



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

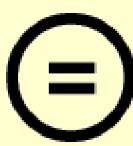
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 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 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



의류학석사 학위논문

소재 특성에 따른 세탁기 구동
전류, 세탁물의 거동과 기계력의
상관성 연구

2023년 08월

서울대학교 대학원
의류학과
김 민 경

소재 특성에 따른 세탁기 구동
전류, 세탁물의 거동과 기계력의
상관성 연구

지도 교수 김 주 연

이 논문을 의류학 석사 학위논문으로 제출함
2023년 05월

서울대학교 대학원
의류학과
김 민 경

김민경의 석사 학위논문을 인준함
2023년 08월

위 원 장 김성민 (인)

부위원장 이수현 (인)

위 원 김주연 (인)

초 록

본 연구에서는 무게, 두께, 수분율 등을 포함한 직물의 물리적 특성이 세탁 거동과 기계력에 미치는 영향과 직물 특성과 모터의 전류 파라미터의 관계를 조사하였다. 이로부터, 기계력에 영향을 미치는 주요한 거동과 직물 특성을 도출하고, 전류 파라미터와 상관성이 있는 직물 특성이 세탁기의 직물 분류 프로세스에 영향을 미치는지 살펴보았다.

수분율은 직물 간 상호작용과 직물의 이동 궤적(distance from center of the drum 표준편차)에 영향을 미쳤다. 수분율이 높은 직물은 직물끼리 잘 엉키고 뭉쳐, 리프터를 따라 상승한 뒤 급격한 하강으로 드럼 오른쪽 하단에서 반복적인 거동을 보였다. 두께, 강연성 및 무게는 직물 형태 변화의 정도 및 빈도(shape factor 표준편차와 평균변화량)에 영향을 미쳤다. 얇고, 가볍고, 유연한 직물은 드럼 회전동안 주로 접힌 채로 거동을 하여 직물 모양의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 거동 형태는 기계력에도 주요한 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 직물의 이동 궤적은 올풀림에 영향을 미쳤다. 주변 직물의 간섭으로 4사분면에 집중된 거동을 보인 직물은 주변 직물에 의한 강한 마찰 및 압축으로 올풀림이 높게 나타났다. 또한 드럼의 회전 동안 직물 형태 변화의 정도와 빈도가 클수록 직물의 굽힘 및 편평으로 인한 기계력이 증가하여 Poka-dot 제거율이 높게 나타났다. 세탁기의 직물 분류 과정에서 건포와 습포 조건 모두 직물 두께가 세탁기 구동 전류값에 영향을 준 것으로 관찰되었다. 일정한 사이즈 직물에서 두께는 부피와 흡수량에 영향을 주며, 이는 드럼 내 직물의 거동 형태에 따라 전류 파라미터가 변하는 원인으로 생각된다.

본 연구에서 직물의 수분율과 두께로 인한 세탁 거동 차이가 기계력에 영향을 주는 것이 직물 특성, 거동, 기계력, 전류 파라미터의 관계에서 조사되었다. 또한, 수분율과 두께는 모터 전류와 상관성을 가지며, 이

를 통하여 전류 파라미터를 활용하여 직물의 분류가 가능하다는 것을 확인하였다. 본 결과는 직물 특성에 적합한 최적 거동을 유도하여 세척 효율을 향상시키는 세탁 코스 개발에 기초 연구로서 기여할 것이다.

주요어 : 직물 특성, 세탁 거동, 기계력, 세탁기 토크 전류, 드럼 세탁기
학 번 : 2021-26602

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 필요성 및 목적.....	1
제 2 절 이론적 배경	4
2.1 드럼 세탁기 내 기계력의 작용.....	4
2.2 직물 거동 분석	8
2.3 직물 거동이 기계력에 미치는 영향.....	14
2.4 직물 거동과 기계력에 영향을 미치는 요인	15
2.5 모터 전류와 세탁기의 직물 분류 및 감지	17
제 2 장 실 험	19
제 1 절 시료.....	19
제 2 절 시료의 물리적 특성 평가	20
2.1 두께 및 무게.....	20
2.2 기공도	20
2.3 강연성	21
2.4 정지마찰계수.....	22
2.5 수분율	23
2.6 흡수율	23
제 3 절 세탁기	24
제 4 절 직물 거동 분석	27
4.1 거동 분석 방법	27
4.2 거동 분석 조건	28
4.3 직물 거동지수	28
제 5 절 기계력 평가	30
5.1 기계력 평가 시험포	30

5.2 기계력 평가 조건	32
제 6 절 모터 전류 측정	33
제 7 절 통계 분석	34
제 3 장 결과 및 고찰	35
제 1 절 직물 선별과 물리적 특성 평가	35
제 2 절 직물 특성과 거동	40
제 3 절 직물 특성과 거동이 기계력에 미치는 영향	51
3.1 올풀림(EMPA 304)에 영향을 미치는 직물 특성과 거동	51
3.2 Poka-dot 제거율(EMPA 306)에 영향을 미치는 직물 특성과 거동	54
제 4 절 세탁기 구동 전류 파라미터와 직물 특성 간의 관계	56
4.1 직물 특성과 건포 전류 파라미터의 관계	56
4.2 직물 특성과 습포 전류 파라미터의 관계	58
4.3 전류 파라미터를 이용한 직물 분류 체계	61
제 4 장 결 론	64
참고 문헌	65
※Appendix	68

표 목차

Table 1. Experiment condition for each set up	25
Table 2. Fabric movement indices observed in this study	29
Table 3. Tukey' s pairwise test result and process of selecting fabric types based on fabric weight.....	35
Table 4. Tukey' s pairwise test result and process of selecting fabric types based on moisture regain	36
Table 5. Physical properties of fabrics.....	37
Table 6. Correlation between fabric properties.....	38
Table 7. Image of selected textiles and the number of loaded sheets in a washer.	39

그림 목차

Figure 1. Force exerted on the fabric when located at the 4th quadrant of the drum.	6
Figure 2. Force exerted on the fabric when located at the 1st quadrant of the drum.	8
Figure 3. Movement indices developed in the study of Yun & Park.....	12
Figure 4. Movement indices that are used and newly developed in the study of Kim et al.	13
Figure 5. Schematic of the laundry sample.	19
Figure 6. Measurement of the overhang length by Cantilever bending test.....	21
Figure 7. Measuring friction coefficient of the fabric specimen.	22
Figure 8. (a) Set up for fabric movement observation. (b) Commercial washer used for the evaluation of mechanical action.	24
Figure 9. (a) Experiment condition for laundering experiments. (b) Washing protocol for laundering experiments.	26
Figure 10. Tracing fabric movement with TEMA software.....	27
Figure 11. Placement of the EMPA fabrics on the laundry specimen.	31
Figure 12. EMPA fabrics before and after washing.....	31
Figure 13. Current parameters extracted from Qscope.....	33
Figure 14. Individual fabric movement (micro movement) patterns at the front view.....	41
Figure 15. Correlation between fabric properties and ‘distance from center of drum’ standard deviation.....	43
Figure 16. Diagram of the maximum and minimum ‘shape factor.’	45
Figure 17. Shape change of the fabric by each frame.....	47

Figure 18. Correlation between fabric properties and ‘shape factor.’	50
Figure 19. Correlation between wet friction coefficient and thread removal.....	52
Figure 20. Washer dynamics 3D trajectory.....	53
Figure 21. Correlation between ‘distance from center of the drum’ standard deviation and thread removal.	53
Figure 22. Correlations between Poka-dot removal rate, fabric property, and fabric movements.	55
Figure 23. Fabric movement and motor current in dry condition. ..	57
Figure 24. Correlation between dry $Q_{\text{area/s}}$ and thickness.	57
Figure 25. Correlation between wet $Q_{\text{area/s}}$ and thickness.	58
Figure 26. Fabric trajectory on the side.	59
Figure 27. Correlation between wet Q_{sd} and Moisture regain.....	60
Figure 28. Fabric classification process based on average difference between fabric types.	63

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성 및 목적

세탁은 직물 표면에 부착된 오구를 제거하는 과정이다. 세제를 이용하여 섬유와 오구의 분리가 일어나면, 기계력이 물리적으로 오구를 섬유 표면으로부터 제거하고 탈락한 오구를 세액으로 안정적으로 분산시킨다[1]. 기계력은 섬유로부터 오구를 분리하고 재오염을 방지하기 위해 필수적이며, 수류의 형성, 직물의 굽힘과 마찰을 통하여 기계력을 직물에 부과한다[2].

드럼 세탁기는 드럼의 회전을 통하여 세액과 직물을 이동시킨다. 세액과 직물의 이동은 직물 표면과 직조 사이에 수류를 형성하고, 직물의 굴신 및 마찰이 일어나도록 한다[3]. 드럼 회전 속도, 모터의 on/off time, 전체 세탁 시간 등을 통하여 기계력을 조절할 수 있으며, 이는 직물 거동에 영향을 미쳐 직물 상호작용의 형태를 달라지게 한다[4]. 이 때, 직물이 받는 기계력이 과도하면 직물의 손상이 일어나고[5-7], 기계력이 충분하지 않으면 오구 제거가 충분히 이뤄지지 않는다[8]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 세탁물의 최적 거동 및 기계력 조건을 도출하기 위한 연구가 진행되어 왔다[4, 9, 10].

일반적으로 세탁 중 직물의 거동 형태가 sliding, falling, rotating 이 모두 포함된 복합적인 패턴을 보일 때 세척성이 높다고 보고되었다. 하지만, 각 거동 패턴이 형성되는 세탁 조건은 직물의 단위 면적당 무게, 개수, 크기, 드레이프 계수 등을 포함한 물리적 특성에 따라 달랐다[9]. 같은 개수의 직물이 드럼 세탁기에 투입되었을 때, 무겁고 드레이프성이 높은 직물은 가볍고 유연한 직물보다 더 낮은 rpm에서도 복합 거동을 보였고, 가볍고 유연한 직물이 복합 거동을 보이기 위해서는 더 높은 rpm 이 필요하였다[9]. 하지만 선행 연구에서는 직물의 물리적 특성에 따른 거동 분석을 직물 낱개 혹은 1 kg 미만의 부하에 대하여 수행하였다. 그리고 2 ~ 3 kg 세탁물의 거동을 관찰한 연구에서는

대부분 1~2 개의 직물 종류에 대한 분석만 이루어졌다[11, 12]. 실제 세탁 환경에서는 다양한 부하에서 많은 종류의 의류 직물이 세탁되고 있으므로[13~15], 더 많은 부하 및 의류 직물 종류에 대한 세탁 실험 결과를 도출하여 세탁 코스를 개발할 필요가 있다.

최근 인공지능을 활용하여 세탁물 특성에 적합한 세탁 코스가 자동으로 설정되는 기술이 개발되고 있다. Woo et al. [16]의 연구에서는 모터 전류값을 획득하고, 전류의 평균과 표준편차를 인공신경망에 학습시켜 세탁물 종류(일반의류, 섬세의류, 타올류)를 식별할 수 있다고 하였다. 세탁물은 흡수율을 포함한 특성이 서로 다르며, 이것이 전류값에 영향을 미쳐 세탁물 종류의 분류가 가능하다고 보고하였다. 해당 연구에서는 직물 구조나 섬유 구성에 따른 분류가 아닌 세탁물을 3 가지 종류로 나누어 모터 전류를 비교하였으나, 섬유 소재와 직물 구조는 세탁 조건을 결정하는 데에 중요한 역할을 한다. 따라서, 수분율, 두께, 강연성 등 세부적인 직물의 물리적 특성에 따른 분류가 필요하다고 생각된다. 그리고 이러한 특성으로 인하여 생성되는 주요한 거동과 기계력 사이의 관계를 이해함으로써, 직물 특성에 적합한 기계력을 부과하는 세탁 코스를 제공할 수 있다.

따라서, 본 연구는 3 kg 부하량에서 직물의 특성이 세탁 거동과 기계력에 미치는 영향을 분석하고, 직물의 물리적 특성과 전류 파라미터의 관계를 조사하고자 한다. 이를 위해, 첫째, 9 가지 직물 시료의 무게, 두께, 강연성, 마찰 계수 등 물리적 특성을 측정하고, 직물의 개별거동과 집합거동을 추적하고자 한다. 다음으로, 직물 거동에 영향을 미치는 주요한 직물 특성을 규명하고, 직물 특성과 거동의 관계가 기계력에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 마지막으로, 모터 구동 전류와 직물 특성 사이의 상관성 분석을 실시하고 직물 특성의 분류 과정을 조사하고자 한다. 궁극적으로 본 연구에서 3 kg 부하에서 직물이 받는 기계력에 관여하는 직물 특성과 거동을 분석하고, 모터 전류 파라미터와 상관성이 높은 주요 직물 특성을 도출함으로써

인공지능 세탁기의 효율적인 학습 및 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

제 2 절 이론적 배경

2.1 드럼 세탁기 내 기계력의 작용

Muir et al. [17]은 수류의 종류에 따라 직물에 가해지는 힘을 분석하였다. 직물 표면을 따라 흐르는 cross flow, 표면에 대하여 수직으로 흐르는 through flow, cross flow 와 through flow 가 동시에 흐르는 수류 세 가지 경우에 대하여 직물에 가해지는 힘을 관찰하였다. 그 결과 직물의 전단 및 inter-yarn pore 크기 증가는 through flow 에서 가장 크게 일어났으며, 이는 직물이 through flow 에서 힘을 가장 강하게 받은 것을 의미한다. 세탁에서는 이와 같이 수류 형성을 통하여 직물 형태 변형을 유도하고 그 과정에서 직물이 힘을 받아 오구를 섬유로부터 분리할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

하지만 고체 표면 바로 위 $1\text{ }\mu\text{m}$ 내외에 부착된 오구는 유체 흐름에 의한 기계력을 받기가 어렵다[18]. 이는 점성으로 인하여 유체가 고체 표면에 접할 때, 속도가 0 이 되는 구간이 형성되어 유체 흐름이 표면에 작용하지 않기 때문이다(no-slip boundary condition) [19, 20]. 따라서, 이 구간에 부착된 오구를 제거하기 위하여 직물의 굽힘 및 마찰과 같은 다른 형태의 힘을 추가적으로 공급해야 한다. 직물의 굽힘으로 섬유 외부에서는 인장이, 섬유 내부에서는 압축이 일어난다. 섬유의 인장과 압축으로 섬유 내부의 세액이 짜내어져 미세 유동이 형성되고, 미세 유동은 직물 속 오구를 직물 밖으로 운반시킨다[21].

드럼세탁기는 드럼을 회전시켜 직물의 거동을 유도하는데, 크게 sliding, falling, rotating 패턴으로 나뉜다[10]. 이러한 거동 패턴을 통하여 직물이 수류의 영향을 받아 굽힘 및 마찰이 일어난다. 직물의 거동은 드럼 회전으로 인한 원심력(Eq. 1), 직물과 드럼 벽 사이의 마찰력(Eq. 2), 중력(Eq. 3)의 작용에 의해 생성된다[21].

원심력은 물체가 회전을 유지할 수 있도록 한다[22]. Eq. 1 과 같이 원심력은 물체의 질량(m), 회전반경(r), 각속도(ω)의 관계로 표현되며,

세탁기에서 원심력은 직물의 질량, 드럼 반경, 그리고 rpm 의 영향을 받는다.

$$F_c = \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2 \quad (1)$$

F_c : centrifugal force

m : mass

v : velocity

r : radius of rotation

ω : angular velocity

마찰력은 물체 간 접촉 면적에서 발생하는 저항력으로 운동 방향과 반대 방향으로 작용한다 [23]. 경사면에서의 마찰력(F_s)은 Eq. 2에서와 같이 수직 항력(N , $mg\cos\theta$, $mr\omega^2$)과 마찰계수(μ)로 표현된다[24]. 세탁기에서 직물의 마찰력은 직물의 질량, 직물-드럼과 직물-직물표면 사이의 마찰계수에 비례한다. 그리고 직물이 들어올려지면서 직물이 상승하는 각도(θ)가 커지면서, $\cos\theta$ 값이 감소하여, 마찰력이 줄어든다(Figure 1). 직물은 sliding 에 대한 수직항력($mg\cos\theta$) 뿐만이 아니라 원운동에 대한 수직항력($mr\omega^2$)도 받고 있어, 직물에 작용하는 전체 마찰력을 $\mu mg\cos\theta + \mu mr\omega^2$ 로 나타낼 수 있다. 직물과 드럼벽 사이의 마찰력은 직물이 드럼벽에 붙어 회전할 수 있도록 하고, 직물끼리의 마찰력은 직물끼리 엉키거나 비벼지면서 기계력이 직물에 가해지도록 한다. [9, 25-27]

$$F_s = \mu F_N = \mu mg\cos\theta = \mu mr\omega^2 \quad (2)$$

F_s : static frictional force

F_N : normal force

μ : friction coefficient

m: mass

g: acceleration of gravity

θ : angle of inclined surface (rad)

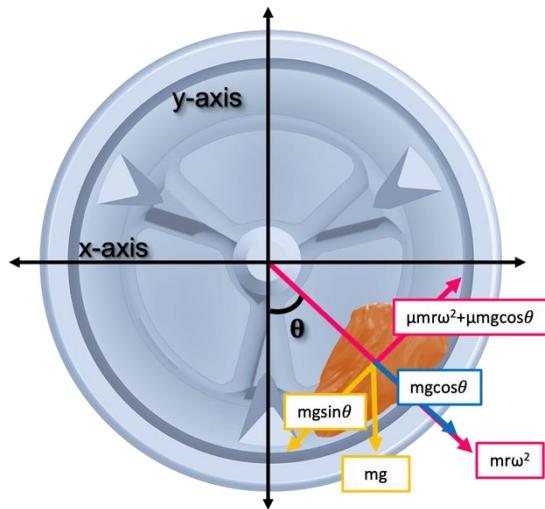


Figure 1. Force exerted on the fabric when located at the 4th quadrant of the drum.

중력은 지구가 물체를 아래로 잡아당기는 힘으로, 물체의 질량에 비례한다[24]. Eq. 3에 따라 세탁기에서 직물에 작용하는 중력은 직물 무게에 의해 결정된다. 직물과 벽 사이의 마찰력과 원심력보다 중력이 더 크게 작용하면, 직물의 낙하 및 sliding이 일어난다.

$$F_G = mg \quad (3)$$

F_G : gravitational force

m: mass

g: acceleration of gravity

드럼 중앙을 원점으로 했을 때, 직물이 4 사분면에 있을 때와 1 사분면에 있을 때에는 다음과 같이 직물 거동을 설명할 수 있다[9] (Figure 1, Figure 2). 직물이 4 사분면에 위치할 때에는 주로 중력에 의한 sliding force ($mgsin \theta$)와 세탁물이 드럼벽에 달라붙을 수 있도록 하는 마찰력 ($\mu mr\omega^2 + \mu mgcos\theta$)이 함께 작용하여 직물 거동에 영향을 미친다[9, 26, 28]. 직물의 마찰계수와 무게가 작으면 드럼벽과 직물 사이에 충분한 마찰력이 작용하지 않는다. 따라서 중력이 더 크게 작용하여 직물은 드럼 회전 반대 방향으로 리프터를 넘으면서 미끄러지게 된다. 반면에 마찰력이 중력보다 더 강하게 작용하게 되면 직물은 리프터를 타고 상승하는 거동을 보인다[9].

직물이 리프터를 타고 상승하여 1 사분면에 위치할 때 원심력 ($mr\omega^2$)과 마찰력 ($\mu mr\omega^2 + \mu mgcos(\pi - \theta)$)은 직물이 회전운동을 유지할 수 있도록 한다[9]. 반면 sliding force ($mgsin(\pi - \theta)$)와 중력(mg)은 직물의 회전운동을 간섭하는 힘으로, 직물에 작용하는 중력이 원심력보다 커지면 직물은 낙하한다 [9]. 또한 직물의 중심각이 최대지점에 이를 때 ($\theta = \pi$), 중력과 sliding force 보다 원심력과 마찰력이 더 크면 직물은 회전 운동을 유지한다[9, 26].

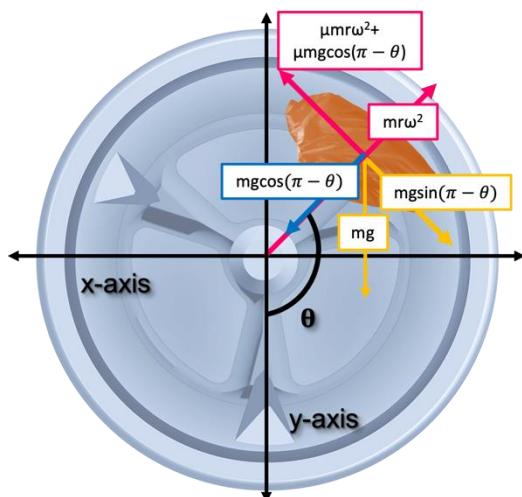


Figure 2. Force exerted on the fabric when located at the 1st quadrant of the drum.

직물 중심각이 최대지점을 ($\theta = \pi$) 넘은 2 사분면과 3 사분면에서는 세탁기가 돌아가는 방향으로 sliding force 가 작용하고 그 반대 방향으로는 마찰력이 작용한다. 하지만, 이 두 사분면에서는 sliding 방향이 드럼이 회전하는 방향과 같으므로 원심력이 더 강하게 영향을 미친다. 따라서 2, 3 사분면의 직물은 주로 리프터를 따라 회전한다[29].

2.2 직물 거동 분석

2.2.1 거동 촬영

Balt et al.[30]은 gamma camera 를 사용하여 세탁물에 부착된 방사능 트레이서를 추적하여 직물 거동 분석을 하였다. 카메라에 찍힌 사진을 사용하여 드럼 내부에서 직물의 위치 및 높이를 추적하였으며, 부하량과 직물 종류에 따른 거동을 비교하였다. Mac Namara et al.[31]은 tracer particle 의 양자와 전자가 소멸하면서 생겨나는 방사선을 추적하는 positron emission particle tracking (PEPT) 방법을 사용하였고, 드럼 내 직물의 위치, 속도 등을 추적하였다. 위 두 연구에서 사용한 방법은 보이지 않는 드럼 속을 non-invasive 한 방법으로 물체의 움직임을 추적할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히 PEPT 분석방법은 물체를 3 차원으로 추적함과 동시에 빠르게 움직이는 particle 의 거동을 감지할 수 있다. 하지만 방사성 물질을 추적하는 특수한 분석 장비가 필요하며 위험한 환경속에서 실험을 진행한다는 단점이 있다.

Yun et al.[4]은 드럼 세탁기 앞면에 초고속 카메라를 설치하여 직물 거동을 촬영하고 표지 직물의 윤곽선을 추적하여 무게 중심점을 도출하는 방법으로 거동분석을 실행하였다. 해당 연구에서는 드럼통 내 중심을 원점으로 하여 2 차원 좌표계를 형성한 뒤, 직물 무게 중심점을 위치 좌표로 변환하였다. 또한 직물 거동지수로 거동을 수치화하여 통계적 분석을 실시하였다. Kim et al.[32]의 연구에서는 앞선 연구

방법을 토대로 세탁기 주변에 3 차원 공간을 형성하여 드럼 앞면인 XY 평면과 측면인 YZ 평면에 대한 직물 움직임을 분석하였다. 위 두 연구에서 사용한 거동 촬영 방식은 직물중심점을 좌표로 변환하여 직물 거동의 수치화와 시각화가 가능하고, 유해한 환경에서 실험이 진행되지 않는다는 장점을 가진다. 그러나 세탁기 벽을 투명하게 개조해야 하고, 초고속 카메라 및 이미지 분석 소프트웨어가 필요하며, 이미지의 윤곽을 캡처하기 위한 수작업이 요구된다는 단점이 있다.

2.2.2 직물 거동지수

Yun & Park[10]은 세척성에 영향을 미치는 세탁 거동과 조건을 밝히기 위해 직물 거동지수를 개발하였다. 해당 연구에서는 직물 낱개 혹은 1 kg 미만의 부하에서 실험을 진행하여 직물 개별에 대한 거동지수로써(micro movement) Figure 3 와 같은 거동지수를 분석하였다. Kim et al.[32]의 연구에서는 펄세이터가 도입된 세탁기에서 세탁물 2.5 kg 의 거동을 추적하였다. 세탁 거동을 3 차원으로 추적하기 위하여 세탁기 옆면에서 보인 직물의 움직임을 나타내는 거동지수가 추가로 개발되었다. 2.5 kg 부하에서는 드럼 내 많은 직물들이 동시에 상호작용을 보여 표지 직물 하나만으로 전체 거동을 나타내기에 부족하였다. 따라서, 세탁물 전체 집합체의 거동인 macro 거동지수가 도출되었다(Figure 4).

Yun & Park[10]과 Kim et al.[32]은 매 프레임마다 각 거동지수를 추출하였으며, 실험 1 회에 대하여 거동지수의 평균, 표준편차, 평균변화량을 도출하였다. 거동지수의 표준편차는 각 프레임에서의 거동지수와 평균 거동지수와의 차이를 제곱한 값의 평균치로, 거동지수가 평균으로부터 얼마나 분산되어 있는가를 나타낸다(Eq. 4). 평균변화량은 각 프레임 사이의 거동 지수 차이의 절댓값의 평균치로, 매 프레임당 거동지수의 변화 정도를 나타내는 수치이다(Eq. 5). 직물

거동지수의 표준편차와 평균 변화량을 통하여 거동 변화의 정도 및 빈도를 나타내는 척도로 보았다.

$$\text{Standard deviation of movement index} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

x_i : fabric movement index of the i^{th} frame

\bar{x} : average change of movement index

$$\text{Average change of movement index} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |x_{i+1} - x_i|}{n-1} \quad (5)$$

개별 거동지수(micro movement)는 직물 한 장의 거동을 나타낸다. 다량의 직물이 드럼에 로딩되었을 때, 한 장의 염색한 직물을 표지 직물로 설정하여 개별 직물의 움직임을 추적하였다. Yun & Park[9]의 연구에서 직물 개별의 거동은 크게 sliding, falling, rotating 으로 나뉘었다. 이러한 거동을 수치적으로 파악하기 위해 직물의 무게중심점, 윤곽선, 거동 형태를 나타내는 개별 거동지수를 개발하였다[10].

무게중심점을 나타내는 거동지수로 직물의 이동 경로를 파악할 수 있으며, ‘distance from center of the drum’, ‘angle change of the gravity center’, ‘speed difference between drum and fabric’, ‘total distance moved’가 해당되었다. ‘Distance from center of the drum’은 직물 무게중심과 드럼 중심 사이 거리를 나타낸다. ‘distance from the center of the drum’ 값이 높고, 표준편차가 낮으면 직물이 드럼 벽 쪽에서 회전 혹은 슬라이딩을 자주 한다는 것을 의미하고 ‘distance from the center of the drum’이 낮고 표준편차가 높으면 직물이 드럼 벽과 중심을 오가는 움직임을 보이는 것을 의미한다. 평균 변화량이 높다는 것은 직물이 자주 드럼 중심과 벽 쪽을 오간다는 것을 나타낸다. ‘angle change of the gravity center’는 연속적인 두 프레임의 직물 무게중심점을 드럼 중심(원점)과 연결했을 때 만들어지는 각이다. 해당 각이 작을 때, 직물 이동이 적은 것을 나타내며 주로 리프터를 건널

때를 나타내고, 변화각이 클 때는 직물이 회전할 때를 나타낸다. 이 거동지수의 평균변화량과 표준편차가 클 때는 직물이 낙하하는 등 직물의 방향 전환이 자주 일어남을 뜻한다. ‘Total distance moved’는 직물 무게중심의 이동한 거리의 총합으로, sliding 일 때 가장 적게 나타나고 rotating 거동을 보일 때 높게 나타난다.

직물 윤곽선을 나타내는 거동 지수로는 ‘outline length’, ‘fabric area’, ‘shape factor’, ‘number of unfolding’ 이 있다. 해당 거동지수는 직물의 모양 변화의 정도를 나타낸다. ‘outline length’은 직물의 외곽선 길이, ‘fabric area’는 직물의 면적, ‘shape factor’는 직물의 면적을 외곽선으로 나눈 값이다. 세 개의 거동지수가 높으면 주로 직물이 펼쳐져 있는 상태이며, 작으면 주로 직물이 구겨져서 접혀 있는 상태이다. 또한 표준편차와 평균변화량이 높으면 접힘과 펼침을 통하여 직물의 모양이 많이 변했음을 의미한다. ‘number of unfolding’은 회전하는 동안 직물이 펼쳐진 횟수를 의미하며, 펼침 횟수가 높을수록 직물의 윤곽선 길이가 증가함을 나타낸다.

직물 거동 형태를 나타내는 나머지의 거동지수는 직물의 회전, 슬라이딩, 2 사분면에 위치하는 횟수 등 관찰자가 거동 패턴이 나타난 횟수를 직접 세는 지수로 이루어져 있다.

Kim et al. [32]의 연구에서 사용된 세탁기는 펌웨어가 도입된 세탁기로, 펌웨어가 도입된 세탁기는 일반 드럼 세탁기 보다 드럼 깊이(Z 축)로의 움직임이 더 도드라졌다. 따라서, 세탁기 옆면(YZ 평면)에서의 직물 이동 거리를 나타내는 ‘total distance of the z-coordinate of the fabric center in the YZ plane’와 YZ 평면에서의 직물의 방향 전환 횟수를 나타내는 ‘to-and-fro motion’이 개발되었다(Figure 4).

Name/description	Concept map	Name/description	Concept map
1 Distance from the center of the drum Distance between the center of the drum and the center of gravity of the fabric		2 Angle change of the center of gravity Changes in the angle of the fabric center of gravity between frames	
3 Speed difference between drum and fabric Difference between the spinning speed of the drum and fabric moving speed		4 Total distance moved Total length of the traces of the fabric center of gravity	
5 Outline length Outline length of the fabric		6 Fabric area Area created by the fabric outlines	
7 Shape factor Value of dividing the fabric area with the outline length		8 Number of unfolding Number of being folded (number of peaks in the graph for the fabric area)	
9 Number of sliding Number of sliding from right to left of the lifter		10 Number of turnover Number of being turned over by the lifter	
11 Number of falling Number of being dropped by the lifter		12 Number of rotating Number of rotating with the lifter	
13 Position factor Values from dividing the number of appearances of the fabric center of gravity in the second quadrant with the number of appearances in the fourth quadrant		14 Group index Time ratio of being divided into several groups	

Figure 3. Movement indices developed in the study of Yun & Park [10].

집합 거동지수(macro movement)는 드럼 내 로딩된 직물 전체의 윤곽선을 추적하여 도출한다. Kim et al.[32]에서 사용된 집합 거동지수로는 세탁물 집합의 면적인 'occupied area'와 집합체의 윤곽선 길이인 'outline length'가 있다(Figure 4).

Name/description	Concept map	Name/description	Concept map
I Distance from the center of the drum ^a Distance between the center of the drum and the center of the fabric		4 Total distance of the z coordinate of the fabric center moved in the YZ plane ^b Total distance values of the fabric center moved in the z-axis direction on the YZ plane	
2 Angle difference of the center of the fabric between two frames ^a The difference in the angle made by connecting the origin and the center of the fabric for one frame and that for the next frame		5 To-and-fro motion ^b The number of inflection points of Fourier dominant curve	
3 Total distance moved ^a Total length of the traces of the fabric center			
I Occupied area ^c Area determined by the fabric outline		2 Outline length ^c Length determined by the fabric outline	

Figure 4. Movement indices that are used and newly developed in the study of Kim et al.[32]

2.3 직물 거동이 기계력에 미치는 영향

Bueno et al.[33]은 36 개의 조건에서 EMPA 304 올풀림 시험포를 사용하여 기계력을 평가하였다. 해당 연구에서 세탁 부하가 증가할수록 직물이 움직일 수 있는 자유도가 줄어들어 기계력이 감소하였다. 또한 50–60 rpm 이하에서는 rpm 이 증가할수록 기계력이 높아졌지만, 60 이상의 높은 rpm 에서는 직물이 원심력을 크게 받아 드럼 벽을 타고 회전하여 기계력이 감소하였다.

Yun et al.[34]의 연구에서는 EMPA 306 Poka-dot 시험포를 사용하여 기계력을 평가하였다. 거동 패턴 중 falling 의 기계력이 가장 높았고, rotating 의 기계력이 가장 약한 것으로 밝혀졌다. 다른 연구에서는 직물이 한 종류의 거동만 보일 때보다 여러 패턴의 거동이 복합적으로 나타났을 때 기계력이 높게 나타났다[4]. 복합적인 거동 패턴에는 falling, rotating, sliding, turnover 등이 포함되어 있으며, 특히 falling 이 자주 일어났을 때 기계력이 가장 높았다. 하지만 이는 적은 수개의 직물에 대한 연구로 실제 세탁 환경을 반영하는 데에는 한계가 있다.

Kim et al.[32]은 펠세이터를 도입한 드럼 세탁기에 2.5 kg 의 세탁물을 넣고 세탁 거동과 기계력을 분석하였다. 펠세이터의 도입으로 직물의 회전 방향이 직물 위치에 따라 달라지고 드럼 깊이 방향에서의 이동이 활발히 일어났다. 따라서 직물 간 상호작용과 직물이 접하고 마찰하는 정도가 증가하였고, 펠세이터를 도입한 세탁기의 기계력은 펠세이터를 도입하지 않은 세탁기보다 더 높게 나타났다.

이러한 선행연구를 통하여 직물 거동은 기계력에 영향을 주며, 거동에 의한 직물 간 상호작용이 기계력을 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

2.4 직물 거동과 기계력에 영향을 미치는 요인

드럼세탁기 내 직물 거동에 영향력을 미치는 요인으로 크게 세탁부하량(직물 매수 및 크기), 직물 특성, 드럼의 회전 속도 등이 있다고 보고되었다. [9, 11, 12]

2.4.1 세탁 부하량

Yun & Park[9]은 직물 개수와 크기를 다르게 하여 거동을 분석하였다. 40×80 cm 크기의 직물을 8장을 투입했을 때, 직물 1장 혹은 2장을 투입했을 때보다 거동 변화가 뚜렷하게 나타났다. 직물 1장 및 2장을 투입했을 때 직물이 모두 드럼벽에 붙어 모든 직물에 가해지는 기계력이 비슷하였다. 8개의 직물을 투입했을 때, 각각의 직물 위치에 따라 원심력이 다르게 작용하여, 드럼 중심 쪽 직물이 드럼 벽 쪽 직물의 회전 운동을 간섭하였다. 이러한 상호작용으로 인하여 낙하와 같은 거동 패턴이 관찰되었다. 직물 크기에 대하여 세탁 거동 분석에서는, 직물 크기가 증가함에 따라 전체 부하가 증가하여 직물이 받는 원심력이 증가하였다. 따라서 직물의 이동 궤적이 길어지고 회전하는 패턴에 더 가까워지는 것을 확인하였다.

Mac Namara et al. [31] 는 50×25 cm cotton terry towel 1 kg, 2 kg, 3 kg 의 움직임을 관찰하였고, Park and Wassgren[35]은 파라메트릭 모델링을 통하여 직물 부하에 따른 직물 거동을 시뮬레이션하였다. 세탁물 부하가 증가할수록 직물이 드럼을 차지하는 부피가 커져 직물이 자유낙하를 할 수 있는 공간이 적어졌다. 그 결과로 직물 간 충돌과 섞임, 직물의 낙하 속도가 줄어 기계력이 감소하였다. 어느 정도의 부하 증가는 직물이 받는 원심력을 크게 하여 더 긴 이동 궤적을 형성하면서 직물 간 상호작용과 기계력을 증가시키지만, 특정 부하 이상에서는 직물이 드럼을 차지하는 부피가 증가하여 직물 이동의 자유도가 줄어들어 기계력이 감소한다는 것을 알 수 있다.

Liu et al.[36]의 연구에서 드럼 아래쪽에서부터 직물이 들어올려지는 영역을 passive zone, 직물이 빠른 속도로 낙하하는 구간을 active zone 으로 정의하였다. 직물 부하가 증가함에 따라 passive zone 에 위치하는 직물 개수가 늘어나고, 주변 직물의 무게로 직물은 더 강하게 눌리게 되어 기계력이 증가한다고 보고되었다. 또한, 부하가 늘어날수록 드럼 중심과 드럼벽을 오가는 움직임이 줄어들어 직물의 위치는 거의 변하지 않는다고 밝혔다.

따라서, 직물 부하가 증가할수록 직물이 드럼 내 차지하는 부피가 커져 직물이 이동할 수 있는 공간을 감소시키기 때문에 직물 거동과 기계력에 영향을 미치게 된다. 많은 부하에서 직물의 거동과 기계력은 드럼 내 직물 위치에 따라 다르고, 낙하하지 않는 직물은 주위 직물과의 상호작용으로 기계력이 가해지게 된다.

2.4.2 직물의 물리적 특성

Balt et al.[30]의 연구에서 면 타올의 이동 방향 변화가 폴리에스터 직물보다 더 빈번하게 일어났다. 실험에 사용된 폴리에스터 직물이 면 타올보다 뻣뻣했기 때문이라고 보고되었지만, 그 이유에 대하여 구체적인 설명은 없었다.

Park et al.[11]은 직물 1 장을 투입했을 때, 직물 거동에 영향을 미치는 직물 특성을 도출하였다. 습윤 시 직물 무게, tensile energy, shear hysteresis, 압축 레질리언스, 표면 거칠기, 드레이프 계수가 직물 거동에 유의미한 영향을 미치는 직물 특성임을 밝혔다. 직물 특성을 독립변수로, 세척성과 상관성이 가장 높은 거동지수 4 개 각각을 종속변수로 설정하여 선형회귀분석을 실시하였을 때, 드레이프 계수가 모든 거동지수에 큰 영향력을 보였다. 해당 연구에서 드레이프 계수가 높을 수록, 즉 직물이 뻣뻣할수록 리프터의 힘을 많이 받아 드럼 2 사분면까지 길게 이동하는 케적을 보였고, 직물이 접히는 횟수는

적었다. 반면, 드레이프 계수가 낮은 직물은 자주 접혔고, 뻣뻣하지 않아 리프터의 힘을 받지 못하고 드럼 바닥에 주로 위치하였다.

2.5 모터 전류와 세탁기의 직물 분류 및 감지

모터가 움직여야 하는 물체의 질량 혹은 마찰이 클 때 일반적으로 모터는 더 큰 토크(torque)를 발생시켜야 한다. 토크와 무게는 Eq. 6 와 같은 관계를 지닌다.

$$\tau = m \cdot d \quad (6)$$

τ : torque

m : mass

d : radius of rotation

드럼세탁기의 드럼은 모터에서 발생하는 구동력이 드럼에 전달되어 회전한다. 또한 모터 토크를 계산하는 식 Eq. 7 에 따르면 모터 토크는 전류에 비례한다[16].

$$\tau = \frac{1}{\omega} \cdot e \cdot i \quad (7)$$

τ : torque

ω : rotational speed

e : voltage

i : current

Eq.6 과 Eq.7 에 따르면 세탁 부하량이 클 때, 전류값이 높게 나타난다. 또한 드럼 회전 시, 직물 분포의 불균형으로 드럼에 가해지는 부하가 달라지면 모터 전류값이 변한다 [37].

Woo et al. [16]은 드럼 회전 시, 직물 종류마다 모터 전류 값이 다르게 나타나는 것을 활용하여 직물 분류 시스템을 개발하였다. 이를 통해 직물 특성에 알맞은 기계력(세탁 rpm, 세탁 시간 등)을 설정하여 직물의 손상도를 최소화하면서 세척 효율을 높이고자 하였다.

물에 젖기 전인 건포 조건에서 섬세의류의 전류 평균값이 가장 높았으며, 직물이 물에 젖은 후인 습포 조건에서는 타올류의 전류 평균값이 가장 높았다. 또한 습포 상태의 전류 표준 편차는 섬세의류가 가장 높게 나타났다. 직물의 크기, 부드러운 정도, 흡수성이 직물의 낙하 형태와 부하에 영향을 미쳐 직물 종류에 따라 전류값이 상이하게 나타났다고 하였다.

제 2 장 실 험

제 1 절 시료

섬유의 종류와 직물 구조가 다르고, 세탁기로 물세탁이 주로 되는 직물을 선별하였다. 각 시료는 50 cm × 76 cm 크기의 베개 커버와 같이 한 변이 뚫린 형태로 두 겹 봉제하였다(Figure 5). 표준 상태($20 \pm 2 {}^\circ$ C, 65 ± 2 % RH)에서 3 kg 부하에 매수를 맞췄으며, 그 중 시료 1 장은 표지 시료로 거동 분석을 용이하게 하기 위하여 다른 색으로 염색하였다.

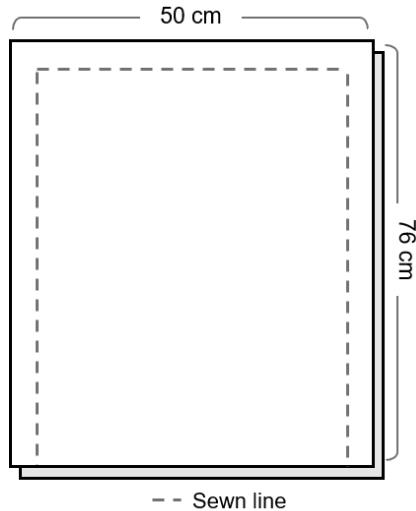


Figure 5. Schematic of the laundry sample.

제 2 절 시료의 물리적 특성 평가

본 연구에서 직물의 물리적 특성은 섬유 소재와 직물 구성과 관련된 특성을 의미한다. 이와 관련된 특성 중 두께, 무게, 기공도, 강연성, 마찰 계수, 수분율, 흡수율을 측정하였다. 모든 시료는 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $65 \pm 2\%$ RH에서 24시간 컨디셔닝한 후, 특성 평가를 진행하였다.

2.1 두께 및 무게

직물의 두께는 Peacock dial thickness gauge H (Ozaki Mfg., Ozaki, Japan)로 서로 다른 위치 5 곳을 측정하였다. 무게는 분석용 저울을 이용하여 3회 측정하였다.

2.2 기공도

앞서 구한 직물의 두께와 무게를 이용하여 Eq. 8을 통해 기공도를 구하였다.

$$\text{Porosity (\%)} = \left[1 - \frac{\text{dry weight (g)}}{\text{fabric density (g/cm}^3) \times \text{thickness (cm)} \times \text{fabric area (cm}^2)} \right] \times 100 \quad (8)$$

2.3 강연성

직물의 강연성은 직물 경사 표면을 ASTM D 1388-18, Option A 방법에 따라 캔틸레버법으로 측정하였다. $2.5 \times 15\text{ cm}$ 크기의 시료를 경사면으로 밀어 시료의 끝이 41.5° 경사면에 닿을 때까지 밀어낸 시료의 길이(overhang length)를 측정하였다(Figure 6) [38]. 이 길이의 절반을 ‘bending length’라 한다(Eq. 9). 밀려 나간 시험편의 길이가 크다는 것은 직물이 뻣뻣하여 강연성이 높다는 것을 의미한다. 각 시료마다 3회 이상 반복 측정하였다.

$$\text{Bending length(cm)} = \text{Overhang length(cm)}/2 \quad (9)$$

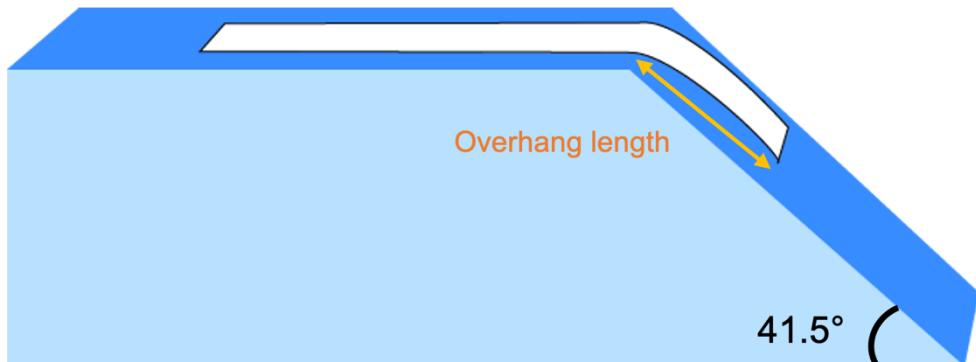


Figure 6. Measurement of the overhang length by Cantilever bending test.

2.4 정지마찰계수

정지 마찰계수는 건조상태와 습윤상태에서 모두 측정되었다. Fabric-on-fabric 측정 방식을 차용하여 두 개의 슬라이드 글라스 표면을 직물로 두른 뒤, 서로 마주 보게 겹쳐 놓았다[39]. 아래의 슬라이드 글라스는 평면에 고정하고 위의 슬라이드 글라스는 Universal Tensile Machine (model 5ST, Tinius Olsen, USA)의 클램프와 연결하였다. 5.5N 의 추로 수직항력(F_N)을 부과한 뒤, Universal Testing Machine 으로 위쪽 직물의 글라스를 끌어당겨 마찰력(F_s)을 측정하였다(Eq. 10) (Figure 7).

$$\mu = F_s / F_N \quad (10)$$

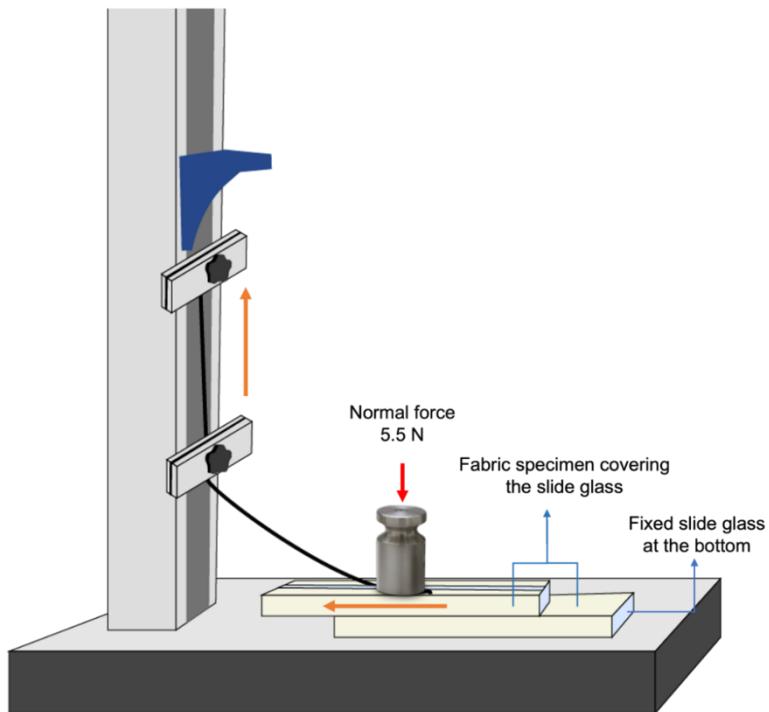


Figure 7. Measuring friction coefficient of the fabric specimen.

2.5 수분율

KS K 022 측정법에 따라 5 cm × 5 cm 크기의 시료를 오븐에서 105°에서 1 시간 동안 건조하였다. 데시케이터에 옮겨 5 분 냉각한 후 건조 무게를 쟀다. 수분율은 Eq. 11 의 식으로 계산하였으며 3 회 반복 측정하였다.

$$\text{Moisture regain (\%)} = \frac{\text{sample weight (g)} - \text{dry weight (g)}}{\text{dry weight (g)}} \quad (11)$$

2.6 흡수율

흡수율은 AATCC test method 21 를 차용하여 측정하였다. 20 ± 2 ° C, 65 ± 2 % RH 표준 상태에서 20 × 20 cm 크기의 시료의 무게를 젠 뒤, 세탁기에서 유사한 습윤상태의 흡수율을 측정하기 위하여 시료를 10 분간 물에 침지하였다. 여분의 물을 제거하기 위하여 공압 롤러에 0.5m/min 속도에 2 bar의 압력을 주어 직물을 통과시킨 후, 흡수 무게를 재어 Eq. 12 를 이용하여 흡수율을 계산하였다.

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{\text{water absorbed weight(g)} - \text{dry weight(g)}}{\text{dry weight(g)}} \times 100 \quad (12)$$

제 3 절 세탁기

실험에 사용한 드럼세탁기(WF24B9600KE, Samsung Electronics, Korea)의 총용량은 25kg 이다. 거동 분석용과 기계력 평가용으로 동일 모델 세탁기 2 대가 사용되었다. 거동 분석용 세탁기는 정면, 우측면, 드럼통을 투명하게 개조하였고(Figure 8a), 기계력 평가에 사용되는 세탁기는 개조하지 않은 시제품 세탁기를 사용하였다(Figure 8b).

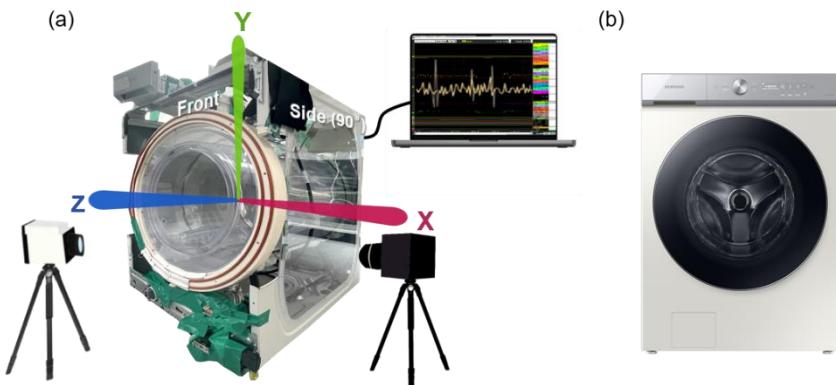


Figure 8. (a) Set up for fabric movement observation. (b) Commercial washer used for the evaluation of mechanical action.

거동 분석과 기계력 평가에 해당하는 세탁 프로토콜은 Table 1 와 Figure 9 에 명시하였다.

Table 1. Experiment condition for each set up.

Fabric movement observation		Mechanical action evaluation
Time	12sec	30min
Protocol	1 cycle (12 sec)	Weight detection and agitation (40 rpm, 5 min) – washing (30 rpm , 10 min) – drain detergent water(125 rpm, 5 min) – rinsing (46 rpm, 5 min × 2)
Detergent (mL)	–	23
Water level (Hz)	23500	23500

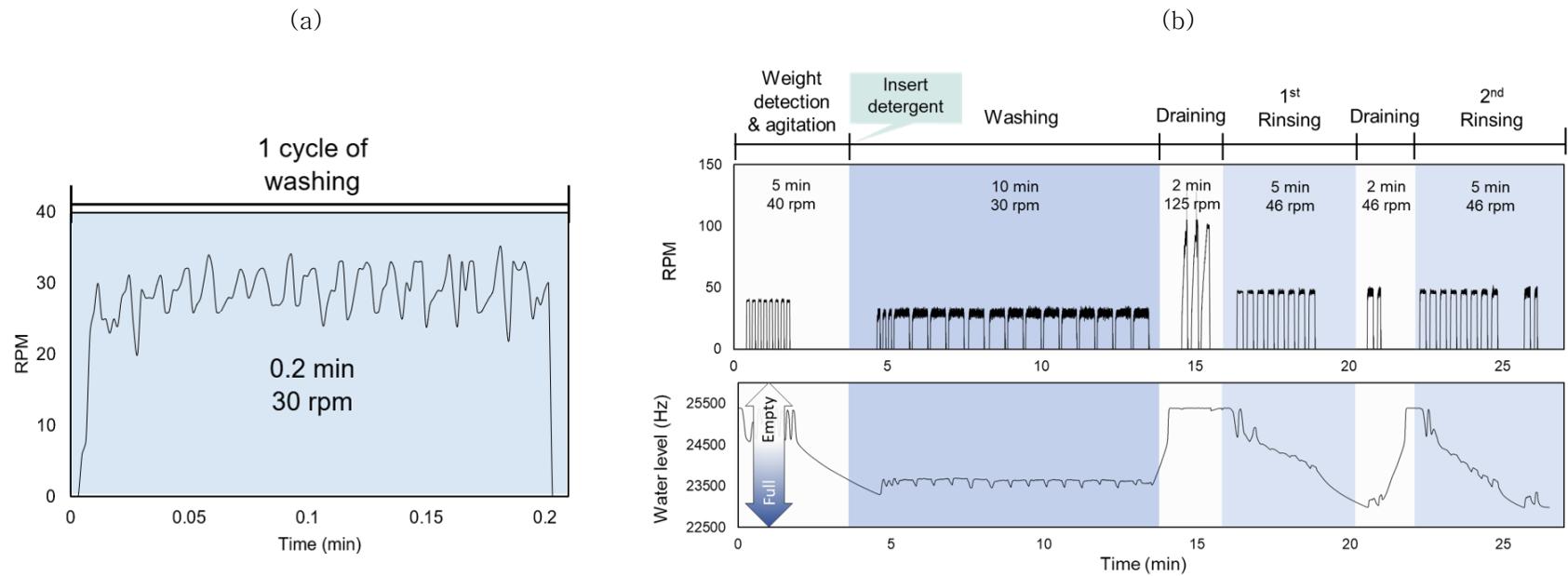


Figure 9. (a) Experiment condition for laundering experiments. (b) Washing protocol for laundering experiments.

제 4 절 직물 거동 분석

4.1 거동 분석 방법

직물 거동은 초고속 카메라(IDT NX3-S301-0117-1555, IDT NX8-S1)를 Figure 8(a)와 같이 세탁기 앞면과 옆면에 설치하여 10fps 속도로 촬영하였다. 모터 on-time 1 회에 해당하는 12 초 동안 120 개의 이미지를 앞면과 옆면에서 각각 촬영하여 Motion studio 32 (IDT innovation in motion, United Kingdom) 프로그램으로 동영상 파일(.avi)로 변환하였다.

TEMA 소프트웨어(Image Systems Co., Ltd, Sweden)를 사용하여 직물 거동을 추적하였다. 드럼통 중심을 원점으로 좌표 공간을 설정하였다. 표지직물 윤곽선의 위, 아래, 왼쪽, 오른쪽 최외곽점의 교차점을 무게중심점으로 설정하여 직물 위치를 3 차원 좌표로 도출하였고, 직물 윤곽선 길이와 내부 면적을 추출하였다(Figure 10). 또한 XY diagram 과 YZ diagram 기능을 사용하여 직물 윤곽선이 누적된 diagram 을 얻었다. 그리고 추출한 좌표값을 csv. 파일로 변환하여 Washer Dynamics Analyzer(Fashion technology laboratory, Seoul National University, Korea) 프로그램에 입력하여 직물 중심의 이동경로를 시각화하였다.

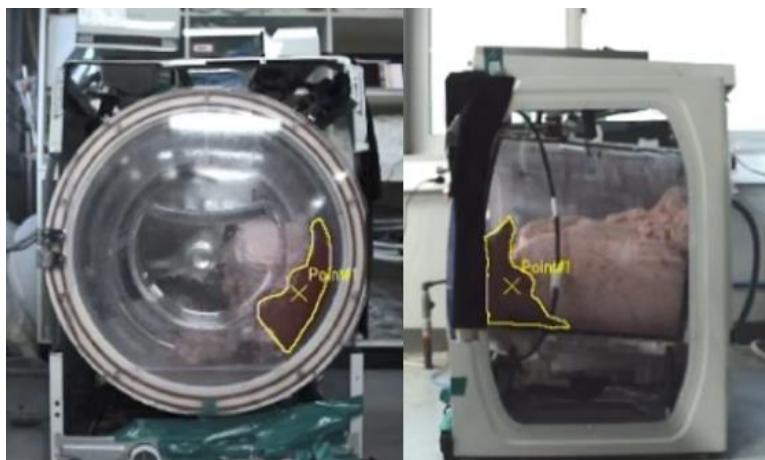


Figure 10. Tracing fabric movement with TEMA software.

4.2 거동 분석 조건

IEC 60456 규격에 따라 세탁물을 드럼 뒤편에서부터 가로 방향으로 엇갈리게 시료를 넣었다. 드럼 회전속도(rpm), 수위, 모터 operation time(on/off time)은 삼성전자에서 제공받은 소프트웨어로 실험 조건에 맞춰 진행하였으며, 세탁기에 내장된 수위 조절 센서로 세탁 프로세스 동안 수위를 동일하게 유지할 수 있도록 하였다. 설정 수위는 23500 Hz 며, 이는 약 11 L 에 해당하는 높이다. 만약 세탁물의 흡수성에 의해 물이 빠르게 흡수되면 공급된 물의 수위가 설정 수치에 도달하지 못한다. 이 때, 물이 추가로 공급되어 23500 Hz 에 해당하는 수위까지 맞춰 지므로, 실제 공급된 물의 총량은 다소 차이가 있을 수 있다. 세탁용수는 실험실의 수돗물 ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$)을 공급하여 사용하였다.

4.3 직물 거동지수

직물 거동지수는 micro movement 와 macro movement 로 나누어 분석하였다. Micro movement 는 염색한 한 개의 표지 직물의 중심 좌표에 대한 거동지수고, macro movement 는 드럼 내 전체 직물의 윤곽선을 추적했을 때 도출한 거동지수이다. Yun & Park[10]에서 개발된 거동지수 중, 거동패턴의 횟수를 관찰자가 직접 세는 ‘number of falling’, ‘turnover’, ‘unfolding’ 등은 여러 매수에서 관찰하기 어려우며, 관찰자에 따른 편차가 커서 분석에서 제외하였다. 또한, ‘angle difference between two frames’, ‘position factor’, ‘total distance moved’ 거동 지수는 직물 종류에 대하여 크게 유의하지 않으며 같은 직물 간섭으로 인하여 명확히 관찰되지 않아 분석에서 제외하였다. Kim et al.[32]에서 개발된 ‘YZ 이동거리’와 ‘to-and-fro motion’도 본 실험에서 사용한 세탁기로는 유의하게 관찰되지 않아 분석에서 제외하였다.

본 연구에서는 선행 연구에서 개발된 거동지수 중 6 가지를 최종적으로 선별하여 위치를 나타내는 거동지수와 형태를 나타내는 거동지수로 분류하였다. 직물의 위치를 나타내는 거동지수로는 ‘positions in a quadrant’, ‘distance from the center of the drum’, ‘speed difference between two frames’를 관찰하였고 직물 형태를 나타내는 거동지수로는 ‘fabric area’, ‘outline length’, ‘shape factor’를 관찰하였다. 드럼 회전으로 인한 세탁물의 상승 및 하강을 세탁기 앞면 거동만으로 판단하기 어려워 세탁기 측면에서 관찰된 직물 전체 집합인 macro movement index 를 사용하였다(Table 2).

Table 2. Fabric movement indices observed in this study.

Micro movement			Macro movement		
Index	Schematic diagram	Index	Schematic diagram	Index	Schematic diagram
Positions in a quadrant		Fabric area (cm²)		Fabric area (cm²)	
Distance from the center of the drum		Outline length (cm)		Outline length (cm)	
Speed difference between two frames		Shape factor (area/length)		Shape factor (area/length)	

제 5 절 기계력 평가

5.1 기계력 평가 시험포

실제 세탁 코스에서 직물에 가해지는 기계력을 평가하기 위하여 세탁 시료 표면에 EMPA 306 Poka-dot 시험포(Testfabrics Inc., USA)와 EMPA 304 올풀림 시험포(Testfabrics Inc., USA)를 부착하여 평가하였다(Figure 11).

8 × 8 cm 크기의 EMPA 306 Poka-dot 을 세탁 시료 위에 부착하기 전 EMPA 306 을 스캔하여 기존의 Poka-dot 의 개수를 ImageJ(National Institutes of Health, USA)로 측정한 뒤, Poka-dot 을 세탁 시료에 붙이고 세탁 실험을 진행하였다. 세탁 코스가 완료된 후 시험포를 떼어내고 건조 후 스캔하여 세탁 후 남아있는 Poka-dot 의 개수를 측정하고, Eq. 13 에 따라 Poka-dot removal rate 를 계산하였다 [32].

EMPA 304 올풀림 시험포는 나일론 평직물로 경사 위사가 499 × 499 개의 올로 이루어져 있다. 시접 처리가 되어 있지 않아 마찰력과 같은 기계력이 가해지면 올이 풀리게 된다. 실험 전 직물의 올 개수와 실험 후 풀린 올 개수를 비교하여 올풀림을 평가하였다(Eq. 14) [40].

$$\% \text{ of removed dots} = \frac{\text{total number of dots} - \text{remaining dots}}{\text{total number of dots}} \times 100 \quad (13)$$

$$\% \text{ of thread removal} = \frac{\text{total number of threads} - \text{remaining threads}}{\text{total number of threads}} \times 100 \quad (14)$$

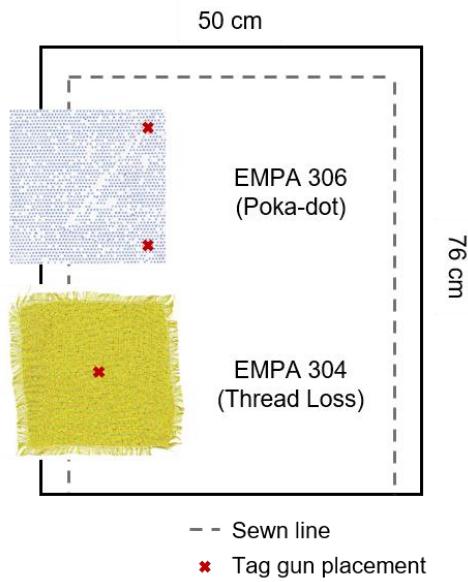


Figure 11. Placement of the EMPA fabrics on the laundry specimen.

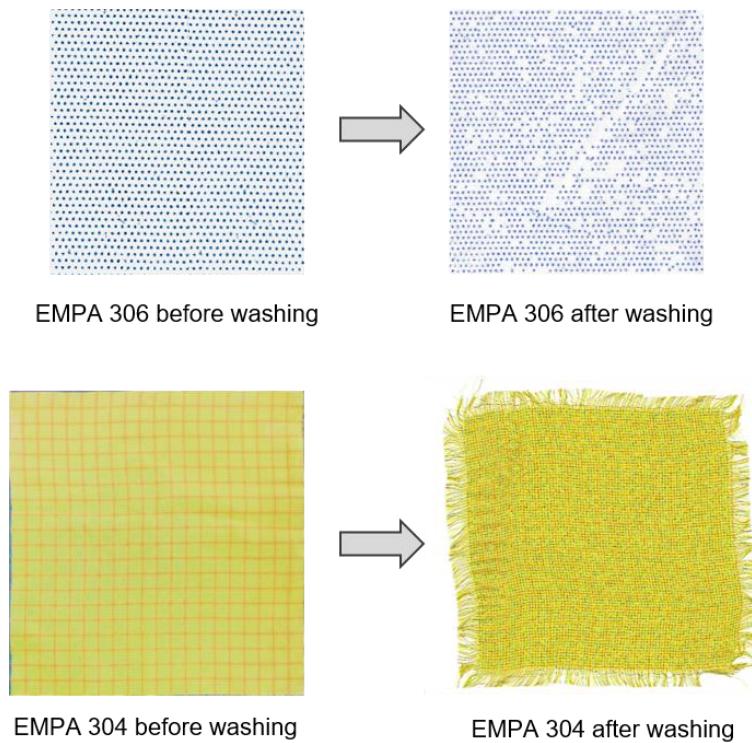


Figure 12. EMPA fabrics before and after washing.

5.2 기계력 평가 조건

개조하지 않은 시판 세탁기로 기계력 평가 실험을 진행하였다. 실제 세탁 코스에서 마지막 탈수 과정을 제외한 ‘무게감지 및 교반 – 세탁 – 헹굼(2 회)’로 구성된 프로토콜에서 기계력을 평가하였다. 수위, 모터 operation time, 공급 용수, 세탁 단계의 드럼 회전 속도는 거동 분석 세트와 동일하다. 세탁기의 세제 자동 투입 시스템에 의하여 3 kg 부하에서는 23mL 의 세제(Persil Deep Clean, Henkel, Germany)가 투여되었고, 마지막 헹굼 코스까지 실시한 뒤 배수관으로 물을 배수하였다. EMPA 시료가 붙은 세탁 시료 3장을 꺼낸 뒤, EMPA 시료를 분리하여 표준상태에서 5시간 건조하였다.

제 6 절 모터 전류 측정

세탁기의 모터 전류는 삼성전자에서 제공한 멀티채널 오실로스코프 (Qscope V10.2, Samsung Electronics, Korea)를 거동 분석 단계에서 세탁기와 연결하여 건포 조건과 습포 조건에서 측정하였다 (Figure 9a). 전류는 Q-current 의 형태로 컴퓨터에 인식이 되었다. 측정을 마친 후, Qscope 에서 실시간으로 기록된 정보를 csv. 파일로 변환하여 저장하였다. 그리고 Q_{sd} (Q-current 의 표준편차) 와 $Q_{area/s}$ (모터 on-time 1 회에 해당하는 전류 그래프의 적분값), 즉 2 개의 파라미터를 FabricClassifier (Fashion technology laboratory, Seoul National University, Korea) 프로그램을 이용하여 추출하였다. 모터 on-time 의 초반, 약 1 초에 해당하는 데이터는 overshoot 데이터로 제거하고 파라미터를 추출하였다 (Figure 13).

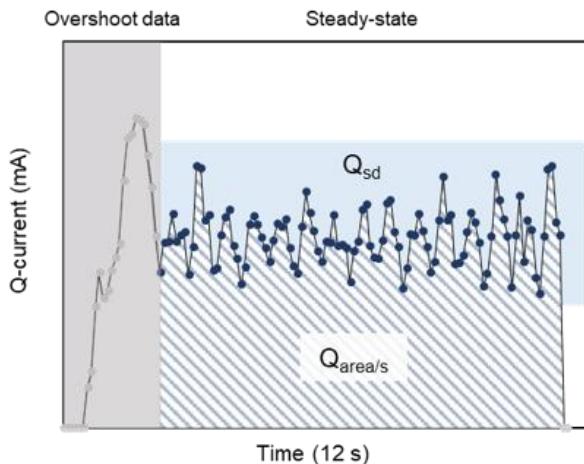


Figure 13. Current parameters extracted from Qscope.

제 7 절 통계 분석

통계 분석은 SPSS statistics 26.0(IBM corp., Armonk, NY)를 이용하였다. 직물 종류에 따른 직물 특성과 전류 파라미터의 차이를 비교하기 위하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)과 사후분석(Tukey's pairwise test)을 실시하였다.

직물 특성, 거동, 기계력, 전류 파라미터 사이의 상관관계를 분석하기 위하여 모터 전류, 직물 특성, 거동, 기계력 사이의 상관성을 Pearson's correlation test 를 실시하여 분석하였다. 두 변수 사이 선형 관계의 크기와 방향을 나타내는 통계적 척도인 Pearson 의 r 값을 통하여 두 변수 사이의 관계를 분석하였다. 범위는 -1에서 1 사이이며, 0에 가까운 값은 상관 관계가 없음을, 1에 가까운 값은 강한 양의 상관관계를, -1에 가까운 값은 강한 음의 상관관계를 나타낸다[41]. 전류 파라미터와 직물 특성과의 관계를 제외한 변수들 간 상관관계의 통계검증은 $p < 0.05$ 수준에서 이루어졌다. 그리고 Minitab 21(Minitab Inc., State College, USA)을 사용하여 상관분석에 대한 적합선 그래프를 도출하였다.

제 3 장 결과 및 고찰

제 1 절 직물 선별과 물리적 특성 평가

예비적으로, 시중의 직물 샘플 16 종의 무게와 수분율을 측정하였다. 세탁거동에 영향을 줄 것으로 생각되는 대표적인 직물 특성으로 무게와 수분율을 선택하여 이에 대하여 일원배치 분산분석(ANOVA)과 사후분석(Tukey's pairwise test)을 실시하였다(Table 3, Table 4). 사후분석 결과에서 같은 그룹 중 최소 1 개의 직물이 포함되었으며, 물세탁이 권장되지 않은 직물은 제외하였다(제외된 직물은 Table 3, 4 에서 회색으로 표시). Table 5 와 6 에 제시된 바와 같이 최종적으로 직물 9 종을 선별하였다.

Table 3. Tukey's pairwise test result and process of selecting fabric types based on fabric weight.

Weight

Fabric type	Mean	Grouping
Acryl Jersey	0.87	A
Cotton Twill	0.86	A
Cotton French Terry	0.84	A B
Polyester Fleece	0.79	B C
Cotton Terry	0.78	C
Cotton Jersey	0.46	D
Wool Jersey	0.45	D
Polyester Velvet	0.40	D
Cotton Oxford	0.32	E
Nylon Plain	0.31	E
Rayon Plain	0.30	E
Linen Plain	0.29	E
Polyester Plain	0.278	E
Cotton Sateen	0.21	F
Polyester Chiffon	0.17	F
Silk Satin	0.17	F



*예비 실험 결과 같은 그룹 내에서 통계적으로 유의한 차이가 나지 않거나 물세탁이 권장되지 않아 제외된 샘플

Table 4. Tukey's pairwise test result and process of selecting fabric types based on moisture regain

Moisture regain

Fabric type	Mean	Grouping
Rayon Plain	10.65	A
Wool Jersey	10.18	A
Linen Plain	8.28	B
Cotton Twill	5.65	C
Cotton Sateen	5.12	C D
Cotton Oxford	5.05	C D
Cotton Jersey	4.66	C D
Silk Satin	4.34	C D
Cotton French Terry	4.30	C D
Nylon Plain	3.49	D E
Cotton Terry	2.56	E F
Acryl Jersey	2.52	E F
Polyester Fleece	1.00	F G
Polyester Velvet	0.62	G
Polyester Chiffon	0.56	G
Polyester Plain	0.19	G

*예비 실험 결과 같은 그룹 내에서 통계적으로 유의한 차이가 나지 않거나 불세탁이 권장되지 않아 제외된 샘플

선별한 9 종의 직물의 물리적 특성을 측정하여 Table 5에 나타내었다. 직물 특성 간 상관성 분석 결과는 Table 6에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 직물의 경우, 두께($r = 0.794$, $p < 0.05$), 기공도($r = 0.667$, $p < 0.05$), 강연성($r = 0.764$, $p < 0.05$)은 무게와 상관성을 보였다. 또한 두께와 기공도의 상관성도 판찰되었으며($r = 0.814$, $p < 0.01$), 두께($r = 0.675$, $p < 0.05$)와 기공도($r = 0.720$, $p < 0.05$)는 각각 흡수성과 양적 상관성을 보였다. 두께와 기공도가 높다는 것은 무게 대비 직물의 부피가 크다는 것을 의미하는 것과 동시에 물을 흡수할 수 있는 공간이 많다는 것을 의미한다. 이로 인하여, 두께와 기공도가 증가할수록 흡수율이 높게 나타났다. 선별한 시료 이미지와 3 kg에 해당하는 시료의 수는 Table 7과 같다.

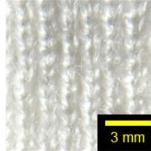
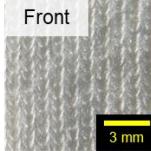
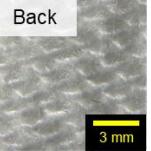
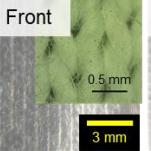
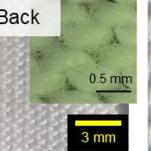
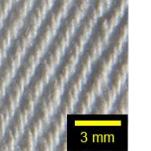
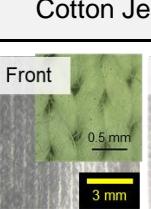
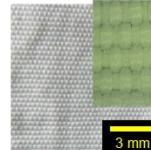
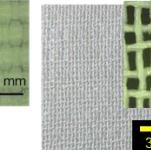
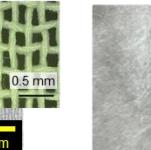
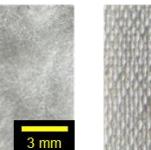
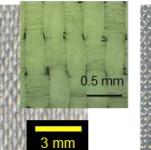
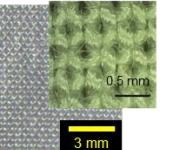
Table 5. Physical properties of fabrics.

Fabric	Weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Porosity (%)	Stiffness (cm)	Wet friction coefficient	Water absorption (%)	Moisture regain (%)
Acryl Jersey	377 (±5)	1.55 (±0.05)	79	2.4 (±0.2)	0.74 (±0.07)	54 (±1)	1.43 (±0.11)
Cotton French Terry	334 (±4)	1.25 (±0.08)	83	2.2 (±0.1)	0.61 (±0.03)	200 (±8)	4.20 (±0.15)
Cotton Twill	344 (±3)	0.80 (±0.01)	74	3.6 (±0.1)	0.48 (±0.02)	141 (±6)	6.30 (±0.21)
Cotton Jersey	184 (±3)	0.54 (±0.01)	79	1.7 (±0.1)	0.60 (±0.04)	225 (±5)	5.50 (±0.16)
Nylon Plain	124 (±2)	0.25 (±0.01)	55	1.7 (±0.2)	0.35 (±0.04)	59 (±6)	2.21 (±0.11)
Polyester Chiffon	77 (±2)	0.19 (±0.01)	72	1.0 (±0.1)	0.53 (±0.00)	107 (±10)	0.80 (±0.29)
Polyester Fleece	318 (±4)	2.44 (±0.04)	90	1.8 (±0.2)	0.99 (±0.06)	461 (±15)	0.18 (±0.07)
Polyester Plain	141 (±3)	0.38 (±0.00)	73	1.9 (±0.1)	0.66 (±0.03)	126 (±6)	0.70 (±0.16)
Rayon Plain	112 (±3)	0.21 (±0.01)	66	1.2 (±0.1)	0.50 (±0.03)	151 (±4)	9.85 (±0.41)

Table 6. Correlations between fabric properties.

		Weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Porosity (%)	Wet friction coefficient	Stiffness (cm)	Water absorption (%)	Moisture regain (%)
Weight (g/m ²)	Pearson Coefficient p-value	1	.794*	.667*	0.528	.764*	0.281	-0.071
			0.011	0.050	0.144	0.017	0.463	0.855
Thickness (mm)	Pearson Coefficient p-value		1	.814**	0.277	0.325	.675*	-0.359
				0.008	0.471	0.393	0.046	0.343
Porosity (%)	Pearson Coefficient p-value			1	0.430	0.241	.720*	-0.258
					0.248	0.533	0.029	0.502
Wet friction coefficient	Pearson Coefficient p-value				1	0.465	0.331	0.480
						0.207	0.385	0.191
Stiffness (cm)	Pearson Coefficient p-value					1	-0.064	0.102
							0.871	0.793
Water absorption (%)	Pearson Coefficient p-value						1	-0.097
								0.803
Moisture regain (%)	Pearson Coefficient p-value							1

Table 7. Image of selected textiles and the number of loaded sheets in a washer.

Code	AJ	CFT	CJ	CTw
Fabric	Acryl Jersey	Cotton French Terry	Cotton Jersey	Cotton Twill (3/1)
Image	  	  	  	
Number of loaded sheets (3 kg)	10	11	21	11
Code	NP	PC	PF	PP
Fabric	Nylon Plain Weave	Polyester Chiffon	Polyester Fleece	Polyester Plain Weave
Image	 	 	 	 
Number of loaded sheets (3 kg)	31	50	12	27
				34

제 2절 직물 특성과 거동

직물 특성이 직물 거동에 미친 주요한 영향을 파악하고자 직물 특성과 거동 간 상관성 분석을 실시하였다. 직물 특성과 유의한 상관성을 보인 직물 거동지수는 개별 직물의 ‘distance from center of the drum’ 표준편차, 개별 직물의 ‘shape factor’ 표준편차와 평균 변화량이다.

거동지수 중, ‘distance from center of the drum’은 드럼 중심에서부터 직물의 거리를 의미하며, 해당 지수의 표준편차는 평균으로부터 직물의 위치가 얼마나 벗어났는지를 나타낸다. 본 연구에서 개별 거동지수 ‘distance from center of the drum’ 표준편차는 직물 특성 중 수분율에 영향을 받은 것으로 관찰되었으며, 해당 거동지수를 통하여 직물의 움직임이 두 유형으로 관찰되었다.

첫 번째 유형은 직물이 드럼 4 사분면에 한정되어 주로 거동하는 유형이고, 두 번째 유형은 직물이 드럼 내 넓은 범위에 걸쳐 회전하는 유형이다. 첫 번째 유형의 직물은 표지된 개별 직물이 주변 직물에 의해 눌려 높게 들어올려지지 못하고 금방 낙하하여 한정된 영역에서 거동하였다. 이러한 직물은 드럼이 시계 반대방향으로 회전하였을 때, 주로 드럼의 4 사분면에 위치하였으며, ‘distance from center of drum’의 표준편차가 낮게 나타났다. 반면에 높은 표준편차를 보인 직물은 다른 직물로부터 간섭과 상호작용이 적어 비교적 뚜렷한 회전 반경을 그리며 거동한 것으로 보인다. 따라서 드럼 중심과 벽을 오가는 궤적을 그리게 되어 ‘distance from center of drum’ 표준편차가 높게 나타났다. ‘Distance from center of the drum’의 표준편차가 상대적으로 낮은 직물과 상대적으로 높은 직물로 분류하였을 때(Figure 14), 표준편차가 낮은 직물은 수분율이 높은 직물, 표준편차가 높은 직물은 수분율이 낮은 직물로 나타났다.

Limited movement

Rotating movement

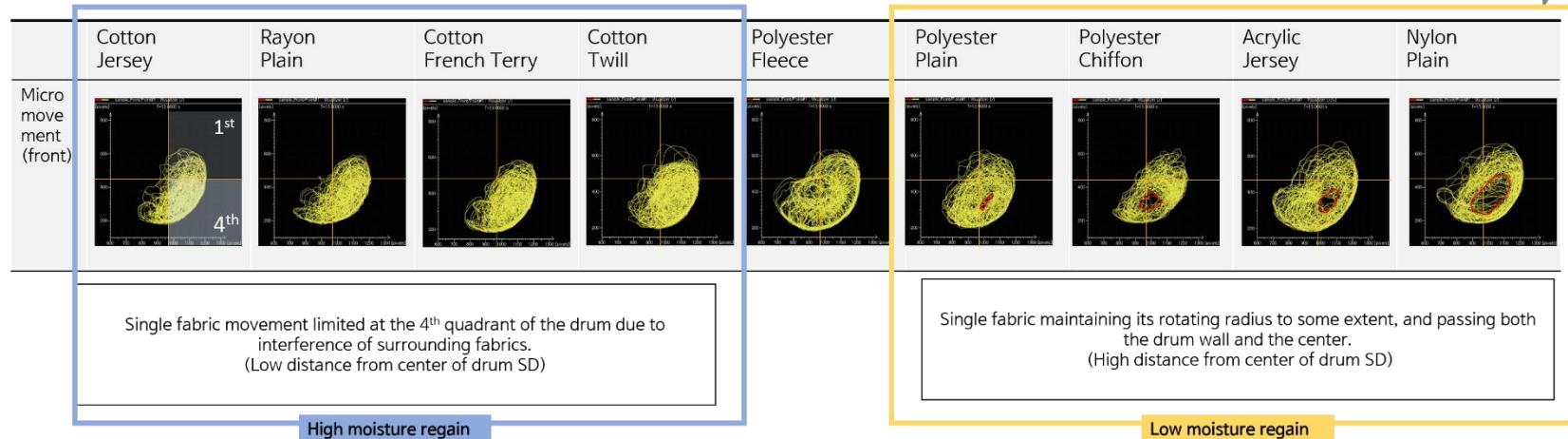


Figure 14. Individual fabric movement (micro movement) patterns at the front view.

이러한 관계는 수분율이 표면 에너지에 영향을 미쳐 관찰된 결과라고 생각된다[42, 43]. 친수성 직물은 높은 표면 에너지를 가지고 있어 수화된 표면에 부착하려는 경향을 보이는 반면, 소수성 직물은 낮은 표면 에너지를 가지고 있어 수화된 표면에서 쉽게 미끄러지는 경향을 보인다[42]. 수분율이 높은 친수한 섬유로 이루어진 직물은 직물끼리 잘 엉켜 한 덩어리를 형성하고 서로 엉켜서 뭉쳐진 직물 덩어리는 무거워진다. 함께 뭉친 직물은 리프터의 힘을 받아 상승하고 급격히 하강하여 주로 드럼 벽 가까이 거동하였다. 또한 주위 직물과의 엉킴으로 인한 압축 및 간섭으로 회전 궤적이 뚜렷하게 생성되지 않았다. 반면, 수분율이 낮고 소수한 섬유로 이루어진 세탁물에서는 낮은 표면 에너지로 인하여 직물끼리 잘 미끄러져, 직물 낱개로 주로 회전하였다. 또한, 주변 직물의 간섭과 압축이 상대적으로 적어 개별 직물의 회전 반경이 비교적 뚜렷하게 보였다. 그리고 상관성 분석을 실시하였을 때, 거동지수 ‘distance from center of drum’의 표준편차는 수분율($r = -0.698$, $p < 0.05$)과 유의미한 상관성을 보였다(Figure 15).

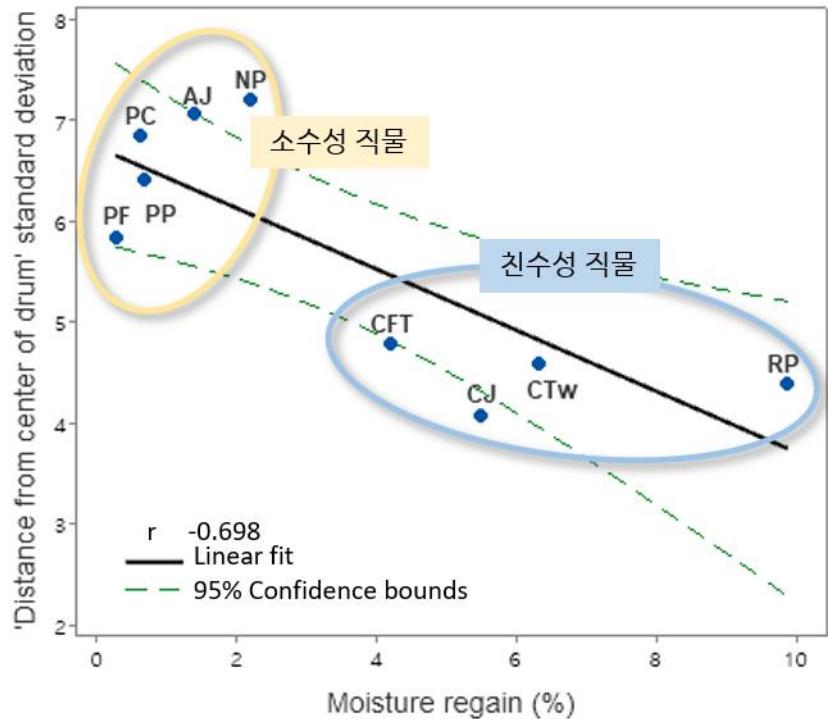


Figure 15. Correlation between fabric properties and 'distance from center of drum' standard deviation.

‘Shape factor’ 는 직물 넓이를 윤곽선으로 나눈 거동지수로 [44, 45], ‘shape factor’ 값이 작으면 직물이 구겨져 있는 상태를 나타내고, 값이 크면 직물이 펼쳐진 형태임을 나타낸다. ‘Shape factor’의 표준편차는 평균 ‘shape factor’에서 분산된 정도, 평균변화량은 두 프레임 간 ‘shape factor’ 변화량의 평균을 의미한다. 세탁물의 개별적 micro 거동지수 중 ‘shape factor’ 표준편차와 평균 변화량은 두께, 무게, 강연성에 영향을 받은 것으로 보인다.

Figure 16 은 개별 직물 ‘shape factor’ 의 최대값과 최소값에 해당하는 윤곽선 다이어그램으로, 직물 형태 변화의 범위를 시각화 한 것이다. 무겁고 두꺼운 cotton twill 및 acryl jersey 는 접힘과 펼침에 의한 형태 변화가 크게 나타났다. 반면, 가볍고 얇은 rayon plain 및 polyester chiffon 은 형태 변화가 비교적 적게 나타났다. 가볍고 얇은 직물은 적은 힘으로도 접히기 쉽고, 중력의 영향을 덜 받아 드럼이 회전하는 동안 대부분 접힌 채로 거동하여, ‘shape factor’의 표준편차가 무겁고 두꺼운 직물보다 적은 것으로 보인다.

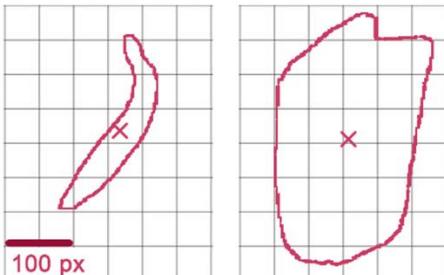
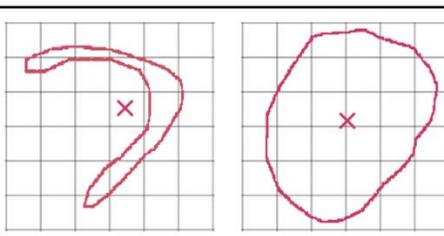
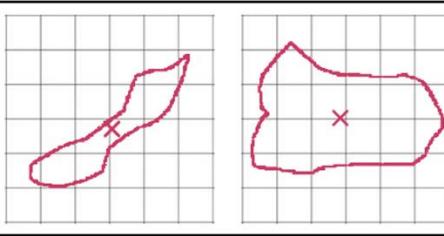
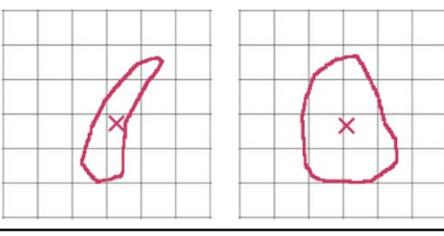
Shape factor (Avg change)	Minimum shape factor	Maximum shape factor
Cotton Twill	0.527	 1.880 7.191
Acryl Jersey	0.505	 1.431 7.162
Rayon Plain	0.357	 1.847 4.514
Polyester Chiffon	0.351	 1.045 4.288

Figure 16. Diagram of the maximum and minimum ‘shape factor.’

개별 직물 ‘shape factor’ 평균 변화량은 직물의 형태 변화의 빈도와 정도를 모두 나타내며, 무게와 강직도에 영향을 받은 것으로 관찰되었다. Figure 17 은 직물의 형태 변화를 각 프레임마다 추적한 다이어그램의 일부이다. 무겁고 뻣뻣한 acrylic jersey 는 펼치고 접하는 양상이 뚜렷하게 보이지만, polyester chiffon 과 rayon plain 은 형태 변화가 뚜렷하지 않았다. 앞서 ‘shape factor’ 표준편차와 마찬가지로 가볍고 유연한 직물은 회전 힘과 직물 간 접촉만으로도 쉽게 접혀 드럼 회전동안 직물이 접힌 채로 거동하지만, 무겁고 뻣뻣한 직물은 직물에 충분한 힘이 가해지지 않거나, 중력에 의하여 퍼지는 경향이 있어 ‘shape factor’ 평균 변화량이 높게 나온 것으로 보인다.

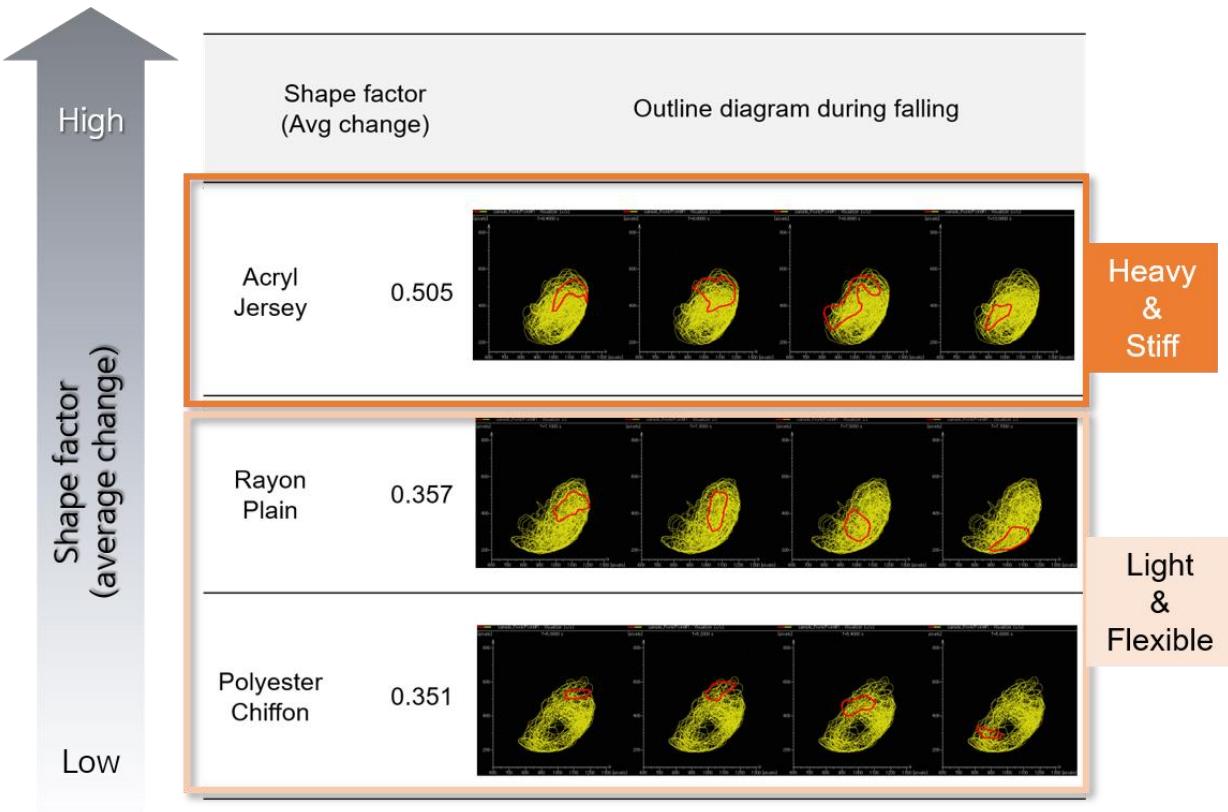
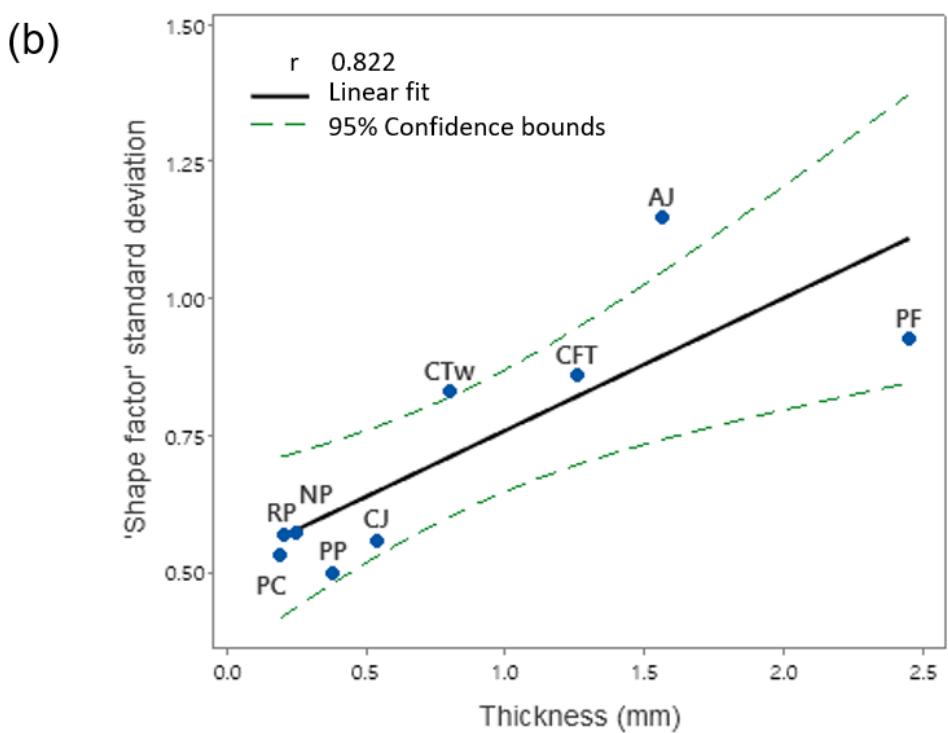
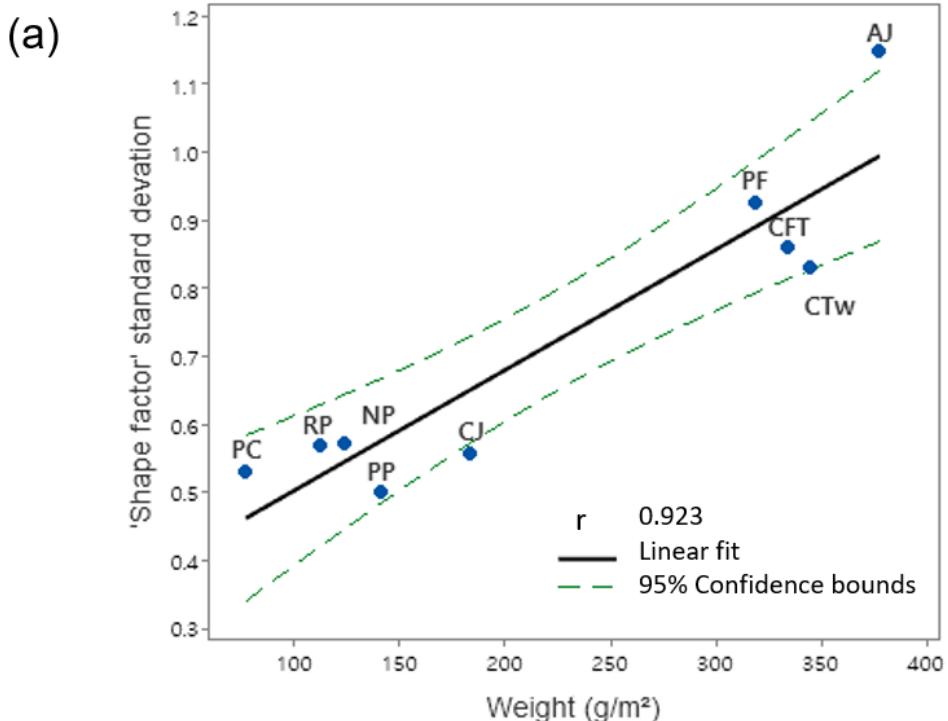


Figure 17. Shape change of the fabrics by each frame.

개별 거동 ‘shape factor’ 표준편차 및 평균변화량과 직물 특성 사이의 상관성 분석 결과, 표준편자는 무게($r = 0.923$, $p < 0.01$), 두께($r = 0.822$, $p < 0.01$)와 높은 양적 상관성을 보였으며, 평균변화량은 무게($r = 0.837$, $p < 0.01$), 강직도($r = 0.864$, $p < 0.01$)와 높은 양적 상관성을 나타냈다(Figure 18). 실험 결과와 상관성 분석을 통하여 직물의 형태 변화의 정도와 그 빈도는 직물의 무게, 두께, 강직도에 영향을 받은 것을 관찰하였다.



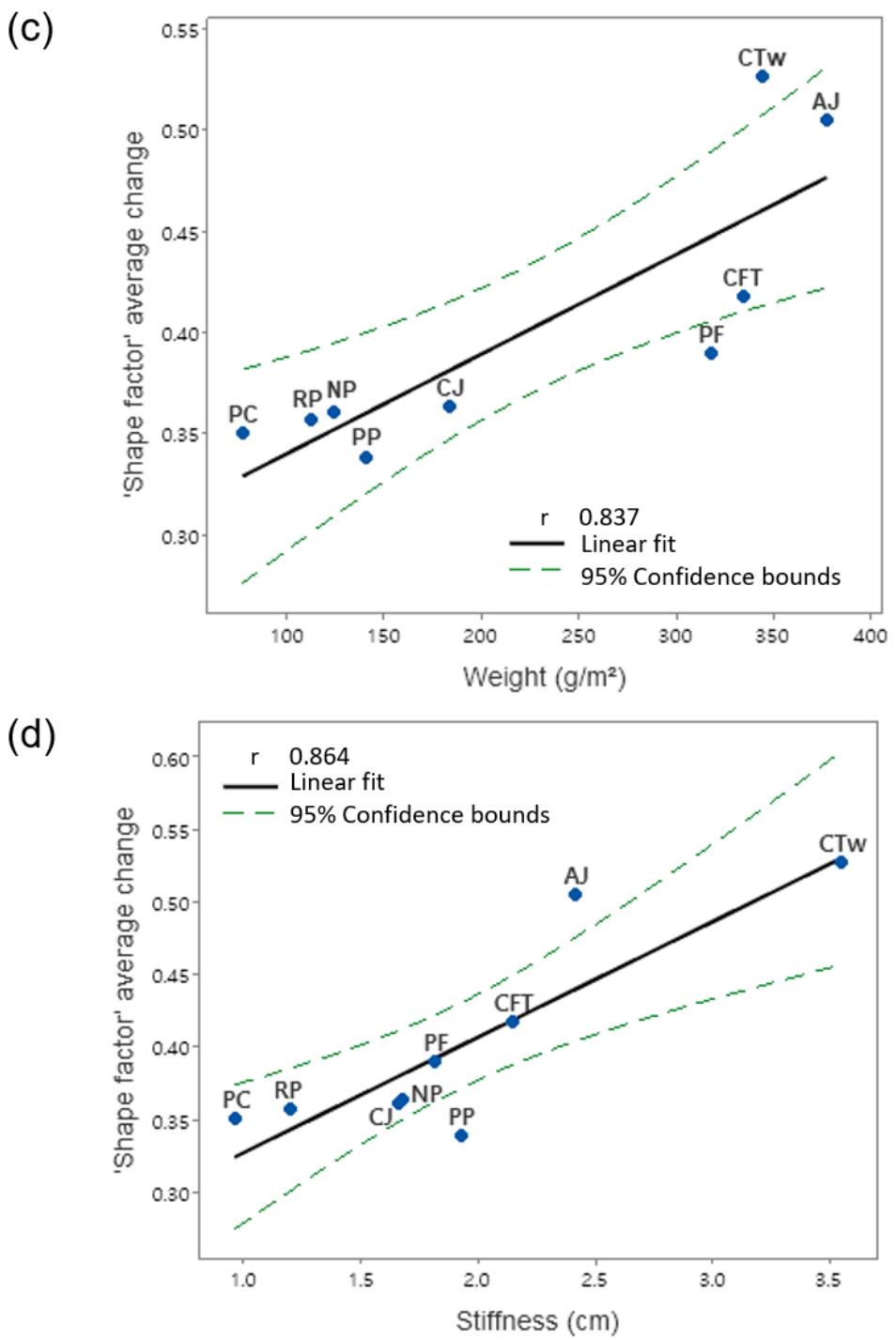


Figure 18. Correlation between fabric properties and ‘shape factor.’

제 3절 직물 특성과 거동이 기계력에 미치는 영향

본 연구에서는 EMPA 304(올풀림)와 306(Poka-dot) 시험포를 이용하여 직물에 부과되는 기계력을 측정하였다. 직물 특성과 거동이 기계력에 미치는 주요한 영향력을 도출하기 위하여 직물의 물리적 특성과 기계력, 직물 거동지수와 기계력 간 상관성 분석을 하였다.

3.1 올풀림(EMPA 304)에 영향을 미치는 직물 특성과 거동

직물의 특성 중 마찰 계수가 올풀림에 영향을 미친 것으로 관찰되었다. 마찰은 직물과 직물 사이의 상호작용에서 가장 높은 기계력을 부과하는 형태라고 보고되며[46], 직물 간 접촉으로 생긴 마찰은 실의 이동과 조직을 느슨하게 하는데 기여한다[47]. 따라서 마찰계수가 높은 직물과 올풀림 시료가 마찰하였을 때, 올풀림 시료에 인가된 직물의 저항력이 강하여 올이 더 많이 제거된 것으로 보인다. 또한, 이는 통계적으로 유의한 상관관계로도 나타났다($r = 0.707$, $p < 0.05$) (Figure 19).

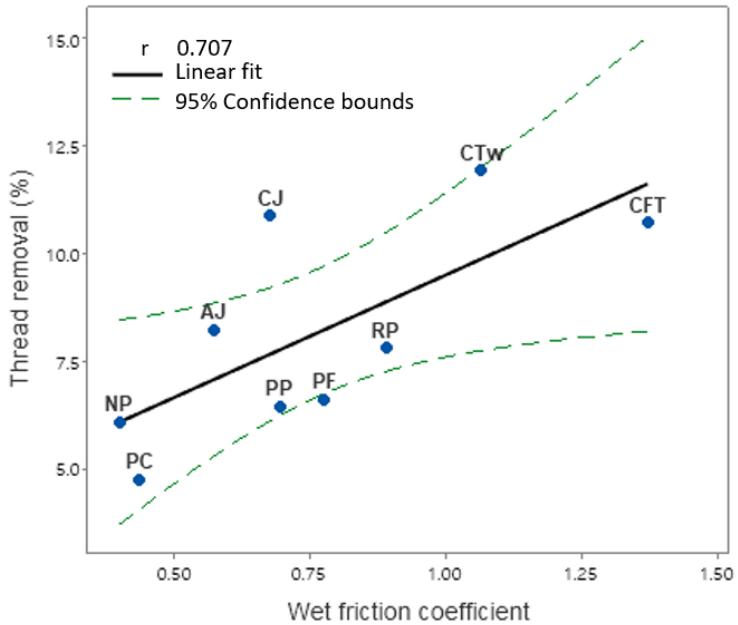


Figure 19. Correlation between wet friction coefficient and thread removal.

개별 거동지수인 ‘distance from the drum center’ 표준편차는 올풀림에 영향을 미친 것으로 관찰되었다. ‘Distance from center of the drum’ 표준편차가 높은 직물은 주로 드럼 4 사분면에 한정되어 거동하였다. 이러한 거동 패턴을 보인 이유는 표지 직물이 주변 직물의 무게에 눌려 거동 자유도가 감소하였기 때문이다. 이와 동시에 지속되는 드럼 회전으로 인하여 주변 직물 및 드럼 벽과의 마찰이 찾고 강하게 일어나 올풀림이 높게 나타난 것으로 보인다. 반대로 개별 직물의 ‘distance from center of drum’의 표준편차가 높게 나타난 직물은 개별 포가 다른 직물과 적게 뭉치며 주로 낱개 단위로 리프터의 힘을 받았다. 리프터의 힘을 받은 직물의 무게는 비교적 가벼워 높이 들어올려지고 완만한 포물선을 그리며 하강하는 것이 관찰되었다. 또한, ‘distance from center of drum’ 표준편차가 낮은 직물의 회전 궤도가 비교적 뚜렷하게 그려진 것으로 보아 주위 직물의 간섭이 덜 작용한 것으로 보인다(Figure 20). 이러한 경향은 통계적으로 유의한 상관성을 나타내었다($r = -0.763$, $p < 0.05$) (Figure 21).

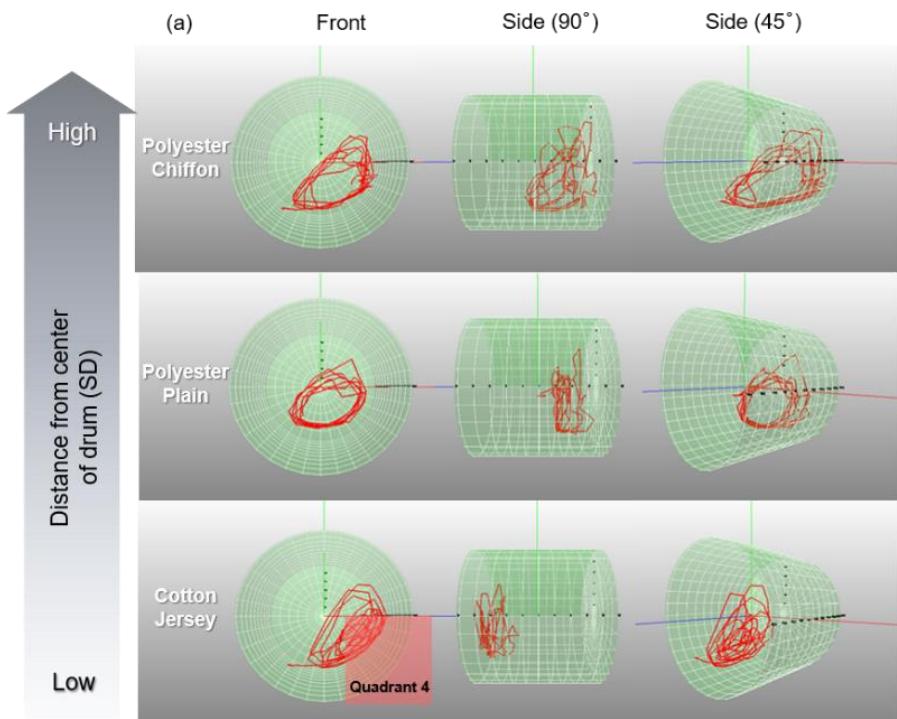


Figure 20. Washer dynamics 3D trajectory.

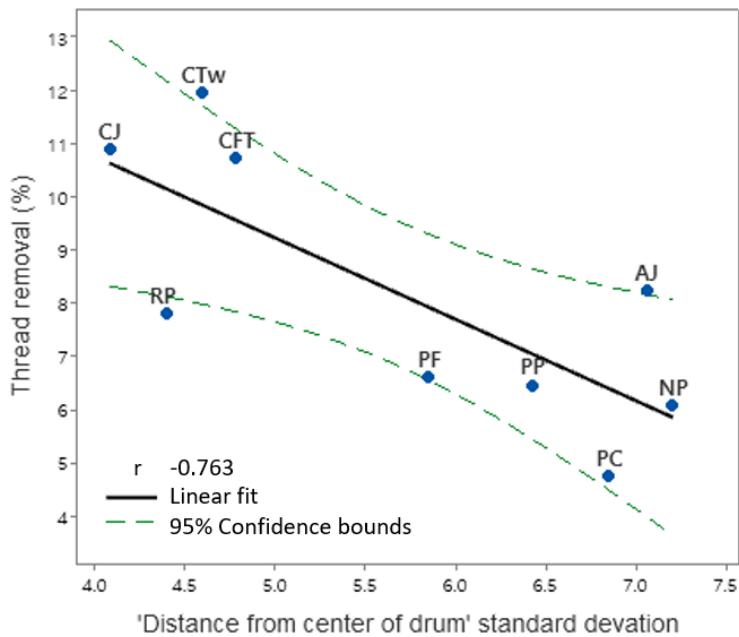
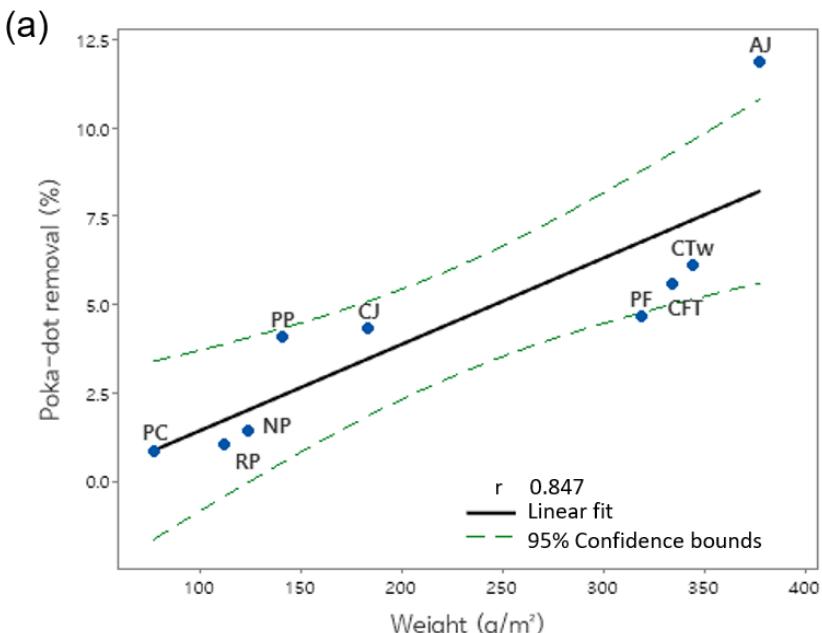


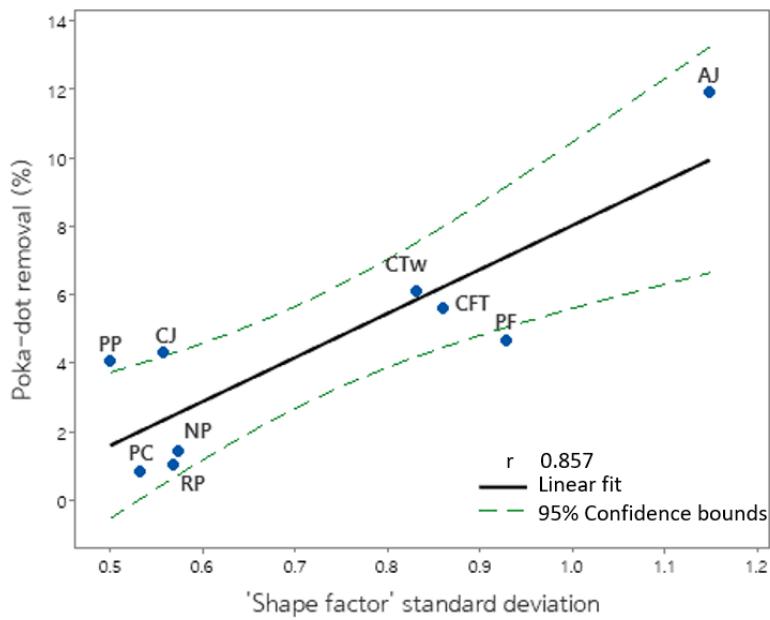
Figure 21. Correlation between 'distance from center of the drum' standard deviation and thread removal.

3.2 Poka-dot 제거율(EMPA 306)에 영향을 미치는 직물 특성과 거동

EMPA 306 Poka-dot 제거율은 직물 무게와 개별 거동지수 ‘shape factor’ 표준편차와 평균변화량에 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 무거운 직물은 낙하 및 다른 직물과의 상호작용 과정에서 가벼운 직물보다 강한 충격을 받는다. 본 실험에서 사용된 무거운 직물은 대부분 뺨뻑하고 두꺼운 것으로 관찰이 되었는데, 이러한 직물은 드럼 회전 시 형태 변화의 정도와 빈도가 높게 나타났다. 반면, 가볍고, 얇고, 유연한 직물들은 접힌 채로 주로 거동하여 형태 변화의 정도 및 빈도가 적게 나타났다. 이를 통하여, 낙하 시 충격과 굴신 및 펼침에 의한 기계력이 가볍고, 얇고, 유연한 직물에 적게 가해졌을 것으로 생각된다. 반면, 무거운 직물에는 굴신 및 펼침, 낙하로 인한 기계력이 더 강하게 부과되어, Poka-dot 제거율이 더 높게 나타난 것이라고 사료된다. 이는 Poka-dot 과 무게 ($r = 0.847$, $p < 0.05$), 개별 직물 ‘shape factor’ 표준편차 ($r = 0.857$, $p < 0.05$), 평균변화량 ($r = 0.779$, $p < 0.05$)의 유의한 양적 상관관계로도 관찰되었다(Figure 22).



(b)



(c)

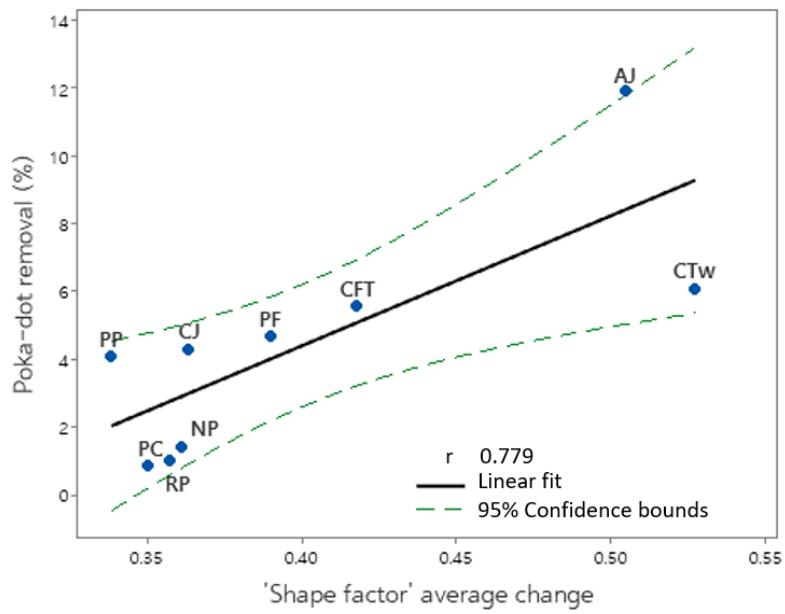


Figure 22. Correlations between Poka-dot removal, fabric property, and fabric movements.

제 4 절 세탁기 구동 전류 파라미터와 직물 특성 과의 관계

본 실험에서는 컴퓨터에서 인식할 수 있도록 모터전류를 Q-current의 형태로 변환하여 측정하였다(Eq. 16). 드럼 모터의 Q-current를 측정한 후, 전류 파라미터 Q_{sd} (전류값의 표준편차)와 $Q_{area/s}$ (1초당 필요한 전력량)를 추출하였다.

$$Q\text{-current} = \frac{\text{motor current (A)}}{20.2} \times 32768 \quad (16)$$

4.1 직물 특성과 건포 전류 파라미터의 관계

세탁기 프로그램의 직물 분류 과정에서 전류 파라미터에 영향을 미치는 직물의 물리적 특성을 도출하고자 하였다. 기존 직물 분류 시스템 프로토콜과 동일하게 드럼 내 물이 주입되기 전인 건포 상태와 물이 주입된 후의 습포 상태로 나누어 전류값을 측정하였고, 전류 파라미터(Q_{sd} , $Q_{area/s}$)를 추출하였다. 그리고 각 전류 파라미터에 영향을 미치는 직물 특성을 분석하고 상관분석을 실시하였다.

본 실험의 직물 시료의 크기가 같아 직물 두께가 두꺼울수록 직물 부피가 증가한다. 따라서, 직물이 두꺼울수록 직물이 드럼 내 차지하는 부피가 증가하고, 직물 이동의 자유도가 감소하게 된다. 이러한 직물을 드럼 회전을 따라서 거동하고, 드럼 회전 운동을 방해하지 않아 필요한 토크, 즉 전류가 감소하게 되어 $Q_{area/s}$ 도 감소하게 된다. 반대로, 얇은 직물은 드럼 내 차지하는 부피가 적어 드럼 회전 시, 드럼의 빈 공간을 통해 낙하하는 거동을 보인다. 이 때, 직물은 드럼 회전을 방해하여 더 많은 양의 토크를 필요로 한다(Figure 23). 이러한 관계는 두께와 $Q_{area/s}$ 의 부의 상관관계로 관찰되었다 ($r = -0.557$, $p < 0.1$) (Figure 24).

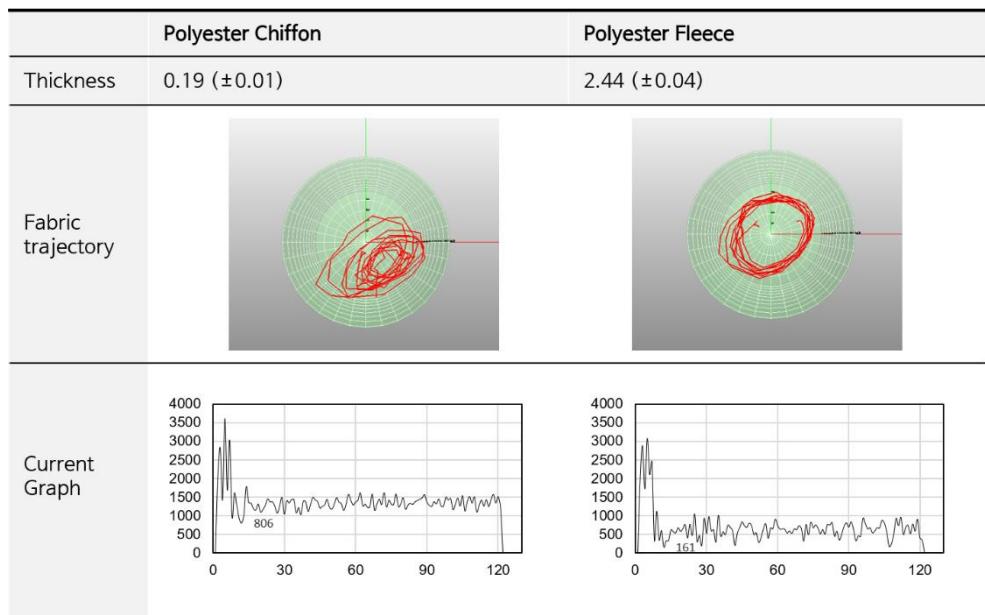


Figure 23. Fabric movement and motor current in dry condition.

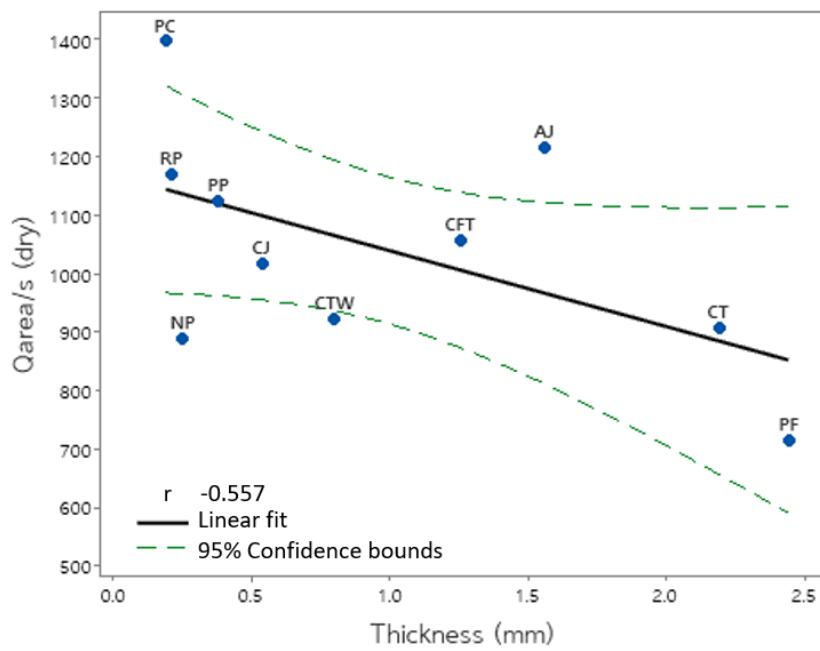


Figure 24. Correlation between dry $Q_{area/s}$ and thickness.

4.2 직물 특성과 습포 전류 파라미터의 관계

앞서 직물의 두께는 흡수율과 유의한 상관성을 이루었다. 이러한 관계가 나타난 이유는 직물이 두꺼울수록 실과 직조 사이에 흡수할 수 있는 물의 양이 더 많기 때문이다. 습포 조건에서 두꺼운 직물은 높은 흡수율로 인하여 습윤 무게가 크게 증가하고, 이로써 $Q_{area/s}$ 도 증가하였다. 따라서, 습포 조건에서는 건포 조건에서 다르게 $Q_{area/s}$ 와 두께가 양적 상관성을 보였다($r = 0.759$, $p < 0.05$) (Figure 25).

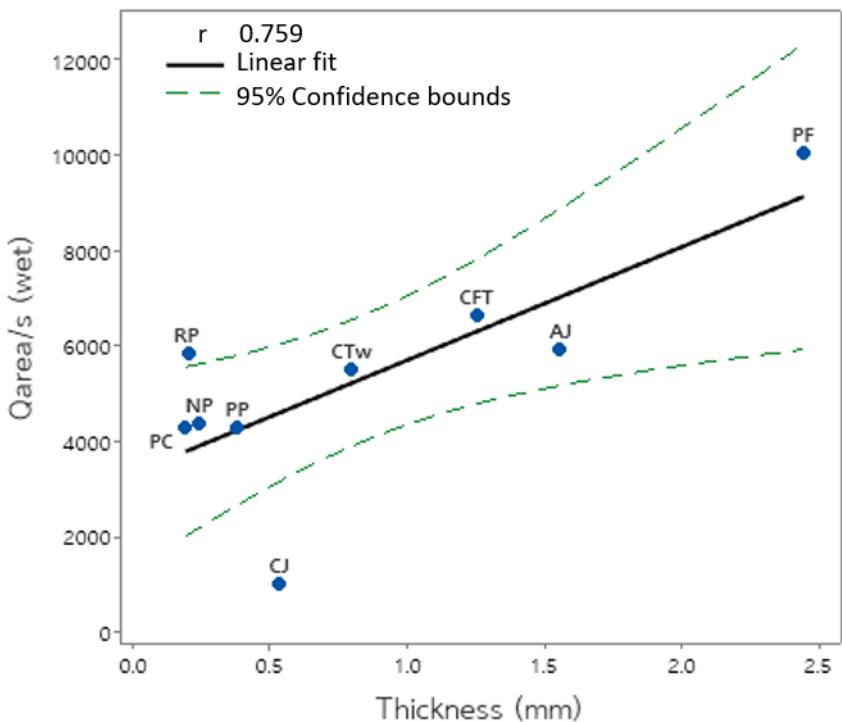


Figure 25. Correlation between wet $Q_{area/s}$ and thickness.

습포 조건의 Q_{sd} 는 수분율의 영향을 받은 것으로 보인다. 앞서 수분율이 높은 직물은 잘 엉키고, 수분율이 낮은 직물은 잘 미끄러지는 경향을 보였다. 드럼 측면에서 보았을 때 수분율이 낮은 직물은 대부분 불규칙한 궤적을 보였으며 이는 낮은 수분율과 표면 에너지로 인하여 회전하면서 드럼 깊이 방향이나 드럼 회전 반대방향으로 미끄러졌기 때문이라고 생각된다(Figure 26). 이러한 거동으로 드럼 회전에 불규칙한 저항이 가해지고 부하 변동이 생겨, Q_{sd} 의 증가에 기여한 것으로 사료된다. 또한, 이러한 관계는 습포 Q_{sd} 와 수분율의 미미한 부적 상관관계로도 나타났다($r = -0.609$, $p < 0.10$) (Figure 27).

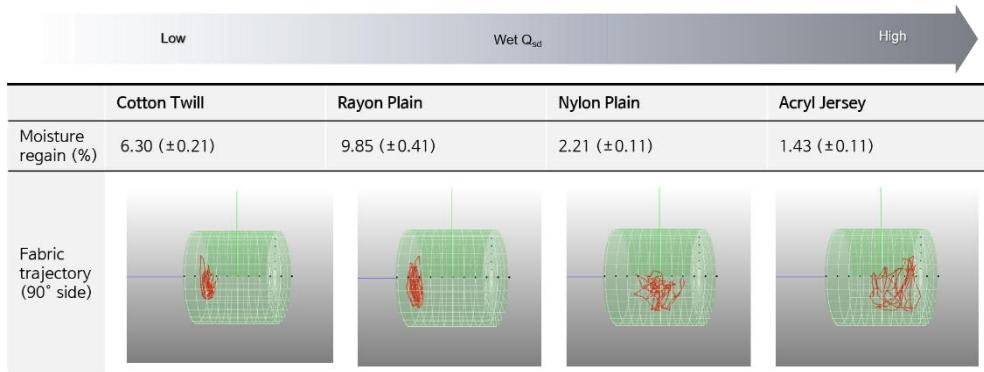


Figure 26. Fabric trajectory from the side of the washer.

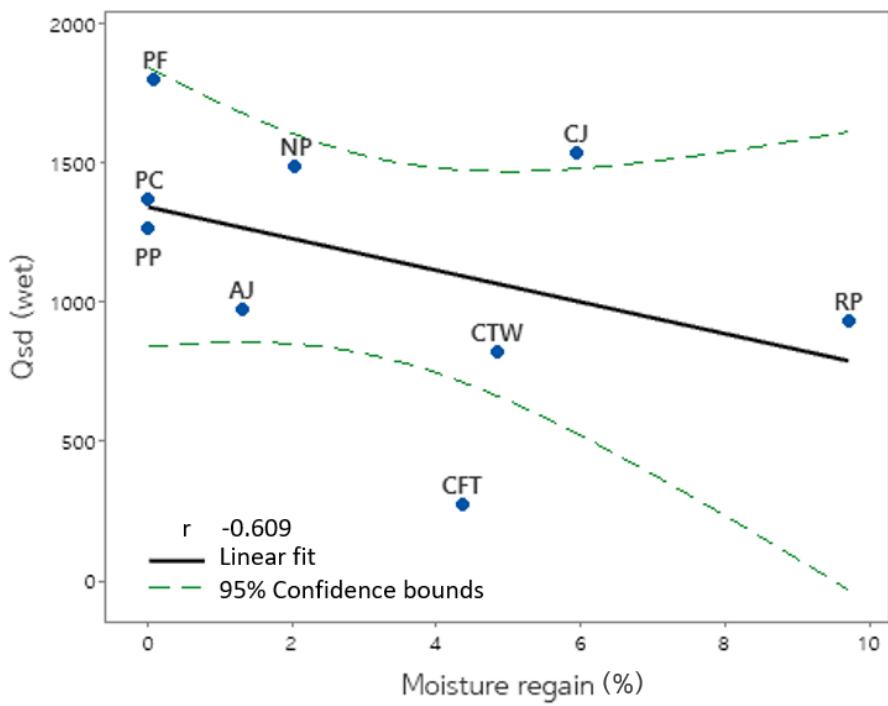


Figure 27. Correlation between wet Q_{sd} and moisture regain.

4.3 전류 파라미터를 이용한 직물 분류 체계

One-way ANOVA 와 Tukey's pairwise test(사후분석)를 통해 전류 파라미터의 유의한 차이를 이용하여 세탁기의 직물 분류 과정을 조사하였다. 직물 종류가 가장 많이 나뉘는 건포 $Q_{area/s}$ 를 첫 번째 분류 기준으로 잡았다. 유의한 평균 차이가 없어 같은 그룹으로 분류된 직물은 다음 단계에서 평균 차이가 있는 파라미터의 그룹화를 통하여 분류하였다 (Figure 28).

첫 번째 분류에서, 건포 $Q_{area/s}$ 에 대하여 평균 간 사후분석을 실시하였을 때, polyester fleece 와 polyester chiffon 은 672.13 의 차이로 가장 큰 평균 차이가 있어 가장 먼저 분류가 되었다($p < 0.001$). 그리고 건포 $Q_{area/s}$ 가 높은 polyester chiffon, acryl jersey, rayon plain, polyester plain 이 한 그룹으로, 건포 $Q_{area/s}$ 가 상대적으로 낮은 cotton french terry, cotton jersey, nylon plain, cotton twill, polyester twill 이 다른 한 그룹으로 분류되었다.

두 번째 분류 단계에서, 건포 $Q_{area/s}$ 가 높은 집단 중 rayon plain 및 polyester plain 과 유의한 차이를 보인 acryl jersey 가 분류되었다($p < 0.005$). 건포 상태에서 rayon plain 과 polyester plain 의 두께, 즉 부피 차이가 크게 나지 않아 건포 $Q_{area/s}$ 의 유의한 차이가 관찰되지 않은 것으로 보인다. 반면, acryl jersey 는 rayon plain 및 polyester plain 과 두께 차이가 크므로, 건포 $Q_{area/s}$ 에 대하여 유의한 차이가 나타난 것으로 생각된다. 건포 $Q_{area/s}$ 가 비교적 낮은 직물 집단 중에서는 cotton french terry 와 cotton jersey 의 분류가 이루어졌다. Cotton french terry 와 cotton jersey 는 모두 친수성 소재로 이루어진 직물로, 두께 차이에 의한 흡수량의 차이가 습포 $Q_{area/s}$ 값에 영향을 미쳐 분류가 된 것으로 보인다($p < 0.001$).

세 번째 분류 단계에서는 rayon plain 과 polyester plain, nylon plain 과 cotton twill 에 대한 분류가 이루어졌다. Rayon plain 과 polyester plain 은 습포 $Q_{area/s}$ 에 의해 분류되었다. Nylon plain 과 cotton twill 은 습포 Q_{sd} 에 의해 분류가 되었는데, 이는 직물이 다른

직물 및 드럼 표면과 상호작용하는데 있어 수분율이 영향을 주었기 때문이다. 수분율이 낮은 nylon plain 잘 미끄러져 드럼 벽 깊이로의 이동이 관찰되었고, 이러한 거동으로 드럼 회전에 저항이 가해져 Q_{sd} 가 증가하였다. 반면, 수분율이 높은 cotton twill은 직물끼리 잘 엉켜 직물 집합의 형성으로 인하여 4 사분면에 제한된 거동을 보였으며, 드럼 깊이로의 이동이 명확하게 관찰되지 않았다(Figure 26). 따라서 cotton twill의 Q_{sd} 가 nylon plain 보다 낮게 측정되어 두 직물이 분류된 것으로 보인다.

세탁기의 직물 분류 과정 중 건포 조건에서는 직물의 두께 또는 부피가, 습포 조건에서는 두께로 인한 흡수 무게와 수분율이 전류 파라미터에 영향을 미친 것으로 보인다. 이처럼 직물 특성과 상관성이 높은 건포와 습포 전류 파라미터로 직물의 물리적 특성을 추정하고, 물리적 특성과 관련된 정보를 조합하여 직물 종류를 분류할 수 있을 것으로 보인다. 앞서 직물 특성이 드럼 내 거동에 영향을 미쳐 전류 파라미터 값에 영향을 줄 것이라 예측하고 직물 거동과 전류값 간 상관성을 조사하였으나, 이들 간 뚜렷한 상관성은 관찰되지 않았다. 추후 직물 집합과 드럼 사이의 상호작용을 나타내는 거동지수의 개발과 거동과 전류값의 관계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

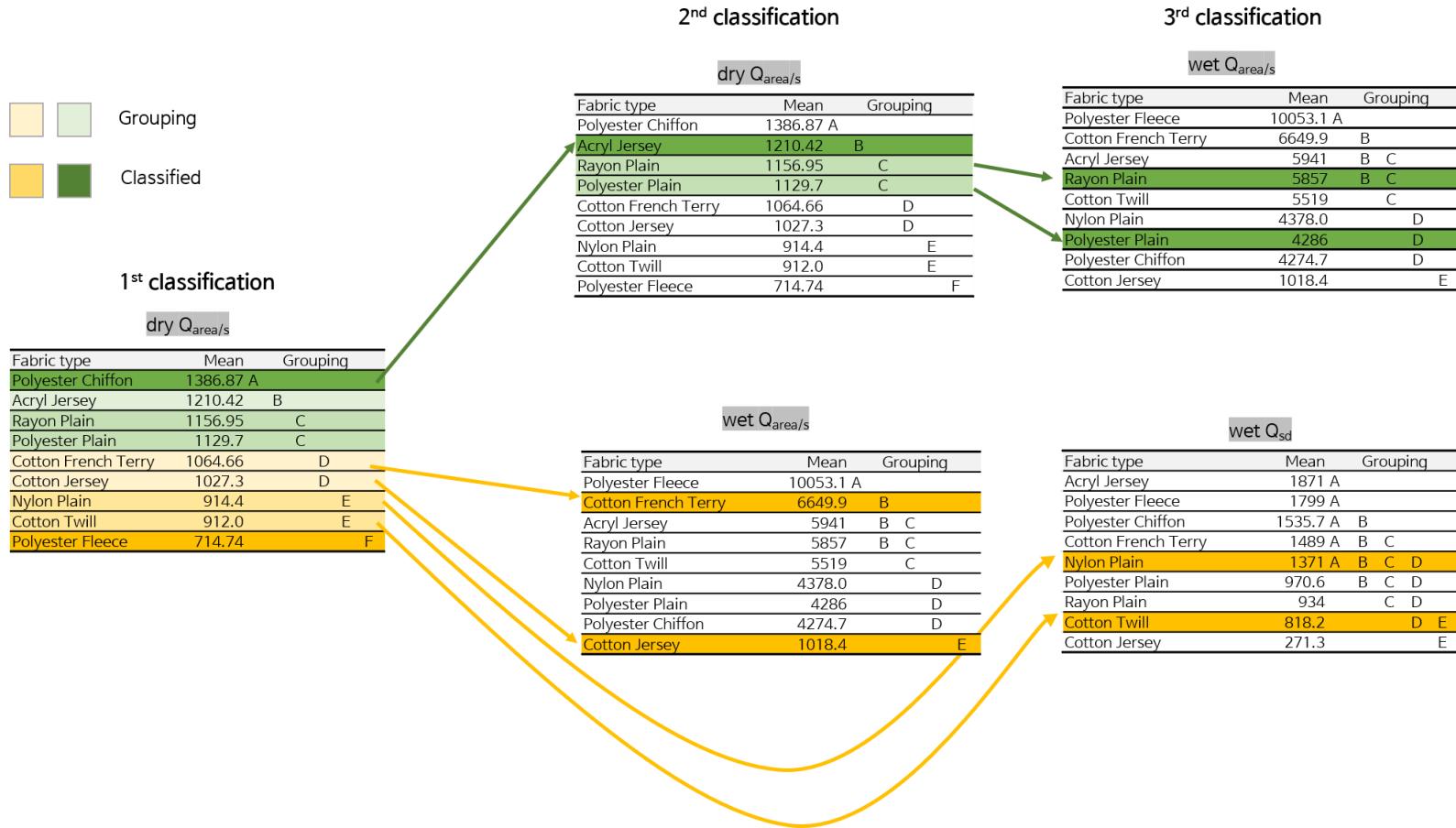


Figure 28. Fabric classification process based on average difference between fabric types.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 직물 특성, 거동, 기계력, 세탁기 모터 전류 사이의 관계를 조사하였다. 수분율, 무게, 두께 및 강연성과 같은 직물의 물리적 특성은 직물 거동에 영향을 미친 것으로 관찰되었다. 친수성 직물은 직물끼리 잘 엉켜 주위 직물에 의한 압축 및 간섭으로, 드럼 4 사분면에 한정된 거동을 보여, 드럼 중심으로부터 이동 거리의 편차가 적게 나타났다. 직물의 무게, 두께, 강연성이 큰 직물들은 개별 직물의 ‘shape factor’ 표준편차와 평균 변화량이 컸다. 이는 무겁고, 두껍고, 뺏뻣한 직물의 접힘과 펴침이 자주 일어났으며, 이로 인한 형태 차이가 컸음을 의미한다. 직물 특성과 거동은 기계력에 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 직물 마찰계수와 개별 직물의 ‘distance from center of the drum’ 표준편차는 올풀림과 상관성이 있었다. 직물 무게와 개별 직물의 ‘shape factor’ 표준편차 및 평균변화량은 Poka-dot 제거율과 상관성이 있었다. 이로써, 직물의 마찰 및 이동 궤적은 올풀림에, 직물의 굽신 및 접힘과 낙하로 인한 충격이 Poka-dot 제거율에 주요한 영향을 미치는 요인이라고 판단하였다. 전류 파라미터는 건포 조건에서는 두께, 습포 조건에서는 두께 및 수분율과 상관성이 관찰되었다. 직물 특성이 드럼 내 낙하 거동에 영향을 미쳐 세탁기 구동전류 패턴에 영향을 미친 것으로 사료되며, 이처럼 전류 패턴 분석으로 직물의 분류가 가능하리라 생각된다.

본 연구는 실용적인 3 kg 부하에서 다양한 직물의 물리적 특성, 거동, 기계력, 전류 파라미터 사이의 관계를 분석하였다는 점에서 의의가 있으나 거동지수 및 기계력과 전류 파라미터의 관계를 발견하지 못한 점에서 연구의 한계가 있다. 향후 직물의 물리적 특성에 따른 최적화된 거동 및 기계력을 반영한 효율적인 세탁 프로토콜을 개발하기 위해서는 모터 전류에 영향을 미치는 직물 거동에 대한 구체적 데이터를 확보할 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] Carroll B. Physical aspects of detergency. *Colloids Surf, A Physicochem Eng Asp* 1993; 74: 131-167.
- [2] Kiss E. Kinetics and mechanisms of detergency: Part I: Liquid hydrophobic (oily) soils. *Text Res J* 1975; 45: 736-741.
- [3] Yun C, Choi HR, Park S, et al. The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer V: Focusing on the role and shape of the lifter. *Text Res J* 2019; 89: 364-374.
- [4] Yun C, Park S, Park CH. The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer. *Text Res J* 2013; 83: 1786-1795.
- [5] Gotoh K, Harayama K, Handa K. Combination effect of ultrasound and shake as a mechanical action for textile cleaning. *Ultrason Sonochem* 2015; 22: 412-421.
- [6] Cai G, Guo L, Ge H, et al. A facile method for a quantitative study of the mechanical force impact on fabric dye loss during domestic washing. *J Surfactants Deterg* 2016; 19: 901-907.
- [7] Chung H, Kim JY. Effects of washing parameters on dimensional stability of viscose rayon fabrics. *Fibers Polym* 2016; 17: 1945-1954.
- [8] Woo JH, Kim J, Park CH. Contributing ratio of the mechanical and the physicochemical actions to washing efficiency of mineral oil and protein soils. *Fibers Polym* 2014; 15: 645-652.
- [9] Yun C, Park CH. The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer II: under various physical washing conditions. *Text Res J* 2015; 85: 251-261.
- [10] Yun C, Park CH. The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer III: Focus on the optimized movement algorithm. *Text Res J* 2016; 86: 563-572.
- [11] Park S, Yun C, Kim J, et al. The effects of the fabric properties on fabric movement and the prediction of the fabric movements in a front-loading washer. *Text Res J* 2013; 83: 1201-1212.
- [12] Cho Y, Yun C, Park CH. The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer IV: under 3.25-kg laundry load condition. *Text Res J* 2017; 87: 1071-1080.
- [13] Napper IE, Barrett AC, Thompson RC. The efficiency of devices intended to reduce microfibre release during clothes washing. *Sci Total Environ* 2020; 738: 140412.

- [14] Napper IE, Thompson RC. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Mar Pollut Bull* 2016; 112: 39-45.
- [15] Vassilenko E, Watkins M, Chastain S, et al. Domestic laundry and microfiber pollution: Exploring fiber shedding from consumer apparel textiles. *PLoS One*. 2021; 16: e0250346.
- [16] Woo JH, Kim KH, Kang JH, Kim HC, Park JH, Bang ES. *Washing machine and control method thereof*. Patent 1020210014714, South Korea, 2021.
- [17] Muir AC, McKeown P, Li Y, et al. The removal of food fat based soils during the washing of fabrics. *Chem Eng Res Des* 2013; 91: 1602-1613.
- [18] Kim SR. *Science of Detergents and Laundry*. Seoul: Kyomunsa; 2002. p.156-157.
- [19] Sochi T. Slip at fluid-solid interface. *Polym Rev* 2011; 51: 309-340.
- [20] Neto C, Evans DR, Bonaccurso E, et al. Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies. *Rep Prog Phys* 2005; 68: 2859.
- [21] Yun C. Fabric movement and detergency in a front-loading washer. Seoul: Seoul National University Graduate School; 2013.
- [22] Usubamatov R. Gyroscopic Effects in Engineering. In: *Theory of gyroscopic effects for rotating objects: Gyroscopic effects and applications*. Springer Nature; 2021. p. 11.
- [23] Straffelini G. Friction. In: Straffelini G. *Friction and Wear: Methodologies for Design and Control*. Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 21-60.
- [24] Sears FW, Zemansky MW, Young HD, Freedman RA. *Sears and Zemansky's university physics*. 13th ed. Boston, MA: Pearson; 2012.
- [25] Nam J, Do ND, Jeon S, et al. Detergency prediction in front-loading washing machines using discrete element method. *Text Res J* 2023; 93: 5-17.
- [26] Liu H, Gong RH, Xu P, et al. The impact of rotational speed and water volume on textile translational motion in a front-loading washer. *Text Res J* 2019; 89: 3401-3410.
- [27] Jeddi AAA, Khorram-Toussi Z, Maleki V, et al. Relations between fabric structure and friction: Part II: weft knitted fabrics. *J Text Inst* 2004; 95: 359-367.
- [28] Tetik T, Yildiz R, Labanieh AR, et al. Hydrodynamic modeling of e-textile fabric washing behavior by the Coupled Eulerian–Lagrangian method. *Text Res J* 2021; 91: 1117-1131.
- [29] Shimizu T, Funakoshi H, Kobayashi T, et al. Reduction of noise and vibration in drum type washing machine using Q-learning. *Control Eng Pract* 2022; 122: 105095.
- [30] Balt A, van den Brekel L, Vandecasteele C, et al. Radiotracer study of wash load movement in a drum-type fabric washing machine using a gamma camera. *Appl Radiat Isot* 1987; 38: 7-12.

- [31] Mac Namara C, Gabriele A, Amador C, Bakalis S. Dynamics of textile motion in a front-loading domestic washing machine. *Chem Eng Sci* 2012; 75: 14-27.
- [32] Kim H, Yun C, Park CH. Fabric movement and washing performance in a front-loading washer with a built-in pulsator. *Text Res J* 2019; 89: 4732-4745.
- [33] Bueno L, Laso C, Amador C, Bakalis S. Modelling the kinetics of stain removal from knitted cotton fabrics in a commercial Front Loader Washing Machine (FLWM). *Chem Eng Sci* 2019; 200: 176-185.
- [34] Yun C, Cho Y, Park CH. Washing efficiency and fabric damage by beating and rubbing movements in comparison with a front-loading washer. *Text Res J* 2017; 87: 708-714.
- [35] Park J, Wassgren CR. Modeling the dynamics of fabric in a rotating horizontal drum using the discrete element method. *Part Sci Technol* 2003; 21: 157-175.
- [36] Liu H, Gong H, Xu P, et al. The mechanism of wrinkling of cotton fabric in a front-loading washer: The effect of mechanical action. *Text Res J* 2019; 89: 3802-3810.
- [37] Lee JH, Kong TW, Lee WC, et al. Load modeling for the drum washing machine system simulation. In: *IEEE International Conference on Power Electronics*, South Korea, 22-26 Oct 2007. p. 861-865.
- [38] Liu C. Novel method for measurement of fabric multi-directional bending performance. *Fibers Polym* 2022; 23: 3638-3644.
- [39] Ajayi JO. Effects of fabric structure on frictional properties. *Text Res J* 1992; 62: 87-93.
- [40] Bao W, Gong RH, Ding X, et al. Optimizing a laundering program for textiles in a front-loading washing machine and saving energy. *J Clean Prod* 2017; 148: 415-421.
- [41] Akoglu H. User's guide to correlation coefficients. *Turk J Emerg Med* 2018; 18: 91-93.
- [42] Grancaric AM, Tarbuk A, Pusic T. Electrokinetic properties of textile fabrics. *Color Technol* 2005; 121: 221-227.
- [43] Gupta B. Textile fiber morphology, structure and properties in relation to friction. In: Gupta B. *Friction in textile materials*. Sawston: Elsevier; 2008. p. 3-36.
- [44] Jeddi AA, Dabiryan H, Kalani S. An explanation of warp knitted fabric deformation under uni-axial tension by a novel index as shape ratio. *J Text Inst* 2017; 108: 500-506.
- [45] Schoch KF Jr, Panackal PA, Bimstefer MG, et al. Application of shape factor to mechanical behavior of thermal interface pads and putties. *J Electron Packag* 2022; 144: 031008.
- [46] Lee A, Seo MH, Yang S, et al. The effects of mechanical actions on washing efficiency. *Fibers Polym* 2008; 9: 101-106.
- [47] Kothari V, Swani N, Gangal M. Frictional properties of woven fabrics. *Indian J Fibre Text Res* 1991; 16: 251-256.

Appendix

Table A1. Correlation between fabric properties and fabric movements.

Fabric Properties	Fabric Movement Index	Pearson Correlation Coefficient	p-value
Weight (g/m ²)	Shape factor (avg)	0.742	0.022
	Shape factor (SD)	0.923	0.000
	Shape factor (avg change)	0.837	0.005
	[Macro at the side]	0.788	0.012
	Shape factor (avg)		
	[Macro at the side]	0.553	0.123
	Shape factor (SD)		
	[Macro at the side]	0.632	0.068
	Shape factor (avg change)		
	Shape factor (avg)	0.692	0.039
Thickness (mm)	Shape factor (SD)	0.822	0.007
	Shape factor (avg change)	0.427	0.252
	[Macro at the side]	0.674	0.047
	Area (SD)		
	Distance from center of drum (avg)	-0.331	0.385
Wet friction coefficient	Distance from center of drum (SD)	-0.698	0.036
	Distance from center of drum (avg change)	-0.157	0.686
	Shape factor (avg)	0.686	0.042
	Shape factor (SD)	0.291	0.447
	Shape factor (avg change)	0.357	0.346
Stiffness (mm)	Shape factor (avg)	0.662	0.052
	Shape factor (SD)	0.560	0.117
	Shape factor (avg change)	0.864	0.003
	[Macro at the side]	0.818	0.007
	Shape factor (avg)		
	[Macro at the side]	0.518	0.153
	Shape factor (SD)		
Moisture regain (%)	[Macro at the side]	0.615	0.078
	Shape factor (avg change)		
	Distance from center of the drum (avg)	-0.477	0.194
	Distance from center of the drum (SD)	-0.797	0.010
	Distance from center of the drum (avg change)	-0.122	0.754

Table A2. Correlation between mechanical action (thread and Poka-dot removal rate) and fabric properties.

Mechanical Action	Fabric Properties	Pearson Correlation Coefficient	p-value
Thread removal rate (%)	Weight (g/m^2)	0.586	0.098
	Thickness (mm)	0.135	0.729
	Porosity (%)	0.309	0.418
	Stiffness (cm)	0.689	0.040
	Wet friction coefficient	0.707	0.033
	Water absorption (%)	0.081	0.836
	Moisture regain (%)	0.579	0.102
	Weight (g/m^2)	0.847	0.004
	Thickness (mm)	0.599	0.088
	Porosity (%)	0.523	0.149
Poka-dot removal rate (%)	Stiffness (cm)	0.648	0.059
	Wet friction coefficient	0.194	0.617
	Water absorption (%)	-0.069	0.861
	Moisture regain (%)	-0.196	0.613

Table A3. Correlation between EMPA 304 and fabric movement.

Mechanical Action	Fabric Movement Index	Pearson Correlation Coefficient	p-value
	Distance from the center of the drum (avg)	-0.386	0.305
	Distance from the center of the drum (SD)	-0.763	0.017
	Distance from the center of the drum (avg change)	0.013	0.974
	Speed threshold number	0.013	0.974
	Area (avg)	0.361	0.341
	Area (SD)	0.584	0.099
	Area (avg change)	0.403	0.283
	Outline (avg)	0.529	0.143
	Outline (SD)	0.535	0.138
	Outline (avg change)	0.070	0.857
	Shape factor (avg)	0.537	0.136
Thread removal rate (%)	Shape factor (SD)	0.547	0.128
	Shape factor (avg change)	0.313	0.413
	[Macro at the side view] Area (avg)	0.539	0.093
	[Macro at the side view] Area (SD)	0.336	0.376
	[Macro at the side view] Area (avg change)	0.258	0.503
	[Macro at the side view] Outline (avg)	0.447	0.227
	[Macro at the side view] Outline (SD)	0.400	0.286
	[Macro at the side view] Outline (avg change)	0.181	0.641
	[Macro at the side view] Shape factor (avg)	0.719	0.029
	[Macro at the side view] Shape factor (SD)	0.624	0.073
	[Macro at the side view] Shape factor (avg change)	0.080	0.839

Table A4. Correlation between EMPA 306 and fabric movement.

Mechanical Action	Fabric Movement Index	Pearson Correlation Coefficient	p-value
	Distance from the center of the drum (avg)	0.190	0.625
	Distance from the center of the drum (SD)	0.089	0.821
	Distance from the center of the drum (avg change)	0.460	0.213
	Speed threshold number	0.457	0.216
	Area (avg)	0.461	0.212
	Area (SD)	0.857	0.003
	Area (avg change)	0.787	0.012
	Outline (avg)	0.607	0.083
	Outline (SD)	0.468	0.204
	Outline (avg change)	0.606	0.084
	Shape factor (avg)	0.446	0.229
Poka-dot removal rate (%)	Shape factor (SD)	0.857	0.003
	Shape factor (avg change)	0.779	0.013
	[Macro at the side view] Area (avg)	0.695	0.038
	[Macro at the side view] Area (SD)	0.588	0.096
	[Macro at the side view] Area (avg change)	0.519	0.152
	[Macro at the side view] Outline (avg)	0.708	0.033
	[Macro at the side view] Outline (SD)	0.801	0.009
	[Macro at the side view] Outline (avg change)	0.774	0.014
	[Macro at the side view] Shape factor (avg)	0.620	0.075
	[Macro at the side view] Shape factor (SD)	0.467	0.205
	[Macro at the side view] Shape factor (avg change)	0.443	0.232

Table A5. Pearson correlation coefficient and p-value between current parameters and fabric properties.

Current Parameters	Fabric Properties	Pearson	
		Correlation Coefficient	p-value
Q_{sd}	Weight (g/m^2)	0.338	0.374
	Thickness (mm)	0.567	0.111
	Porosity (%)	0.238	0.537
	Stiffness (cm)	-0.078	0.843
	Wet friction coefficient	-0.131	0.736
	Water absorption (%)	0.083	0.832
$Q_{area/s}$	Moisture regain (%)	-0.609	0.082
	Weight (g/m^2)	0.509	0.161
	Thickness (mm)	0.759	0.018
	Porosity (%)	0.454	0.220
	Stiffness (cm)	0.159	0.683
	Wet friction coefficient	0.338	0.374
	Water absorption (%)	0.550	0.125
	Moisture regain (%)	-0.208	0.592

Table A6. Pearson correlation coefficient and p-value between current parameters and fabric movements.

Current Parameter	Fabric Movement Index	Pearson Correlation Coefficient	p-value
	Distance from the center of the drum (avg)	0.464	0.208
	Distance from the center of the drum (SD)	0.675	0.046
	Distance from the center of the drum (avg change)	0.399	0.287
	Speed threshold number	0.038	0.923
	Area (avg)	0.085	0.828
	Area (SD)	0.286	0.456
	Area (avg change)	0.182	0.639
	Outline (avg)	0.096	0.806
	Outline (SD)	-0.275	0.473
	Outline (avg change)	-0.174	0.654
Q_{sd}	Shape factor (avg)	0.001	0.997
	Shape factor (SD)	0.596	0.090
	Shape factor (avg change)	0.197	0.611
	[Macro at the side view] Area (avg)	0.124	0.750
	[Macro at the side view] Area (SD)	0.361	0.340
	[Macro at the side view] Area (avg change)	0.238	0.537
	[Macro at the side view] Outline (avg)	0.120	0.759
	[Macro at the side view] Outline (SD)	0.482	0.189
	[Macro at the side view] Outline (avg change)	-0.008	0.983
	[Macro at the side view] Shape factor (avg)	-0.044	0.910
	[Macro at the side view] Shape factor (SD)	0.225	0.560
	[Macro at the side view] Shape factor (avg change)	0.129	0.740

Current Parameter	Fabric Movement Index	Pearson Correlation Coefficient	p-value
	Distance from the center of the drum (avg)	-0.175	0.652
	Distance from the center of the drum (SD)	0.126	0.748
	Distance from the center of the drum (avg change)	0.521	0.151
	Speed threshold number	0.469	0.203
	Area (avg)	0.609	0.082
	Area (SD)	0.499	0.171
	Area (avg change)	0.479	0.192
	Outline (avg)	0.579	0.102
	Outline (SD)	-0.520	0.151
	Outline (avg change)	-0.300	0.432
	Shape factor (avg)	0.574	0.106
	Shape factor (SD)	0.602	0.086
	Shape factor (avg change)	0.264	0.493
Q _{area/s}	[Macro at the side view] Area (avg)	0.386	0.305
	[Macro at the side view] Area (SD)	0.590	0.095
	[Macro at the side view] Area (avg change)	0.509	0.162
	[Macro at the side view] Outline (avg)	0.332	0.383
	[Macro at the side view] Outline (SD)	0.316	0.408
	[Macro at the side view] Outline (avg change)	0.291	0.447
	[Macro at the side view] Shape factor (avg)	0.431	0.246
	[Macro at the side view] Shape factor (SD)	0.612	0.080
	[Macro at the side view] Shape factor (avg change)	0.638	0.064

Abstract

Fabric Properties Influencing Fabric Movement, Mechanical Action, and Motor Current in a Front-loading Washer

Mingyeong Kim

Fashion and Textiles

The Graduate School

Seoul National University

This study analyzed the influence of physical properties of fabrics on the movement and mechanical action in a front-loading washer. This was done to derive the key fabric properties and movements that affect mechanical action, and to examine the relationship between fabric properties and motor current parameters.

Moisture regain affected the interaction between fabrics and the trajectory of the fabric movement (standard deviation of ‘distance from the center of the drum’). Fabrics with high moisture regain showed concentrated movements due to the entanglement between fabrics, followed by rapid descent at the bottom right of the drum. Thickness, flexibility, and weight influenced the extent and frequency of changes in fabric shape (standard deviation and average change of ‘shape factor’). Thin, lightweight, and flexible fabrics mainly moved being folded, resulting in less noticeable changes in fabric shape.

Furthermore, these kind of movement patterns also had a

significant impact on mechanical action. The trajectory of fabric movement was related to thread removal. Fabrics that exhibited movements limited at the bottom right of the drum were exposed to greater friction and compression from the surrounding fabrics. As the degree and frequency of shape change of the fabric increased, mechanical action resulting from folding and unfolding of the fabric also increased, leading to higher Poka-dot removal.

Current parameters used for the fabric classification process were influenced by the thickness and moisture regain of the fabrics. In the dry condition, thickness affected the occupying volume of the fabric, while in the wet condition it affected water absorbed weight. Also, moisture regain was shown to influence the interaction between the fabrics and the drum wall, which is related to the standard deviation of the motor current. Therefore, it appears that fabric types can be classified to some extent based on fabric properties using current parameters.

The present study investigated the relationship between fabric properties, movement, mechanical actions, and current parameters. It observed the impact of moisture regain and thickness on fabric movement and mechanical action. Additionally, correlations were found between moisture regain, thickness, and motor current, which enable fabric classification utilizing current parameters. These findings contribute to the foundational research for the development of washing protocol that optimize fabric movement based on fabric characteristics, thereby enhancing washing efficiency.

Keywords : Front-loading washer, fabric movement, fabric properties, mechanical action, motor torque current

Student Number : 2021-26602