험 방법 5
2.1 실험 대상 5
2.2 실험 장치 구성 7
2.3 실험 방법 9

3. 실험 결과 및 분석 10
3.1 주름 발생 메커니즘 10
3.1.1 포아송 효과의 압축에 의한 주름 14
3.1.2 마찰력의 전단 변형에 의한 주름 19
3.2 클램핑 방법에 따른 주름 양상 23

4. 원단 장력 인가 장치 27
4.1 원단 장력 인가 장치 설계 27
4.2 원단 장력 인가 장치 성능 평가 30

5. 결 론 33

참고문헌 34
Abstract 37

List of Figures

[Fig. 2.1] Schematic diagram of plain weave fabric structure.....6

[Fig. 2.2] Schematic of crimp level of fibers 6

[Fig. 2.3] Schematic of experimental setup 8

[Fig. 2.4] Schematic of tension generator.....8

[Fig. 3.1] Wrinkling mechanics under line extension.....12

[Fig. 3.2] Wrinkling mechanics under point extension 13

[Fig. 3.3] Schematic illustration of straight−line model.....16

[Fig. 3.4] Schematic illustration of revised straight−line model under point tension 17

[Fig. 3.5] Schematic diagram of Poisson−induced compression wrinkles.....18

[Fig. 3.6] Schematic diagram of friction−induced shear wrinkles.....20

[Fig. 3.7] Schematic diagram of shear deformation and wrinkles beyond locking angle 21

[Fig. 3.8] Experimental images of friction-induced shear wrinkles 45° with respect to tension direction (a) 45° (b) 90° 22

[Fig. 4.1] Concept diagram and experimental image compare to perpendicular and radial clamping.....28

[Fig. 4.2] 3D CAD design of tension exerting device.....29

[Fig. 4.3] Experimental images of sleeve pattern sewing test (1) tension exerting device (2) acrylic template.....31

[Fig. 4.4] Photograph of experimental images after line detecting image processing (red) tension exerting device (green) acrylic template 32

List of Tables

[Table 3.1] Wrinkling regime map under point extension 25

[Table 3.2] Wrinkling regime map and experiment images under point extension 26

1. 서 론

1.1 연구의 배경

유체 역학에서 서로 다른 유체의 계면에서 발생하는 입자의 거동이나 계면 장력에 의해 발생하는 현상에 대한 연구는 전통적으로 다양하게 이루어지고 있다. 그 중 외력에 의해 유체 계면에서 발생하는 파동을 정의하고 분류하는 연구는 현재까지도 다방면으로 이루어지고 있다. 자연 현상에서 쉽게 발견할 수 있는 해양과 대기의 상호 작용에 의한 수면파에 대한 연구는 해수 계면의 불규칙성을 분류하여 유동을 이해하여 해양의 특성을 탐구하는 것에 초점을 맞추고 있다[1]. 이와 다르게 인공적으로 용기 내의 유체를 특정 주파수로 진동시키는 Faraday wave에 관한 연구는 유체 계면을 패터닝을 통하여 마이크로 스케일의 고체 입자를 원하는 2차원 형상으로 정렬시키는 분야에도 적용되고 있다[2-5].

유체와 유사하게 균질한 탄성 시트에서도 외력에 의해 평면 외 변형인 파동 형태의 주름(wrinkle)이 발생하는데, 압축력에 의한 수축이 아닌 단방향 인장력에 의해 주름이 발생하는 메커니즘은 다음과 같은 연구로 규명되어 있다[6]. 종방향 인장력이 가해지면 포아송 효과에 의해 횡방향으로 압축력이 발행하고, 얇은 시트가 수축하면서 버클링이 발생하여 다수의 평행선 형상의 주름이 발생하게 된다. 이러한 주름은 일반적인 wrinkling theory에 의해 주름의 wavelength, amplitude 그리고 개수 등으로 정의할 수 있다. 또한, 전단력을 받는 균질한 탄성

시트에서도 대각선 방향의 평행선들이 주름으로 나타남을 확인할 수 있다[7].

이러한 시트에서 발생하는 주름은 우리의 일상 생활에서 흔하게 발견할 수 있는 원단에서의 주름으로 확장할 수 있으며 원단을 이루고 있는 섬유의 구조에 따라 연구가 진행되고 있다. 섬유가 뭉쳐져 있는 펠트 원단은 1 차원의 기하학적 구조를 가진 섬유의 strain stiffening 특성과 큰 포아송 비라는 2 가지 특징을 중심으로 섬유간 기계적 네트워크를 정의한다[8]. 원단을 제작하는 또 다른 전통적인 방식 중 하나인 직조 원단은 종방향과 횡방향 섬유가 상하로 번갈아 교차되어 엮여있으며, 원단 모서리 전체를 클램프로 고정하여 직조 방향의 45도로 단방향 인장 시 발생하는 주름에 대해 섬유간 전단 변형의 정도를 기하학적으로 구분한 연구가 시도된 바 있다[9-12]. 그러나 직조 원단은 불연속성 비등방성 시트로 직조 특성에 따라 서로 다른 특성을 가지며, 이러한 주름이 발생하는 원리와 메커니즘에 관한 연구는 아직 활발히 이루어지지 않고 있다.

최근 의류 산업과 같은 노동 집약적 산업에서는 공정 자동화를 통한 인건비 및 생산 비용의 절감을 위하여 생산 공정 시 발생하는 오류 저하에 대한 연구를 필요로 하고 있다. 원단 관리에 따라 생산 품질이 결정되는 봉제 작업은 봉제 시 발생하는 외력에 의해 봉제 이탈, 퍼커링 등 결함이 흔하게 발생해왔다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 봉제할 원단에 초기 인장력(pre-tension)을 적절히 가해주어야 하는데 현재 이 작업은 수작업이나 복잡한 과정을 거쳐 진행되고 있으며 의류 패턴마다 소모성 아크릴 템플릿을 제작해야 하는 번거로움이 있다.

따라서 의류 생산의 자동화를 위해서는 원단 내 장력을 인가하는 장치의 필요성이 존재하며, 이때 발생하는 원단의 평면 외 변형인 주름을 완화하기 위하여 주름 발생 메커니즘에 대한 연구가 필요하다.

또한, 점 접촉 클램프를 사용하여 임의의 원단 형상에 효율적인 장력 인가 방식을 도출한다면 공정 및 생산 품질 개선에도 기여할 수 있다.

1.2 연구의 내용

본 연구에서는 평직 직조 원단(plain woven fabric)에 점 접촉 인장력이 가해질 때 발생하는 주름을 실험적으로 확인하고 섬유 스케일에서 발생하는 섬유와 직조 구조의 변형으로 그 원리를 제시하였다. 또한, 주름 발생 메커니즘을 사용하여 원단 내 주름을 최소화할 수 있는 원단 클램핑 방법을 도출하였고, 해당 원리를 적용한 원단 장력 인가 장치를 설계 및 제작하여 실제 봉제 자동화 작업에 테스트하여 실제 의류 산업으로의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 대상

본 연구에서는 인장력이 가해지는 직조 구조에 가하는 영향을 파악하기 위해 x방향(warp)과 y방향(weft) 섬유가 한 올씩 상하로 번갈아 교차되어 있는 Fig. 2.1과 같은 평직 직조 원단을 사용하였다. 원단 내 섬유는 직선 형태가 아닌 Fig. 2.2와 같이 구불구불한 형태인 크림프(crimp) 구조를 가지게 된다. 본 논문에서는 직조 원단의 x방향 실을 붉은색, y방향 실을 푸른색으로 구분하였으며, 크림프 레벨이 높은 압축력에 의해 웨이브 형상이 심해질 경우 어두운 색상을 사용하여 표기하였다.

섬유는 단방향으로 긴 1차원 형상을 가지고 있으므로 굽힘 강성이 거의 없어 압축력에 의한 버클링에 약하고 힘을 받지 않는 상태에서도 직선이 아닌 기하학적으로 구불구불한 곡선형 크림프를 갖는다는 특징이 있다[8]. 따라서 섬유에 인장력이 가해지면 크림프가 먼저 펴지는 직선화 현상인 de-crimping이 먼저 발생한 이후에 실의 탄성계수를 기울기로 한 탄성 변형이 순차적으로 발생하게 된다. 따라서 직조 원단의 섬유간 네트워킹에 의해 비신장성 섬유로 구성된 원단도 de-crimping 영역이 존재하여 섬유 재질에 관계없이 구조적으로 신장이 가능한 독특한 특성을 지닌다.

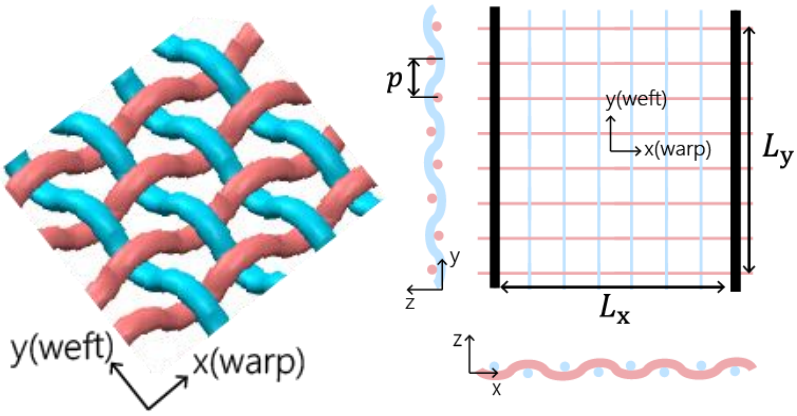


Fig. 2.1 Schematic diagram of plain weave fabric structure

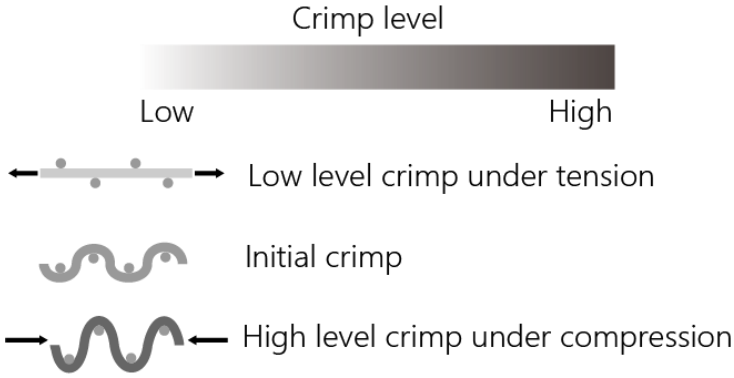


Fig. 2. 2 Schematic of crimp level of fibers

2.2 실험 장치 구성

직조 원단에 인장력이 가해질 때 주름을 확인하기 위해 Fig.2.3 과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 원단과 점 접촉을 하는 점 클램프, 클램프에 장력을 인가하는 장력 발생기, 그리고 주름 가시화를 위한 카메라로 구성하였다. 장력 발생기는 Fig.2.4과 같이 릴이 연결된 DC 모터에 전원을 인가하여 하여 원단에 인장력을 가할 수 있으며 리니어 가이드의 설치 각도를 변경하여 점 클램프에 원하는 방향의 장력을 가할 수 있도록 하였다. 또한 전압 조절을 통해 1-5 N의 인장력을 조절하도록 제작하였다.

실험 대상인 직조 원단은 섬유 직경 0.04 mm, 섬유간 간격 0.04 mm으로 이루어져 있으며 40 mm × 40 mm의 크기로 직조 방향을 구분할 수 있도록 제작하였다.

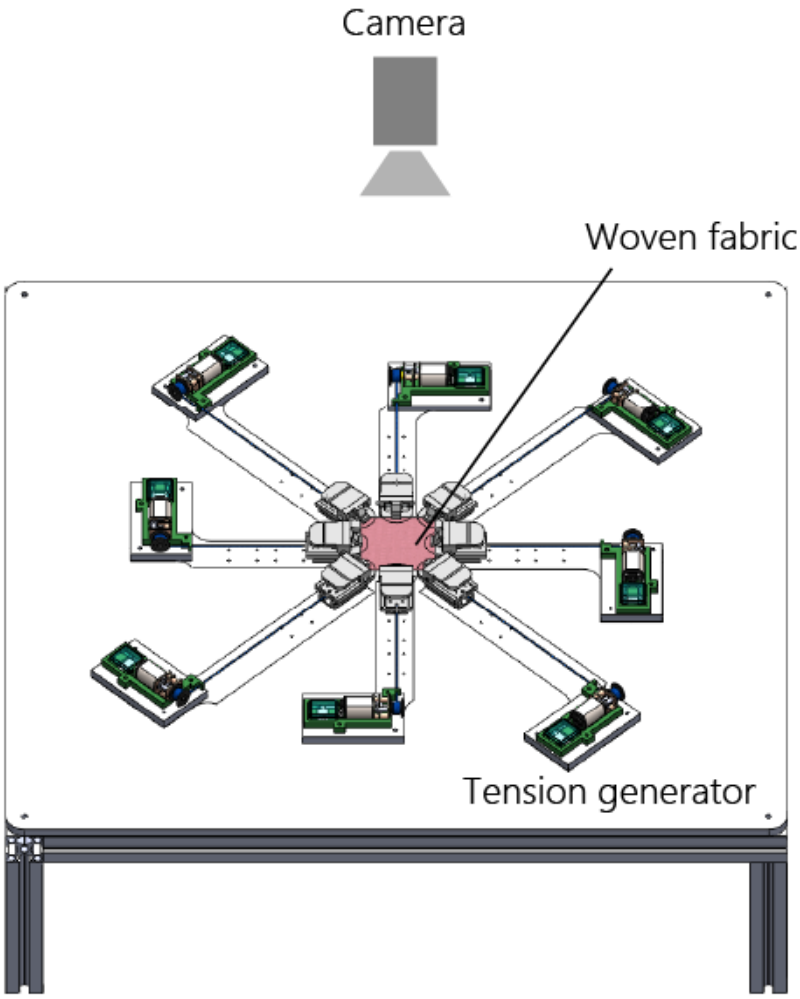


Fig. 2.3 Schematic of experimental setup

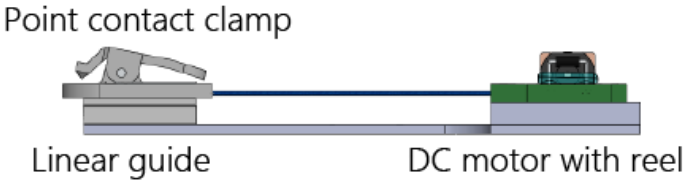


Fig. 2.4 Schematic of tension generator

2.3 실험 방법

직조 원단을 실험 장치의 가이드 라인에 맞춰 배치하고, 8 개의 점 클램프를 사용하여 원단에 인장력을 가한다. 장력의 위치와 방향에 따라 단방향으로 평행하게 인가, 원단 중앙에서 양방향으로 인가, 원단 모서리에서 45도 방향으로 인가, 그리고 이를 중첩한 방법을 사용하는 4 가지 방법에 대하여 각각 실험을 진행하였다. 각 클램핑 방법에 대하여 초기 상태와 장력 인가 후의 모습을 촬영한 후, 원단 외 변형인 주름이 발생한 영역(wrinkle region)을 확인하고 발생 메커니즘에 대해 섬유 스케일에서 분석을 진행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 주름 발생 메커니즘

직조 원단에서의 점 접촉 인장 시 주름 발생 메커니즘은 기존 연구에서 알려진 선 접촉 인장[13]과 비교하면 보다 쉽게 이해할 수 있다. 탄성 시트와 유사하게 원단에 선 접촉 인장력을 가하는 경우, 포아송 효과에 의한 수축으로 주름이 발생한다. 그러나 비신장성 섬유로 구성된 원단에서는 이 포아송 효과가 섬유의 크림프 레벨 교환으로 이루어지게 되는 직조 구조 특유의 포아송 효과가 나타나게 된다. 직조 원단이 Fig. 3.1과 같이 x방향(warp)으로 인장될 경우 해당 섬유들의 크림프는 감소하는 de-crimping 현상이 발생하고, 반대로 y방향(weft) 섬유들의 크림프가 증가하게 된다고 알려져 있다. 따라서 직조 원단이 y방향으로 압축력을 받는 포아송 효과에 의해 주름이 원단 내 초록색 영역에서 발생한다.

이와 다르게 점 접촉 클램프를 사용하는 경우, 포아송 효과에 의한 주름도 발생하지만 이와 더불어 마찰력에 의한 전단 변형으로도 주름이 발생하게 된다(Fig. 3.2). 두 가지 주름은 발생 위치와 형태에 의해 구분될 수 있다. 초록색 영역의 포아송 효과의 압축에 의한 주름은 de-crimping된 섬유를 제외한 영역에서 광범위하게 발생한다는 특징이 있다. 이와 다르게 노란색의 마찰력에 의한 주름은 점 클램프 근처 경계에서 장력과 45 도 방향으로 주름이 발생하며, locking angle이라는 임계값을 지난 이후에만 발생한다는 특징이 있다. 이러한 주름들의 발생

원리에 대해서 섬유 스케일의 크림프 레벨 변형에 대한 모델을 세워 이론적으로 다음과 같이 2 가지 형태의 주름 발생 원리를 도출하였다.

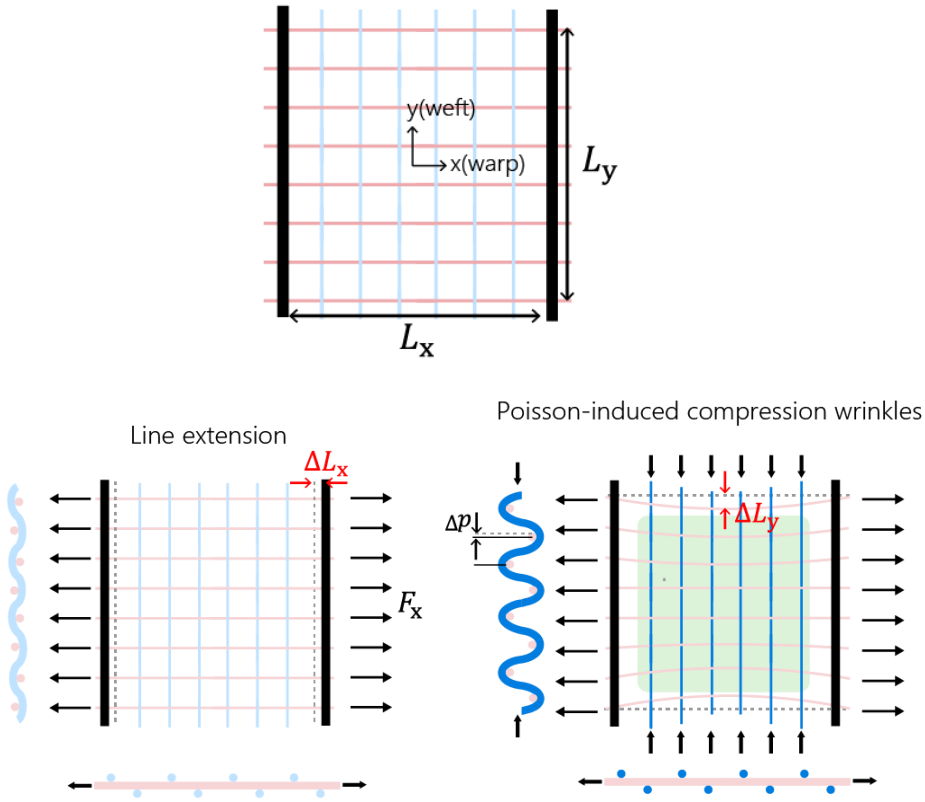


Fig. 3. 1 Wrinkling mechanics under line extension

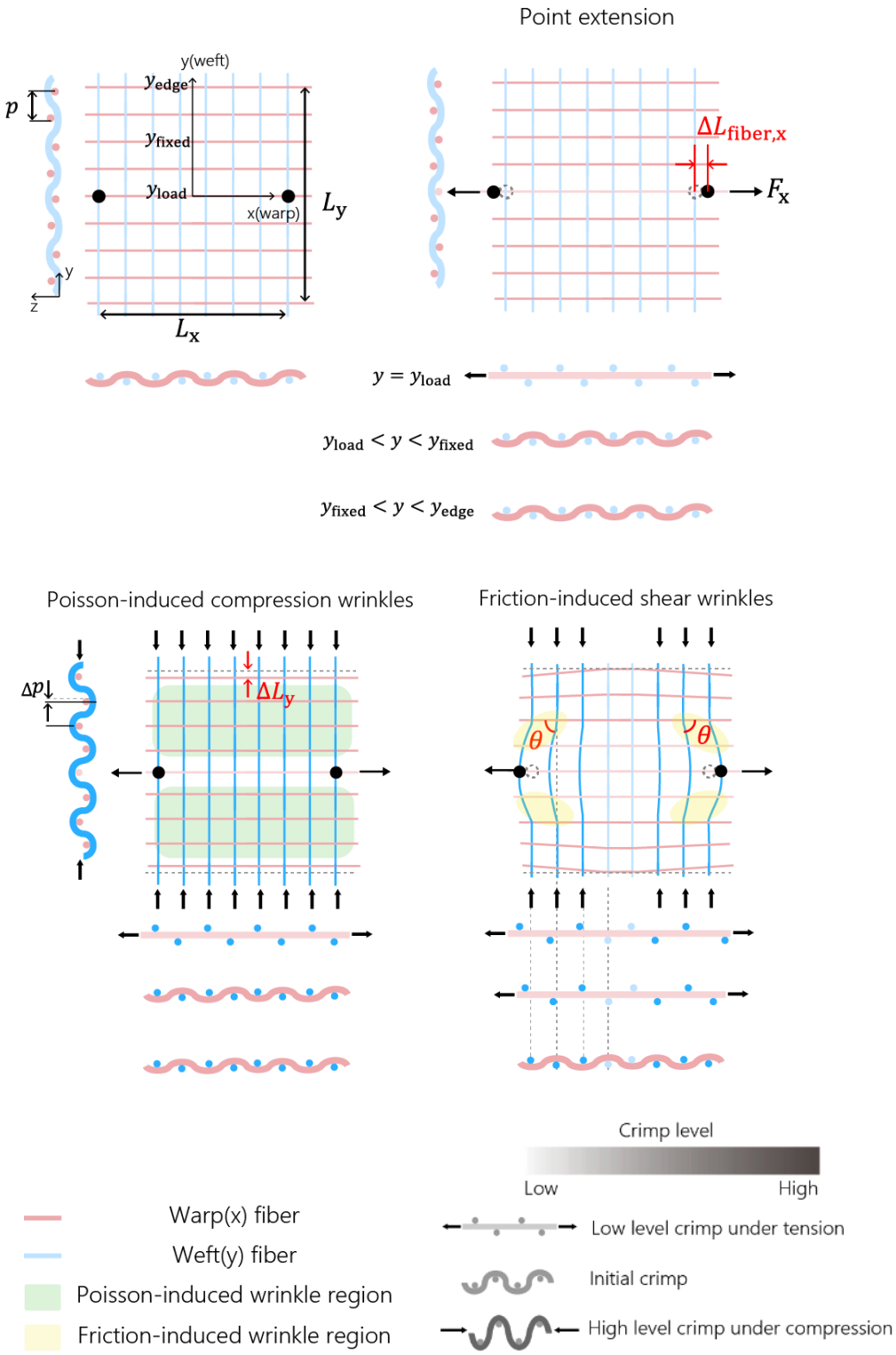


Fig. 3. 2 Wrinkling mechanics under point extension

3.1.1 포아송 효과의 압축에 의한 주름

직조 원단에서도 탄성 시트와 유사하게 포아송 효과에 의해 주름이 발생한다. 선행 연구에서 알려진 바와 같이 선 접촉 클램핑 시 직조 원단에서 발생하는 포아송 효과는 섬유가 교차하여 접촉하는 부분을 rigid joint로 연결하고 각 섬유를 straight line으로 모델링하는 straight-line model(Fig. 3.3)을 적용하면 식(3.1)과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$\nu_x = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{p_y tan\beta}{p_x tan\alpha} \quad (3.1)$$

이 모델을 점 접촉 인장에 적용하기 위해 인장을 받는 섬유와 그에 의해 수축하는 섬유를 고려하여 수정된 straight-line model을 도출할 수 있다 (Fig. 3.4). 이 모델에서 발생하는 total strain energy는 식(3.2)와 같으며 섬유가 비신장성, 비압축성인 조건에서는 bending strain energy만 고려하면 되므로 수정된 straight-line model에 따라 식(3.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_T = U_B + U_E + U_C \quad (3.2)$$

$$U_B = 2nU_{Bx} + 2nU_{By} \quad (3.3)$$

식(3.3)을 직교하는 섬유의 교차점에서의 경계 조건인 식(3.4)과 카스틸리아노 정리 식(3.5)를 사용하면 total strain energy로부터

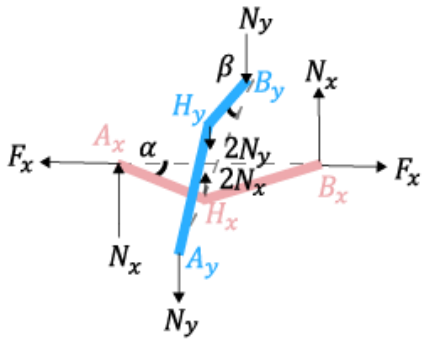
변위를 도출할 수 있다. 따라서 점 접촉 인장 시 발생하는 포아송 효과를 식(3.6)과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{1}{2}\delta(h_x - D_x) = \frac{1}{2}\delta(D_y - h_y) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial U_T}{\partial n_x} + \frac{1}{2n}\frac{\partial U_T}{\partial n_y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\nu_x = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{1}{n}\frac{p_y tan\beta}{p_x tan\alpha} \quad (3.6)$$

직조 원단에서 발생하는 크림프 레벨 교환에 의한 표아송 효과는 선 접촉인 식(3.1)에 비해 점 접촉 시 식(3.6)과 같이 직조된 섬유의 개수에 반비례하는 것을 수식을 통해 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3.5와 같이 직조 원단에 점 접촉 x방향 인장력이 가해지면 해당 섬유의 크림프 레벨만 감소(de-crimping)되고 그에 수직하는 y방향의 모든 섬유는 크림프 레벨이 증가하여 원단이 수축하게 된다. 따라서 인장력이 가해진 섬유를 제외하고 모든 섬유에 y방향 압축력이 가해져 버클링이 발생하므로 초록색 영역에 주름이 발생한다.



ν_x: Poisson's ratio
n: number of fibers in warp/weft direction
α, β: warp/weft weave angle
p_x, p_y: warp/weft fiber-spacing

Fig. 3.3 Schematic illustration of straight−line model

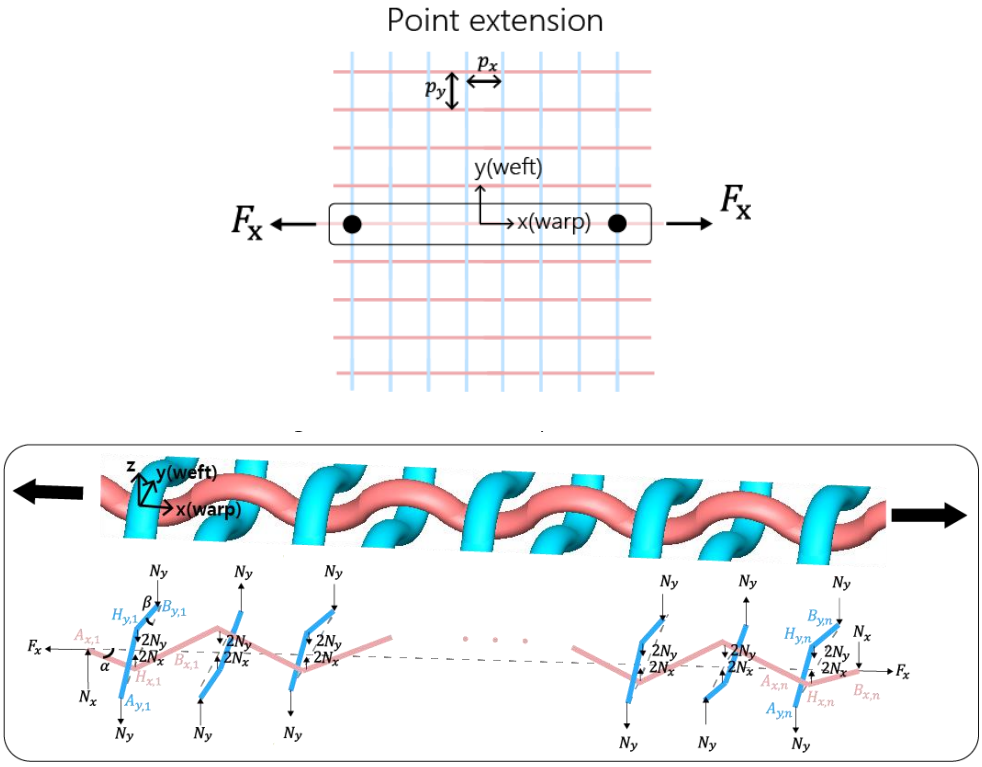


Fig. 3.4 Schematic illustration of revised straight-line model under point tension

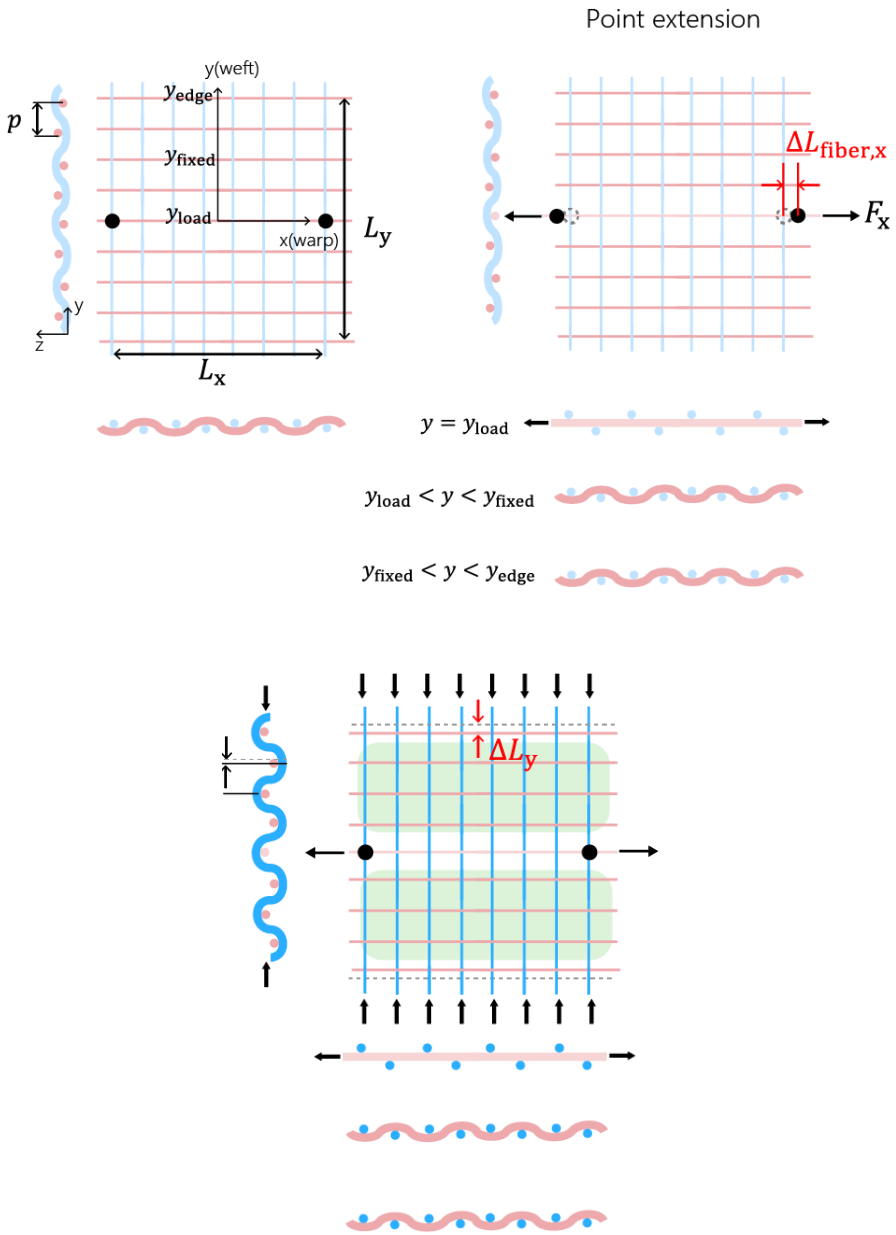


Fig. 3.5 Schematic diagram of Poisson-induced compression wrinkles

3.1.2 마찰력의 전단 변형에 의한 주름

직조 원단에서는 포아송 효과에 의한 주름 외에도 마찰력에 의해 직조 구조에 전단 변형이 발생하여 원단 외 변형이 일어난다. 점 접촉 인장력이 x 방향으로 가해지면 해당 섬유는 크림프 레벨이 낮아지고, 그에 직교한 클램프 근처의 섬유는 Fig. 3.6과 같이 마찰력에 의해 호 모양으로 변형이 일어나게 된다. 이러한 변형은 격자 모양의 직조 구조에 전단 변형을 야기하며, Fig. 3.7와 같이 격자가 90 도에서 점점 각도가 작아지다 임계값(locking angle)을 지나게 되면 원단 외 변형인 주름이 발생한다고 알려져 있다[15]. 또한 클램프에 가까워질수록 전단 변형이 더 크게 나타나므로(Fig. 3.7), 마찰력에 의한 주름은 클램프 근처에서 인장력이 더 커질수록 전파되어 나가게 된다.

전단 변형에 의한 주름이 발생하는 형태는 인장력과 직조 구조가 이루고 있는 각도의 영향을 받는다. Fig 3.8(a)의 실험 이미지와 같이 직조 구조의 45 도 방향 인장력이 가해지는 경우 클램프 근처에서 섬유를 따라 주름이 발생한다. 또한, Fig 3.8(b)와 같이 직조 구조의 90 도 방향으로 인장력이 가해진 경우 45 도 방향으로 노란색 영역의 주름이 발생하며 그 깊이가 더 크게 나타난다. 따라서 마찰력의 전단 변형에 의한 주름은 클램프 근처에서 locking angle을 지난 이후에 발생하며, 인장력과 45 도 방향으로 나타남을 이론과 실험적으로 확인할 수 있었다.

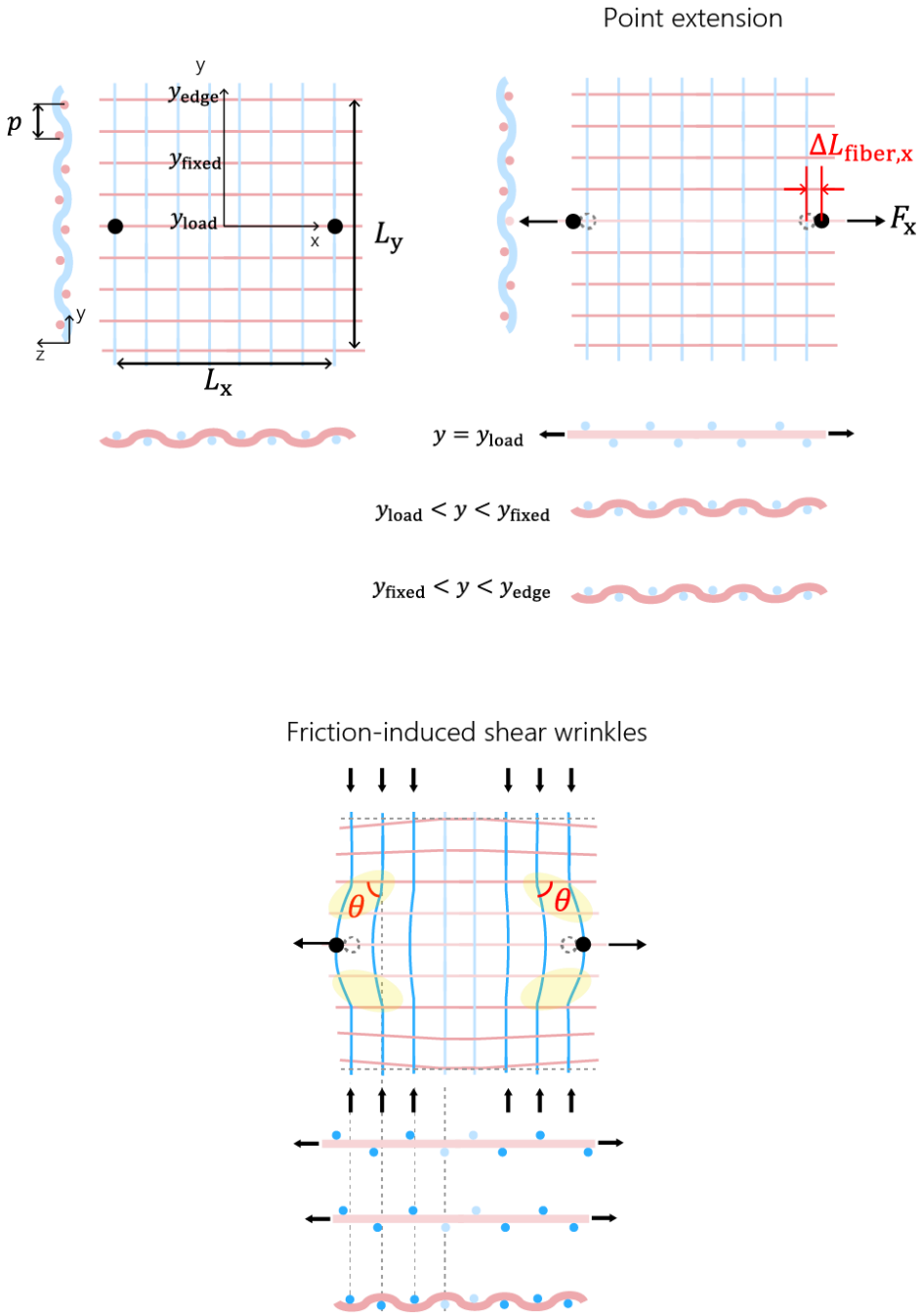


Fig. 3.6 Schematic diagram of friction−induced shear wrinkles

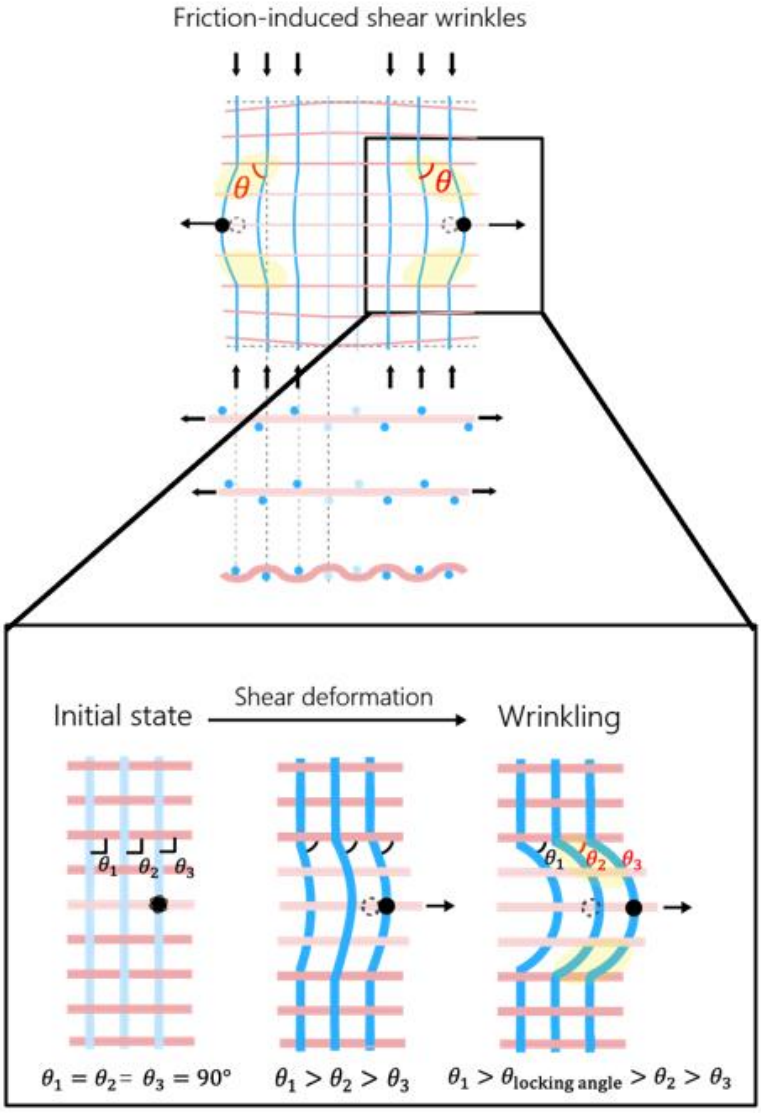


Fig. 3.7 Schematic diagram of shear deformation and wrinkles beyond locking angle

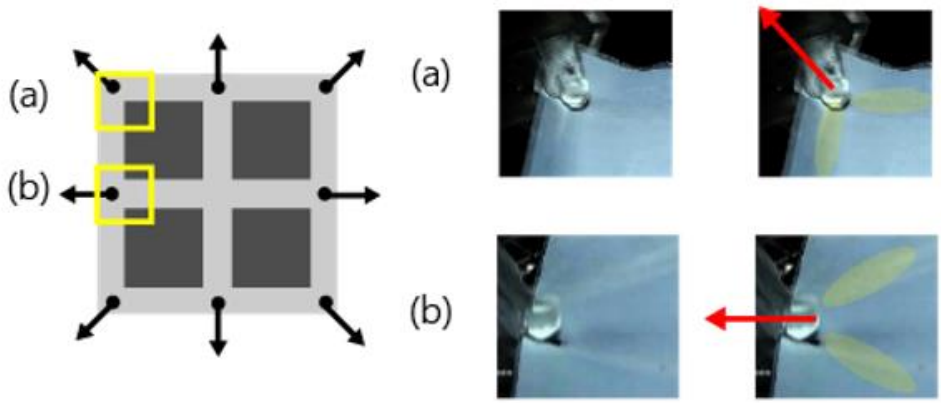


Fig. 3.8 Experimental images of friction-induced shear wrinkles 45° with respect to tension direction (a) 45° (b) 90°

3.2 클램핑 방법에 따른 주름 양상

평직 원단에서 점 접촉 인장 시 주름이 발생하는 2 가지 메커니즘을 종합하여 클램핑 개수와 방향에 따라 4 가지 클램핑 방법을 사용하여 Table. 3.1과 같은 regime map을 이론적으로 도출하였다. 표에 좌측에는 원단에 가해지는 인장력과 주름 발생 영역(wrinkling zone), 섬유의 크림프 레벨이 낮아진 주름이 발생하지 않는 영역(de-crimping zone)을 나누어 표기하였다. 표의 우측에는 주름 발생 영역의 일부를 마이크로 스케일인 섬유 직조 구조를 도식하였으며 이 때 발생하는 주름을 포아송 효과에 의한 주름을 초록색으로, 마찰력에 의한 주름을 노란색으로 표기하였다. 또한 주름이 발생하였을 때 각 방향 섬유들의 크림프 레벨을 나타낸 스케일바를 삽입하여 원단 내 주름 발생의 보조 지표로 사용하였다.

섬유 스케일의 주름 발생 메커니즘을 중첩하면 결과로, 원단에 단방향 인장을 가하는 경우 de-crimping zone을 제외한 내부 영역에서 주름이 크게 발생한다 (Table. 3.1(1)). 원단 직조 구조에 대하여 여러 각도로 인장을 가하면 다른 주름 양상이 발생하게 되는데, Table. 3.1(2)와 같이 직조 방향에 평행한 인장력만을 가하는 경우 중앙에는 십자가 형태의 de-crimping zone이 나타나지만 클램프 부근에서는 실제로 Table. 3.2(2)의 실험 이미지와 같이 마찰에 의한 주름이 대각선 방향으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 직조 구조에 45 도 방향의 인장력만을 가할 경우 Table. 3.2(3)과 같이 마찰력에 의한 주름의 영향은 적게 나타나지만, (1)의 클램핑과 유사하게 원단 중앙부에 포아송 효과에 의한 주름이 크게 나타나게 된다. 따라서

내부에 고르게 인장력을 가하면서 주름을 최소화하기 위해서는 (2)와 (3)의 방법을 중첩하여 원단을 방사형으로 인장해야 한다. Table. 3.2의 클램핑 방법에 따른 주름 발생 이론과 실험 이미지를 종합하면 직조 구조에 대해 전방향으로 인장력을 인가한 (4)의 클램핑 방법이 원단 내 장력이 최소화됨을 알 수 있다.

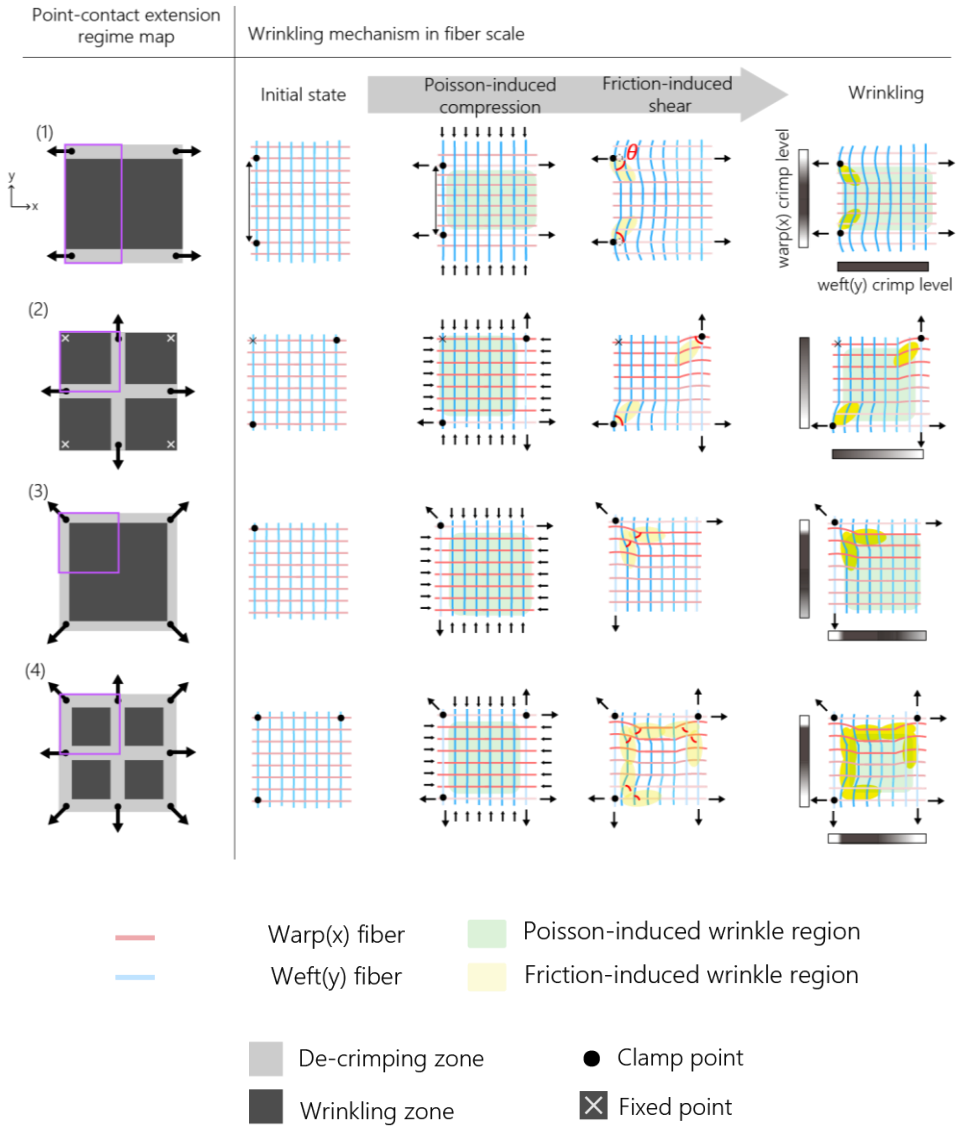


Table. 3.1 Wrinkling regime map under point extension

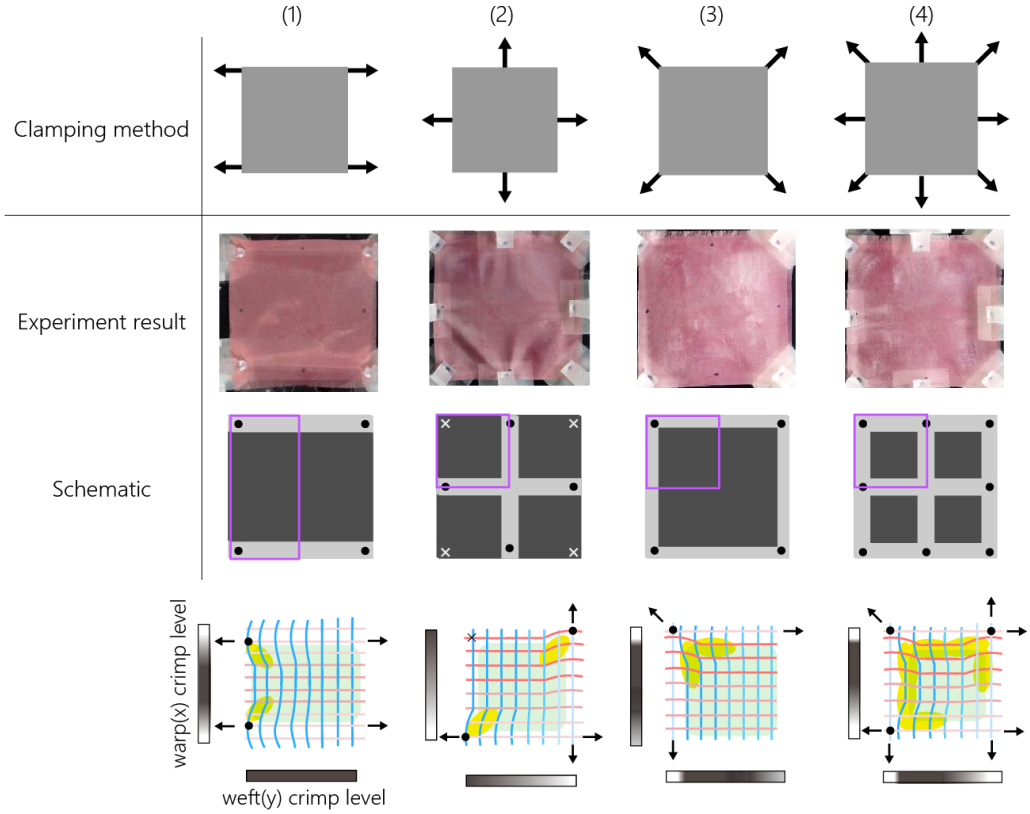


Table. 3.2 Wrinkling regime map and experiment images under point extension

4. 원단 장력 인가 장치

4.1 원단 장력 인가 장치 설계

3 장에서 도출한 주름 발생 메커니즘과 주름 최소화 클램핑 방법을 종합하여, 실제 의류 산업의 봉제 자동화의 원단 고정에 활용될 수 있는 원단 장력 인가 장치를 설계하였다. 장치의 목표는 봉제 시 발생하는 외력에 의한 원단 고정 및 주름 방지이며, 원단에 초기 인장력을 가하여 이를 구현하였다. Fig. 4.1의 점 접촉 클램핑 실험을 통해 임의의 형상의 원단에서도 직교 클램핑보다 방사형 클램핑에서 주름이 최소화됨을 실험적으로 입증하였다. 직교 클램핑 시 클램프가 인가하는 장력과 원단 경계부가 직교하지 않는 오목한 형상에서 주름이 크게 발생하지만, 방사형 클램핑 시에는 장력과 원단 경계부가 90 도를 이룰 수 있어 주름이 감소하게 된다.

원단에 균일한 장력을 인가할 수 있는 장치를 Fig. 4.2와 같이 설계하였고, 장력 조절을 통해 다수의 원단 재질에도 적용이 가능하게 하였다. 기존 산업에서는 원단을 고정하기 위해 패턴마다 소모성 템플릿을 제작하였지만, Fig. 4.2의 원단 장력 인가 장치를 사용하면 임의의 형상의 패턴에 대해 반영구적으로 장력을 조절하여 인가할 수 있다는 장점이 있다.

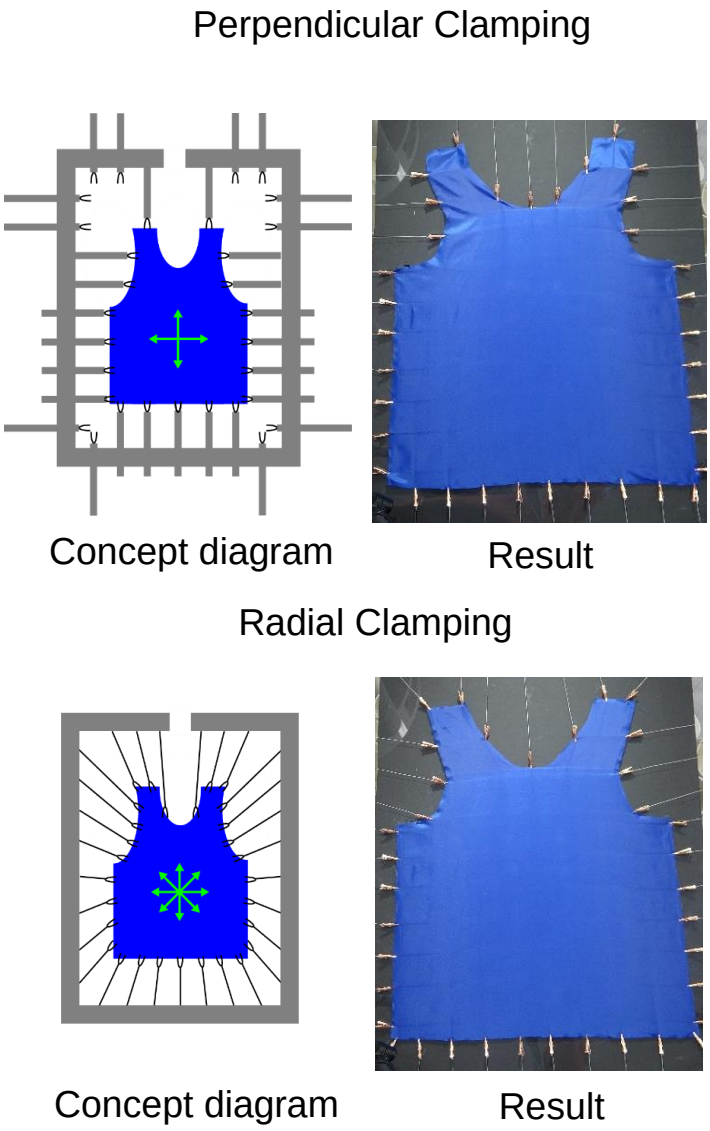


Fig. 4.1 Concept diagram and experimental image compare to perpendicular and radial clamping

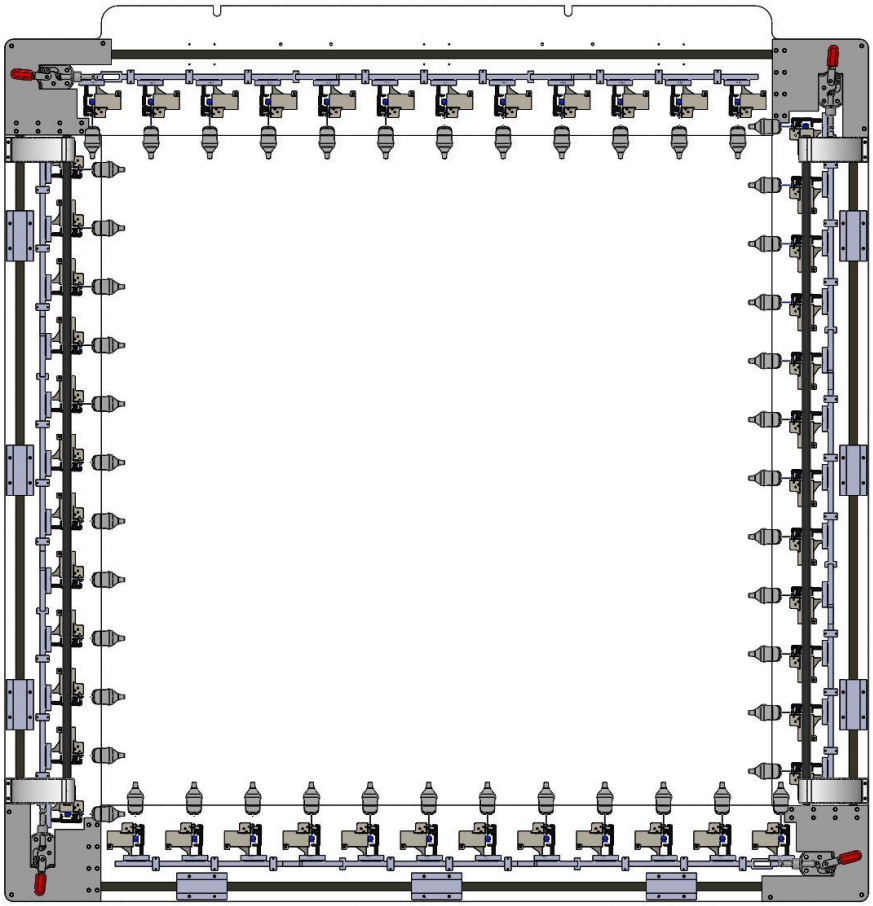


Fig. 4.2 3D CAD design of tension exerting device

4.2 원단 장력 인가 장치 성능 평가

실제 의류 공장에서 사용하는 sleeve 패턴을 사용한 봉제 테스트로 원단 장력 인가 장치의 성능을 검증하였다. 원단 중앙부에 400 mm 길이의 곡선을 봉제하여 기존 의류 산업에서 사용하고 있는 아크릴 템플릿과 비교하고(Fig. 4.3), 실제 공장의 봉제 검증 방법과 동일하게 진행하였다.

곡선 봉제선의 이탈 여부, 봉제 땀의 적절성, 원단의 수축 여부 등을 판별하고, Fig. 4.4와 같이 line detecting 및 이미지 프로세싱을 통하여 봉제선의 오차가 수 마이크로 수준으로 준수한 봉제 결과를 가짐을 증명하였다. 본 원단 장력 인가 장치는 프로토타입 제작을 통해 현지 공장에도 테스트되고 있으며, 의류 자동 봉제 공정을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

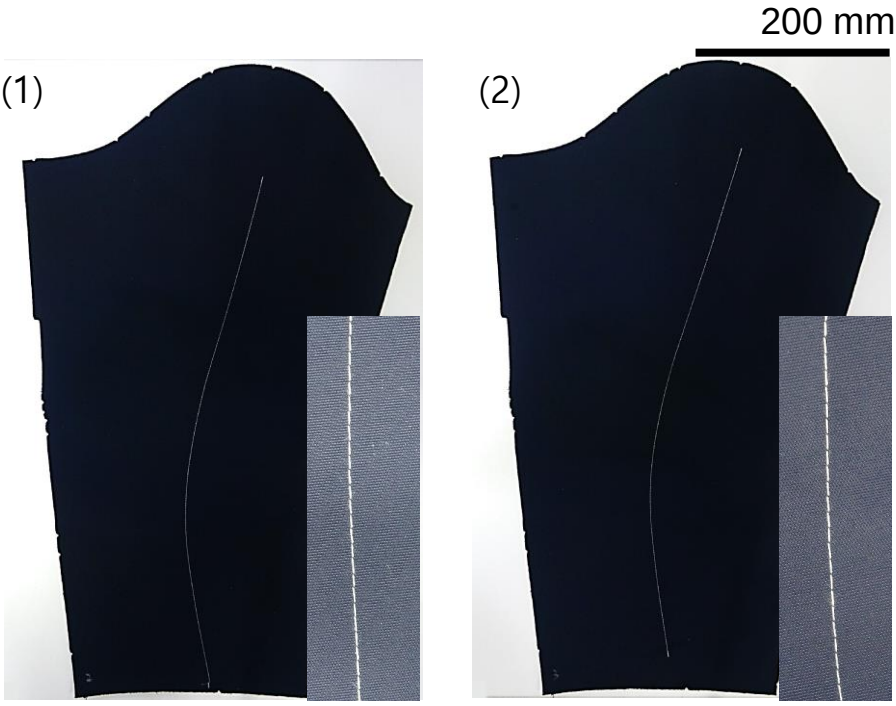


Fig. 4.3 Experimental images of sleeve pattern sewing test (1) tension exerting device (2) acrylic template

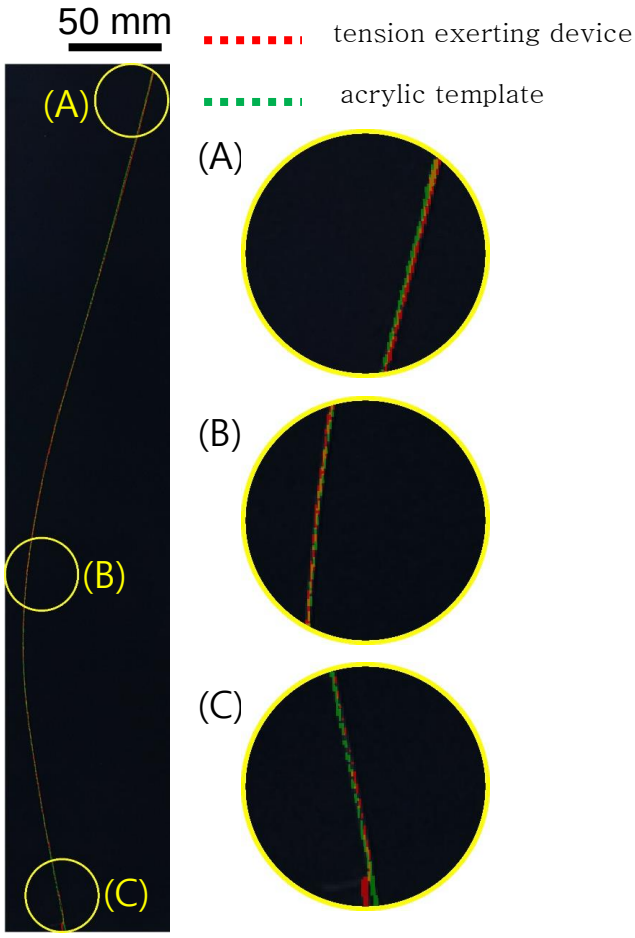


Fig. 4.4 Photograph of experimental images after line detecting image processing (red) tension exerting device (green) acrylic template

5. 결　　론

본 연구에서는 임의의 원단 형상에 인장력을 인가하기 위한 점 접촉 클램핑 방법에 따른 주름을 분석하였다. 점 접촉 시 발생하는 주름은 2 가지로 포아송 효과의 압축에 의한 주름과 마찰력의 전단 변형에 의한 주름으로 나눌 수 있다. 포아송 효과의 압축에 의한 주름은 직조 구조를 이루고 있는 섬유의 크림프 레벨이 커질 때 원단에 수축이 발생하여 발생하며, 마찰력의 전단 변형에 의한 주름은 클램프 근처에서 locking angle을 넘어서면 인장력의 45 도 방향으로 주름이 발생한다. 클램핑 방법을 다양화한 후 이 이론을 적용하면 직조 구조에 평행한 방향과 45 도 방향의 힘이 공존할 때 주름이 최소화되는 것을 확인하였고, 주름을 완화할 수 있는 방사형(radial) 클램핑 장력 인가 방법을 제시하였다. 또한 본 연구를 바탕으로 원단 장력 인가 장치를 제작하여 테스트 과정에 있으며, 의류 산업의 봉제 자동화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

(1)Robert G. Dean and Robert A. Dalrymple, “Water wave mechanics for engineers and scientists”, *World Scientific Publishing Co Inc* (1991)

(2)D Binks and W van de Water, “Nonlinear pattern formation of Faraday waves”, *Physical Review Letters* 78, 4043-4046 (1997)

(3)MT Westra et al., “Patterns of Faraday waves”, *J. Fluid Mech* 496, 1-32 (2003)

(4)M. Kharbedia et al.,” Moulding hydrodynamic 2D-crystals upon parametric Faraday waves in shear-functionalized water surfaces”, *Nature Communications* 12, 1130 (2021)

(5) W. Zhang, J. Vinals, “Pattern formation in weakly damped parametric surface waves driven by two frequency components”, *J. Fluid Mech* 341, 225-244 (1997)

(6)E. Cerda, K. Ravi-Chandar, and L. Mahadevan, “Wrinkling of an elastic sheet under tension”, *Nature* 419, 579-580 (2002)

(7)W. Wong, and S. Pellegrino, “Wrinkled membranes Part 1:

Experiments", *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 1, 3-25 (2006)

(8) A. Kabla, and L. Mahadevan, "Nonlinear mechanics of soft fibrous networks", *J. R. Soc. Interface* 4, 99-106 (2007)

(9) P. Boisse et al., "The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcement and prepregs" *Int J Mater Form* 10, 473-492 (2012)

(10) W. Lee et al., "Bias-extension of woven composite fabric", *Int J Mater Form* Suppl 1, 895-898 (2008)

(11) N. Gokarneshan et al., "Design of 3D textile preform as composite materials for advanced aircraft structure", *International Journal of Research in Engineering and Science* 9, 52-60 (2021)

(12) B. Bridgens et al., "Inter-laboratory comparison of biaxial tests for architectural textiles", *Journal of the Textile Institute* 103, 706-718 (2012)

(13) Paul V. Cavallaro et al., "Decrimping Behavior of Uncoated Plain-woven Fabrics Subjected to Combined Biaxial Tension and Shear Stresses" *Textile Research Journal* 77, 403-416 (2007)

(14) G. A. V. Leaf and K. H. Kandil, "1—The initial load-extension behavior of plain-woven fabrics", *Journal of the Textile Institute* 71, 1-7 (1980)

(15) A. G. Prodromou, J. Chen," On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms", *Compos. Part A* 28, 491-503 (1997)

Abstract

Minimizing wrinkles on woven fabric using point-contact clamps

Seokyoung You

Department of Mechanical Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Wrinkles, which are out-of-plane deformations that occur in fabric, can be observed not only in clothing but also in the garment manufacturing process classified as defects. In this study, the wrinkling mechanism of plain weave fabrics and the clamping method are explored to minimize wrinkles to prevent significant errors of production quality in garment sewing process. In fabrics composed of non-extensible fibers, wrinkles occur due to the weave structure, which is networking between fibers, and the crimp structure of a single fiber. We analyze the wrinkling theory using a point contact clamp to apply a tensile force to an arbitrary shape fabric. First, like elastic sheets, when wrinkles occur due to the Poisson effect, compression occurs by the exchange of the fiber crimp level, not the elongation of the fiber as we known, and it appears in a wide range of shapes. Second, when the fiber is deformed into an arc shape due to friction force, shear deformation occurs near clamp boundary 45° with respect to tension direction

after locking angle. To minimize wrinkles in plain weave fabric, we declare radial clamping extension based on wrinkling mechanism and extension experiments. Also, we design a fabric tension exerting device using our theory and this device can contribute to the automation of the labor-intensive garment industry.

Keywords: Woven fabric, Biaxial extension, Wrinkling, Point-contact, Crimp level

Student number: 2020-21397