



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](#)

생활과학석사 학위논문

드럼세탁기 내 직물거동분석

- 3.25kg 세탁 부하량을 중심으로 -

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

의류학과

조 윤 경

생활과학석사 학위논문

드럼세탁기 내 직물거동분석

- 3.25kg 세탁 부하량을 중심으로 -

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

의류학과

조 윤 경

드럼세탁기 내 직물거동분석

- 3.25kg 세탁 부하량을 중심으로 -

지도교수 박 정 희

이 논문을 생활과학석사 학위논문으로 제출함

2014년 12월

서울대학교 대학원

의류학과

조 윤 경

조윤경의 석사 학위논문을 인준함

2015년 2월

위원장 柳 孝仙 (인)

부위원장 이주영 (인)

위원 차貞姬 (인)

국 문 초 록

본 연구에서는 실제 세탁 부하량 조건에서 드럼 세탁기 내 직물 거동을 분석하고 직물 거동 특성에 따른 세척성의 차이를 알아보고자 하였다. 이를 위하여, 3.25kg의 세탁 부하량에서 세탁 회전 속도를 달리하여 다양한 직물 거동을 유도하였다. 집합적 차원과 개별적 차원의 두 관점에서 직물 거동을 분석하였고, 이를 수치화 및 시각화 하였다. 마지막으로, 직물 거동 특성과 세척성의 상관관계를 분석하여 세척성 향상에 영향을 미치는 중요한 인자를 도출하였다.

세탁 회전 속도에 따라 직물 거동 특성에 차이가 있었는데, 집합적 차원의 직물 거동 분석으로부터, 직물이 세탁기 내에서 차지하는 면적에 차이가 있음을 알았다. 또한, 개별적 차원의 직물 거동 분석으로는 표지 직물 거동이 12가지로 분류되었고, 각 세탁 회전 속도에서의 표지 직물 거동 양상과 직물 간 상호작용의 정도가 달라짐을 보았다. 세척성 평가 결과, 집합적 및 개별적 직물 거동 특성의 차이로 인해 세탁 회전 속도 46rpm에서 최대의 세척성을 나타냄을 알 수 있었다.

집합적 및 개별적 직물 거동 특성을 수치화한 10가지의 직물 거동 지수의 유의성과 세척성과의 상관성을 통계적으로 분석하였다. 그 결과, 세척성에 영향을 미치는 직물 거동 지수로 세탁물 집합의 차지 면적 최대값/최소값, 세탁물 집합의 차지 면적 평균과 편차,

표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리 평균과 편차, 드럼과 표지 직물의 속도 차 평균, 표지 직물의 출현 빈도가 추출되었다. 그리고 회귀분석 결과 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리 평균, 표지 직물의 출현빈도가 세척성에 대한 회귀식의 영향이 큰 두 가지 독립변수로 나타났으며, 위 두 거동지수가 작을수록 세척성이 높은 것으로 나타났다. 이는 낙하와 같은 기계력이 큰 거동뿐 아니라 직물 간의 섞임, 마찰과 같은 상호작용이 활발할수록 세척성이 높다는 것을 의미한다.

주요어: 드럼 세탁기, 실제 세탁 부하량, 직물 거동, 기계적 작용, 세척성

학 번: 2013-21522

목 차

I. 서론	01
II. 실험	09
1. 시료	09
2. 세탁기	11
3. 직물거동 분석	13
3.1. 세탁조건	13
3.2. 직물거동 촬영	17
3.3. 동영상 분석	19
4. 세척성 평가	22
4.1. 세탁조건	22
4.2. 세척성 측정	29
5. 통계 분석	31
III. 결과 및 고찰	32
1. 직물 거동 분석의 조건	32
2. 세탁회전속도에 따른 직물의 거동	37
2.1. 집합적 거동	39
2.2. 개별적 거동	44

3. 직물 거동이 세척성에 미치는 영향 -----	52
3.1. 세탁회전속도에 따른 세척성과 세척의 균일성 -	52
3.2. 직물 거동의 수치화 -----	56
3.3. 직물거동지수와 세척성의 상관관계 -----	60
 IV. 요약 및 결론 -----	 66
 V. 참고문헌 -----	 69
 부 록 I.-----	 73
 Abstract -----	 80

List of tables

Table 1. Specification of the cotton base load items -----	09
Table 2. Base load combinations of each load size -----	10
Table 3. Amount of water at each laundry load -----	13
Table 4. Operating conditions of front-loading washer for analyzing fabric movement -----	16
Table 5. Video recording conditions -----	17
Table 6. Soiling composition of artificial soiled fabrics -----	22
Table 7. Ingredients of IEC reference detergent A* -----	27
Table 8. Occupied area(cm ²) by laundry loads at each drum rotation speed -----	40
Table 9. Visualized micro movement pattern at each rotation speed -----	51
Table 10. Fabric movement indexes -----	58
Table 11. Correlation between each fabric movement index and detergency(%) -----	62

List of figures

Figure 1. The factors involved in washing mechanism -----	01
Figure 2. Photos of front-loading washers for evaluation of detergency(left) and analysis of fabric movement(right) -----	12
Figure 3. Loading example of pillow cases according to IEC 60456 -----	14
Figure 4. Tracing and digitizing of fabric movement in a front- loading washer-----	21
Figure 5. Attached artificial soiled fabrics on pillow case -----	24
Figure 6. Occupied area ratio(%) in front-loading washer according to load ratio(%) at every beginning 3 turns of drum rotating -----	33
Figure 7. Two different viewpoints for fabric movement analysis -----	38
Figure 8. Visualized macro movement pattern at each rotation speed -----	41
Figure 9. Occupied area(cm ²) at each drum rotation speed-----	43
Figure 10. Classification of micro fabric movement-----	46
Figure 11. Appearance frequency of micro fabric movement at each drum rotation speed-----	48
Figure 12. Detergency(%) at each drum rotation speed -----	53

Figure 13. Unevenness at detergency(%) of each drum rotation speed
----- 53

Figure 14. Classified position of a front-loading washer ----- 77

Figure 15. Calculating shape factor for various tracer fabric shapes
----- 79

I. 서론

세탁이란 세탁기와 세제, 물의 조합을 통하여 의류에 부착된 오구를 제거함으로써 의류를 오염되기 전의 깨끗한 상태로 만드는 일련의 공정이다[1,2]. 그림 1과 같이 세탁은 화학적인 작용, 물리적인 작용과 더불어 온도, 시간과 같은 환경적인 요소가 함께 관여하는 복합적인 공정으로, 세탁의 가장 기본 원리는 물질의 이동이다[1,3].

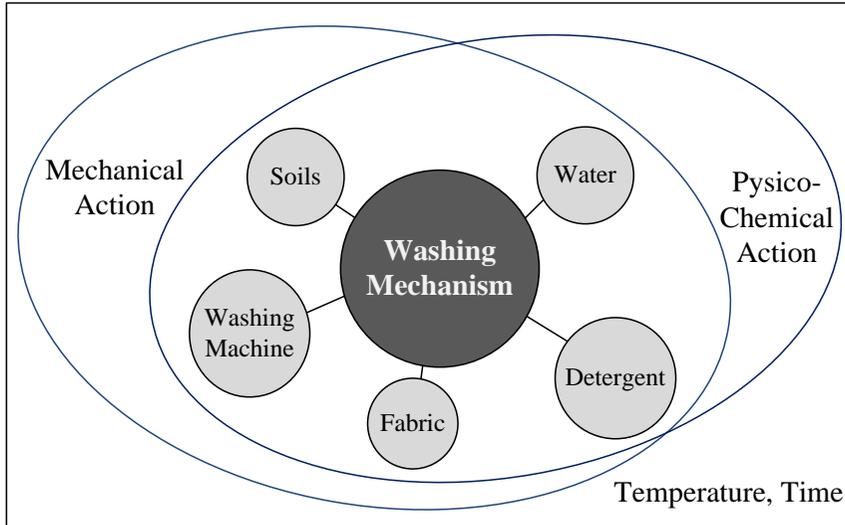


Figure 1. The factors involved in washing mechanism.

오구가 부착된 의류를 세제가 용해된 물에 담그면 세액이 섬유 내로 침투하여 섬유가 팽윤하고, 섬유와 오구 간 그리고 오구 내의 결합이 느슨해진다[4]. 세액에 의한 이러한 이화학적 작용은 오구의 종류에 따라 다소 다르지만 기본적으로 톨링업, 액정형성, 유화, 현탁, 가용화, 지타 전위, 효소작용 등의 기작을 통해 이루어지며, 오구가 제거되고 오구가 세액 중에 안정적으로 분산될 수 있도록 돕는다[1]. 한편, 세탁에서의 기계적 작용은 직물의 물리적 변형, 직물 간의 마찰과 세액의 교반을 일으켜 오구가 의류와 분리되고, 의류로부터 멀리 떨어지도록 한다[5]. 또한 신선한 세액을 의류 표면에 공급하여 지속적으로 오구가 제거되도록 도우며 의류의 재오염을 방지한다[1].

드럼 세탁기의 경우, 그 기계적 작용은 내부 드럼에 부착된 세개의 회전 날개인 리프터에 의한 것으로, 드럼이 회전하면 세탁물이 리프터에 걸려 드럼의 상부로 운반되었다가 중력에 의해 떨어지면서 발생하는 기계력이 세탁물을 두드리고 비비는 효과를 준다고 알려져 있다[6]. 이러한 세탁 공정을 통하여 의류제품은 그 위생적 성능과 미적 성능을 회복하게 된다[4].

이처럼 세탁은 물리화학적인 요소가 상호 복합적으로 관계되어 있으므로 세탁 메커니즘을 규명하는 일은 쉽지 않다[1]. 세탁의 효과를 향상시키기 위하여 현재까지 세탁 메커니즘을 해석하기 여러 연구들이 행해진 바 있으나, 보통 오염물질의 종류, 직물의 종류, 세제의 조성 및 특성, 물의 특성, 세탁 온도와 같은 이화학적

메커니즘에 관한 연구들이 주를 이루었다[15-20]. 하지만 세탁에서 오염물질의 이동을 촉진시키고 오구를 의류로부터 완전히 제거하는데에는 기계적임 힘이 결정적인 역할을 하며 그러므로 세탁에서의 기계적인 역할을 규명하는 일 또한 매우 중요하다[5].

세탁의 기계적 작용과 관련된 연구가 몇 가지 있는데, 우선 세탁에서의 기계적 작용을 분류하고 각 작용의 세척효율을 살펴본 연구는 다음과 같다.

Kissa[7]는 세탁에서의 기계적 작용을 크게 세액유동(hydrodynamic flow)과 직물굴신(flexing), 마찰(abrasion)로 나누었다. 그러나 Kissa의 연구는 기계적 동작 유형을 제시하는 데 그쳤으며, 개별적인 동작에 의한 오구 제거 메커니즘에 대한 설명은 하지 않았다.

Lee 등[8]은 앞서 구분된 세 가지 기계적 동작, 즉, 세액이 직물 사이로 통과하는 세액유동(hydrodynamic flow), 직물의 굴곡(flexing), 직물 간의 마찰(abrasion)에 대해서 각각의 기계적 작용이 세척효율에 어떠한 영향을 미치는 지 살펴보았다. 연구에서 사용한 오구는 4종류로, 각각 red wine, pig's blood, cocoa, carbon black/mineral이며 이 오구들은 실생활에서 자주 접하게 되는 오염물이다[9]. 이 연구에서는 첫째로 오구의 성분과 오구가 직물에 부착되어 있는 상태에 따라서 기계적 동작에 따른 세척효율이 달라지는 것을 밝혔다. red wine과 pig's blood와 같은 수용성 오구 제거보다 cocoa, carbon black/mineral oil과 같은 불용성 오구 제거에 있어서 기계적 작용이 많은 영향을 주었다. 둘째로 세 가지 기계적

작용 중에서 직물 간의 마찰(abrasion)이 가장 높은 세척효율을 보이는 것을 실험을 통해 확인하였다.

Ruben과 Sefarim[10]은 세탁에서의 마찰에 의한 기계적 작용을 모사할 수 있는 장비를 제작하고, 이를 통해 지용성 오구의 제거에 대한 마찰의 영향을 정량적으로 밝혔다. 그 과정에서 일반적으로 세탁 과정에서 직물이 받는 마찰력의 세기는 물론, 세액의 농도와 마찰 속도에 따른 마찰계수의 차이도 밝혔으며, 마찰 시간에 따른 오구 제거율을 계산하였다.

그러나 이와 같은 연구들은 모두 세탁에서의 기계적 작용을 개별적으로 분류하여 실제 세탁 시 일어나는 동작의 일부분만을 설명하는데 그쳤다[9]. 또한, 세척효율 평가는 각 동작을 실험실적인 차원에서 모사 장치로 시뮬레이션 해 본 결과로, 기계적인 동작이 복합적으로 작용하는 실제 세탁기에서의 기계적 작용과 직접적으로 연관 지어 설명하는 데에는 한계가 있다[6].

실험실적 차원을 벗어나 실제 세탁기 내에서 직물의 움직임 관찰한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Balt 등[11]은 드럼 세탁기 내 직물 거동을 3차원적으로 관찰하고자 하였고, 방사선 물질과 gamma camera를 이용하였다. 방사선 물질이 담긴 캡슐을 직물에 부착하고 감마 카메라로 직물의 위치를 추적해 본 결과, 세탁물의 움직임이 직물의 종류와 직물의 양, 그리고 물의 양에 의해 달라진다는 사실을 알았다. 하지만 이 연구는 직물의 위치와 움직임에 영향을 미치는 인자 외에는 세탁에 관한 다른

정보를 제공하지는 않았다.

Namara 등[12]은 불투명한 시스템에서 방사성 tracer particle이 부착된 물질의 거동을 살필 수 있는 PEPT(position emission particle tracking) 기술을 이용하여 드럼 세탁기 내 직물의 움직임을 추적하였다. 이에, 드럼 세탁기 내에서 직물이 깊이 방향으로 움직이는 정도는 미미하고 상하좌우의 이차원적인 움직임은 상당하다는 것을 보았다. 또한, 세탁기 내에서 직물이 수직항력과 마찰력을 강하게 받아 세척성이 높아지는 impact zone과 드럼 중심부분의 직물이 힘을 비교적 적게 받는 dead zone을 구분하고 dead zone 보다 impact zone에서 세척성에 대한 영향이 더 크다고 하였다. 이 연구를 통해 세탁물의 부하량, 직물의 크기, 매수 등에 따라 세탁기 내 직물 거동이 달라지며, 어떤 영역에서 주로 거동하느냐에 따라 직물에 가해지는 기계력이 달라져 세척성에 영향을 줄을 알았다. 그러나 직물의 거동과 세척성의 관계를 명확하게 파악하지는 않았다.

본 연구실에서도 세탁 메커니즘에서 기계적 작용의 해석을 위하여 몇 가지 기초연구를 수행하였다[13,14].

우선 Park 등의 연구[13]에서는 직물 특성이 세탁기 내 직물 거동에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 직물의 역학적, 이화학적 성질을 설명할 수 있는 대표 직물 특성을 여섯 가지로 정리하였고, 각 특성으로부터 직물 거동의 차이가 발생함을 회귀식을 통하여 밝혔다. 회귀식에서 직물의 드레이프성이 직물 거동에 가장 큰 영향을

미치는 것으로 나타났으며, 다항 로지스틱스 회귀모형을 이용하여 각각의 직물 특성 값으로 직물 거동을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

Yun 등의 연구[14]에서는 직물 거동을 그 특성에 따라 네 가지 패턴으로 분류하였으며, 각 패턴에 대한 세척성을 검증하여 세척성에 영향을 미치는 직물 거동 특성을 분석하였다. 직물 거동 특성을 수치화하기 위하여 13가지의 직물 거동 지수를 도출하였고 그 중 세척성과의 설명력이 높은 네 가지의 대표 거동 지수를 선택하여 직물 거동 특성으로 세척성을 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 이 연구를 통해서 세탁기가 직물에 가하는 기계력뿐 아니라 직물 내부의 마찰도 세척성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

또한, Yun[5]은 그의 후속 연구에서 직물 종류와 크기, 매수를 달리하여 보다 다양하고 실제 세탁에 가까운 조건에서 드럼 세탁기 내 직물 거동을 분석하였다. 직물 거동을 리프터 건넌, 늘어짐, 구름, 낙하, 회전으로 5가지로 분류하였으며, 각 거동을 직물에 가해지는 중력, 원심력, 마찰력의 힘의 관계로 설명하였다. 또한 position factor라는 직물 거동 지수로 직물이 세탁기 내에서 위치하는 영역 별 빈도의 차이에 따라 직물 거동을 네 가지 패턴으로 분류하고 각 패턴의 거동 특성과 세척성을 설명하였다. 그 결과, 단일적인 거동 특성을 보이는 패턴A와 패턴D보다 복합적인 거동 특성을 보이는 패턴B와 C의 세척성이 우수하였으며, 직물의 손상은 줄이면서 세척성을 향상시킨다는 측면에서 봤을 때, 패턴 B가 가장 효율적인 직물

거동 패턴으로 나타났다.

앞서 살펴본 바와 같이, 지금까지 세탁의 기계적인 영향과 세탁기 내의 직물 거동에 관한 몇 가지 연구가 있었다[5-14]. 그러나 대부분의 연구들이 실제 세탁조건과 거리가 있는 실험실적 차원에서 수행되었다는 한계점을 지닌다. 또한, 세탁기 내 직물 거동 연구의 경우, 세탁 부하량에 있어 직물 1장이나 1kg 미만의 부하량을 가지고 연구가 수행되었다. 이 또한 실제 세탁 시의 조건을 반영하지 못했다는 한계점이라고 볼 수 있다. 또한, 부하량이 작았기 때문에 세척성에 영향을 가장 많이 줄 것이라고 예상되는 섞임, 마찰과 같은 직물 간의 상호작용이 연구 결과에 충분히 반영되지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 드럼 세탁기 내 직물 거동 연구를 실제 세탁 부하량 조건에서 수행하여, 실제 세탁 부하량 조건에서의 직물 거동을 분석하고, 기존 연구에는 반영되지 못했던 직물 간 상호작용의 세척성에 대한 영향과 부하량이 늘어났을 때 나타나는 직물 거동 특성을 파악하고자 하였다.

이를 위하여, 실제 세탁 부하량에서 세탁 회전 속도에 따라 달라지는 직물 거동을 분석하였다. 직물 거동 분석은 집합적 차원(macro dimension)과 개별적 차원(micro dimension)에서 수행되었고, 나타나는 직물 거동 특성은 이미지 분석을 통해 수치화, 시각화되었다. 또한 거동 특성과 세척성의 상관관계를 객관적으로 분석하기 위하여 10가지의 직물 거동 지수를 활용한 통계 분석을

실시하였다.

세탁 회전 속도에 따라 달라지는 직물 거동 특성과 그에 따른 세척성과의 관계를 바탕으로, 드럼 세탁기에서 세척성을 향상시키기 위해서 어떠한 직물 거동을 유도해야 하는지 알아보고자 하였다.

II. 실험

1. 시료

세탁물 더미(dummy)로 IEC 60456(5th edition)규격[22]에 맞는 100% 면 직물(bed sheet, pillow case, towel)를 사용하였고, 각 더미 직물의 자세한 사양은 표 1에 나타내었다.

Table 1. Specification of the cotton base load items [22]

Criteria for conditioned new items	Bed Sheet	Pillow case	Towel
Substrate	Long staple pure cotton		
Yarn	Ring spun		
Weave	Plain weave 1/1		Huckaback
Mass per unit area(g/m ²)	185±10		220±10
Length(mm)	2400±150	800±50	1000±50
Width(mm)	1600±40	800±20	500±30
Weight per piece(g)	725±15	240±5	110±3
Water uptake in %	138±10	138±10	250±15
Finish	desizing, boiling off, singeing, bleaching, no filling or stiffening size		

관찰 부하량 설정을 위한 예비 실험을 위해 세탁기의 최대용량(13kg)을 기준으로 4단계 부하량 25%(3.25kg), 50%(6.5kg), 75%(9.75kg), 100%(13kg)에 맞는 세탁물 조합을 규격에 맞도록 구성하였으며, 구성 내용은 표 2와 같다.

Table 2. Base load combinations of each load size

	Number of towels	Number of pillow cases	Number of bed sheets	Total weight(kg)
25%	8	4	2	3.25
25% (all pillow cases)	0	13	0	3.07
50%	25	10	2	6.50
75%	32	14	4	9.65
100%	40	18	6	12.92

본 연구에서 거동 관찰을 위한 대표 부하량은 인공오염포를 포함하여 25%(3.25kg)으로 선정되었으며, 이 때에는 직물 특성에 대한 직물 거동에의 영향력을 배제하기 위하여 모든 세탁물 더미를 pillow case로 통일하였고, 표 2에 나타났듯이 총 13장의 pillow case가 사용되었다. 직물의 개별적인 움직임 관찰하기 위한 표지 직물을 마련하기 위하여 그 중 한 장의 pillow case를 시판 가정용 다목적 염료를 이용하여 파란색으로 염색하였다.

2. 세탁기

실험에 사용한 세탁기는 상업용 13kg 용량의 드럼 세탁기(Samsung, WW-HF135UV)이다. 직물 거동 관찰용 세탁기는 용이한 관찰을 위해 세탁기의 정면, 우측면, 상부를 투명하게 개조하였다. 세척성 평가용 세탁기는 동일한 제품을 별도의 개조 없이 사용하였다. 사용된 세탁기의 실제 사진은 그림 2와 같다.

사용된 드럼 세탁기에는 세탁물량 감지 센서와 수위 감지 센서가 장착되어 있다. 따라서 투입된 세탁물량을 감지한 뒤 그에 맞는 적당한 세탁수량을 공급하고 세탁시간을 설정하여 자동적으로 세탁이 진행된다.

그러나 본 연구에서는 세탁기의 자동 세탁 프로그램을 이용하지 않았고, 실험 목적 및 설계에 맞도록 세탁 프로그램을 수동적으로 조절하여 사용하였다. 삼성전자에서 제공받은 프로그램으로 세탁 회전 속도, 세탁기의 운전/휴지 시간을 실험 조건에 맞도록 설정하였다.

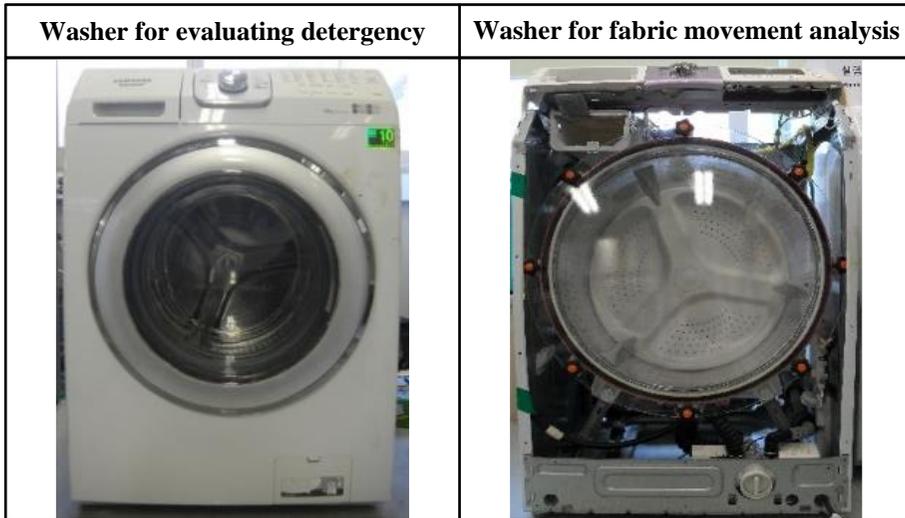


Figure 2. Photos of front-loading washers for evaluation of detergency(left) and analysis of fabric movement(right).

3. 직물거동 분석

3.1. 세탁조건

25%(3.25kg) 부하량에 대해서 세탁 회전 속도를 변화시키면서 달라지는 드럼 세탁기 내 직물 거동을 관찰하였다.

투입한 세탁수량은 수량 측정 예비 실험을 통해 각 부하량 별 실제 세탁 행정에서 사용되는 수량을 측정한 뒤, 본 실험에 그대로 적용하여 사용하였다. 각 수량은 표 3에 정리하였다.

Table 3. Amount of water at each laundry load

	25%	25% (all pillow cases)	50%	75%	100%
Water(L)	17.1	16.5	25.3	28.6	44.2

세탁용수는 실험실에 공급되는 수돗물의 온도를 15℃로 맞추어 사용하였고, 세탁용수의 온도를 안정적으로 유지하기 위하여 세탁기 유입수 공급장치(SH-WB90R, Samheung Energy)를 사용하였다. 세탁에 필요한 만큼의 수돗물을 세탁기 유입수 공급장치에 투입하여 설정한 온도로 물의 온도를 맞춘 뒤, 세탁 용수의 온도가 안정되면 세제 유입구를 통하여 수동으로 세탁기에 공급하였다.

시료(pillow case)는 상온에서 24시간 이상 자연 건조된 세탁물 더미를 그림 3과 같이 IEC 60456(5th edition) 규격이 제안하는

방법[22]으로 세탁기에 투입하였다. 즉, 세탁기를 정면에서 봤을 때 가로 방향으로 한 장씩 서로 엇갈리게 세탁물 더미를 투입하였다. 단, 시료를 집을 때에는 시료의 중앙 부분을 집어 시료가 중앙 부분을 중심으로 자연스럽게 아래로 늘어뜨려지도록 하였다.

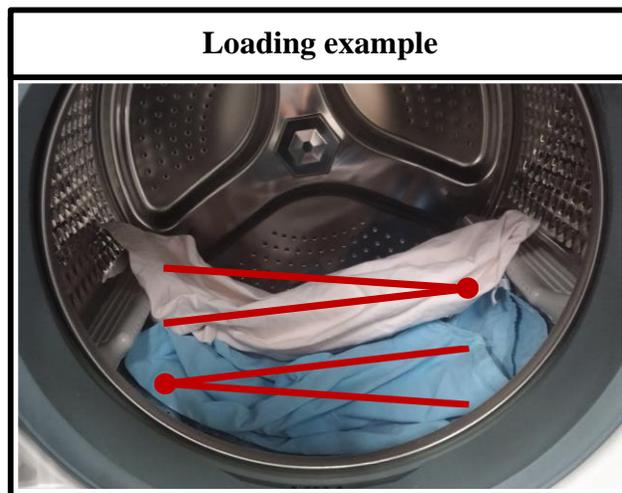


Figure 3. Loading example of pillow cases according to IEC 60456 [22].

직물 거동 관찰 시, 세제가 용해된 물을 넣게 되면 거품이 관찰을 방해하기 때문에 세제를 첨가하지 않았으며, 이후 세척성 실험에서 세제를 투입하여도 직물 거동이 크게 다르지 않은 것을 확인하였다.

본 연구에서는 34rpm, 46rpm, 50rpm, 54rpm의 네 가지 세탁 회전 속도에 대해서 드럼 세탁기 내 직물 거동을 관찰하였다. 직물 거동 관찰 시의 드럼 모터 구동은 표 4에 정리되어 있다. 모든 세탁 회전 속도에서 세탁기는 16초 동안 운전하고 4초 동안 멈춤을 반복하도록 하였다. 세탁기 운전은 시계 방향과 반시계 방향을 교대로 반복하며 구동하였다. 표 4에 나타난 대로, phase A에서는 시계 방향으로 16초 운전하고 4초 멈추었다가 phase B에서 다시 반시계 방향으로 16초 운전하고 4초 멈춤을 반복하였다.

Table 4. Operating conditions of front-loading washer for analyzing fabric movement

	Operating conditions
Drum Speed (revolutions per minute)	34rpm, 46rpm, 50rpm, 54rpm
Reversing rhythm	16s on time
	4s off time

The diagram illustrates the reversing rhythm with the following sequence:

- 16sec**: Phase A (clockwise)
- 4sec**: off
- 16sec**: Phase B (counter-clockwise)
- 4sec**: off

3.2. 직물거동 촬영

디지털 카메라(Digital camera, Samsung VLUU PL50)를 이용하여 드럼 세탁기 내 직물 거동을 촬영하였다. 촬영은 세탁물이 물을 충분히 흡수할 수 있도록 세탁기 동작 후 10분 후부터 시작하였으며, 2분 간의 직물 거동을 촬영하였고, 아래 표 5와 같은 조건으로 촬영하였다. 촬영 시간에 대해서는, 먼저 육안으로 드럼 세탁기 내 직물 거동을 관찰한 다음, 각 세탁 회전 속도에서 특징적인 거동을 충분히 반영할 수 있는 시간이라고 판단하여 설정하였다.

Table 5. Video recording conditions

Distance from camera to front-loading washer	0.75m
Shutter speed of camera	1/30sec

1초당 30프레임으로 촬영된 동영상은 개인 컴퓨터로 옮겨 동영상 파일(.avi)로 저장하였다. 2분간 촬영한 동영상에서 16초 분량의 부분(phase)을 회전 방향을 통일하여 3부분 추출한 뒤 각 분량의 초기 3회전(turns), 중기 3회전, 후기 3회전의 거동을 관찰하였다. 여기에서 회전(turn)이란 내부 드럼이 한 바퀴 회전하는 것을 뜻한다. 동영상을 통한 직물 거동의 육안 관찰 시에는 다음 팻 인코더(Daum pot encoder) 프로그램을 사용하였으며 0.001초 간격의 느린 속도로 직물 거동을 관찰하였다. 직물 윤곽선 추적 시에는

TEMA motion(Image systems 社) 프로그램을 사용하였으며, 1회전 당 1/8회전 간격으로 나누어 1회전에서 8개의 프레임을 추출하여 관찰하였다.

3.3. 동영상 분석

3.3.1. 직물 윤곽선 추적

직물 거동을 분석하기 위해 TEMA motion(Image systems 社)이라는 동영상 이미지 분석 프로그램을 사용하였다. 프로그램의 outline-tracker 기능을 통해 관찰하고자 하는 세탁물의 집합이나 표지 직물의 윤곽선을 추적하였다. 또한 프로그램의 timetable 기능을 이용하여 형성된 윤곽선의 형태를 기반으로 면적, 위치(무게중심, 상하좌우 최외곽점), 윤곽선 둘레 길이의 수치적 정보를 얻었다. 그리고 프로그램의 XY Diagram 기능을 이용하여 누적된 윤곽선을 시각적으로 표현한 이미지를 얻었다.

동영상 촬영으로 얻은 16초 분량의 3부분(Phase)을 각각 초기 3회전, 중기 3회전, 후기 3회전으로 나눈 뒤, 한 바퀴 회전에 대해서 1/8회전 간격으로 8프레임씩을 샘플링 하였다. 집합적 거동 관찰의 경우, 부분(phase)과 각 부분의 시간 별 차이가 미미하여 1부분의 초기 3회전의 총 24프레임에 대해서만 세탁물 집합의 윤곽선을 추적하였다. 반면, 개별적 거동 관찰의 경우에는 개별 직물 거동의 복잡하고 다양한 양상을 최대한 반영하기 위하여 세탁 회전 속도 별로 샘플링 된 216개의 모든 프레임에서 표지 직물의 윤곽선을 추적하였다.

3.3.2. 수치화 및 식물 거동 지수

추적한 식물의 윤곽선을 수치화하기 위해서 그림 4의 왼쪽과 같이 세탁기의 중심을 원점(Origin)으로 보고, 실제적으로 거리를 알고 있는 두 점(Ref #1, Ref #2)을 기준으로 2차원적인 좌표평면을 생성하였다[21]. 세탁물 집합이나 개별 식물의 무게 중심(Center of gravity)은 형성된 윤곽선(Outline)에서 상하좌우 최외곽점의 교차점으로 정의되었다. 그림 4의 오른쪽과 같이 2차원적 좌표평면 상에서 추적한 윤곽선의 형태 및 무게중심(Center of gravity; x,y 좌표)을 기준으로 세탁물의 면적, 위치(무게중심, 상하좌우 최외곽점), 윤곽선 둘레 길이를 수치화하여 표현할 수 있었다. 또한 얻어진 위치(무게중심, 상하좌우 최외곽점) 정보의 인접한 프레임 간 차이로부터 식물의 이동 거리, 이동 속도를 수치화 할 수 있었다. 이렇게 수치화된 식물 거동 정보를 기반으로 총 10가지의 식물 거동 지수를 도출하였다. 10가지 식물거동 지수의 정의와 산출 방법은 부록 I에 나타내었다.

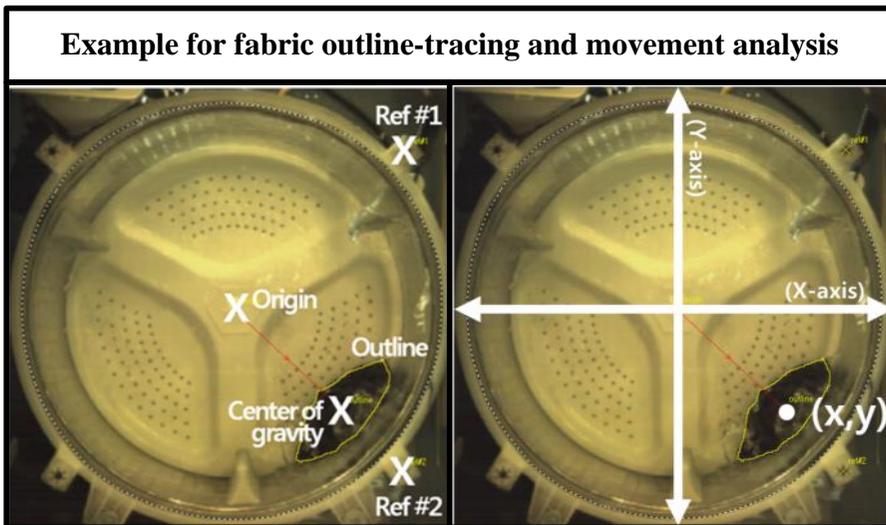


Figure 4. Tracing and digitizing of fabric movement in a front-loading washer [21].

4. 세척성 평가

4.1. 세탁 조건

4.1.1. 인공오염포

인공오염포를 사용하여 직물 거동 특성 변화에 따라 세척성이 어떻게 달라지는지 비교 및 평가하였다. 본 연구에서는 Testfabrics사에서 구입한 carbon black/mineral oil (EMPA 101), sebum/pigment (EMPA 106), cocoa (EMPA 108) 인공오염포를 사용하였다. 위 세 가지 인공오염포는 세탁에서 기계력의 영향을 평가할 때 사용되는 인공오염포로써, 각 오염물의 조성은 아래 표 6과 같다.

Table 6. Soiling composition of artificial soiled fabrics [22]

	Composition
Carbon black/mineral oil (EMPA 101)	Carbon black Paraffin oil
Sebum/pigment (EMPA 106)	Synthetic sebum ; Cows fat, Wool fat, Free fatty acid, Cholesterol, Squalen, Coconut oil, Hard paraffin Pigment ; Carbon black, Kaoline, Iron oxide
Cocoa (EMPA 108)	Unsweetened cocoa with sugar, full-cream cow' s milk and water

인공오염포를 6cm×12cm의 크기로 잘라 한 장의 pillow case에 그림 5와 같이 세 장의 인공오염포를 부착하였다. 재봉기를 사용하여 pillow case와 인공오염포를 고정시켰고, 박음질로 재봉하되 일정한 땀 수와 속도로 재봉하여 각 인공오염포와 pillow case 사이에 걸리는 장력을 최대한 일정하게 하여 pillow case의 움직임에 영향을 미치지 않도록 하였다[6]. 또한, 인공오염포는 표면과 이면의 표면 반사율 값과 그 물리적 특성이 다르게 나타나므로, pillow case에 인공오염포를 부착할 때 표면과 이면을 잘 구분하여 모든 인공오염포가 동일한 방향으로 부착되도록 하였다[6].

인공오염포 보관의 경우, 냉장 보관하여 오염물질의 성분이 변질되는 것을 방지하였으며, 최대한 깨끗한 상태로 유지하여 세척성 결과 값에 오차가 생기지 않도록 하였다[6].

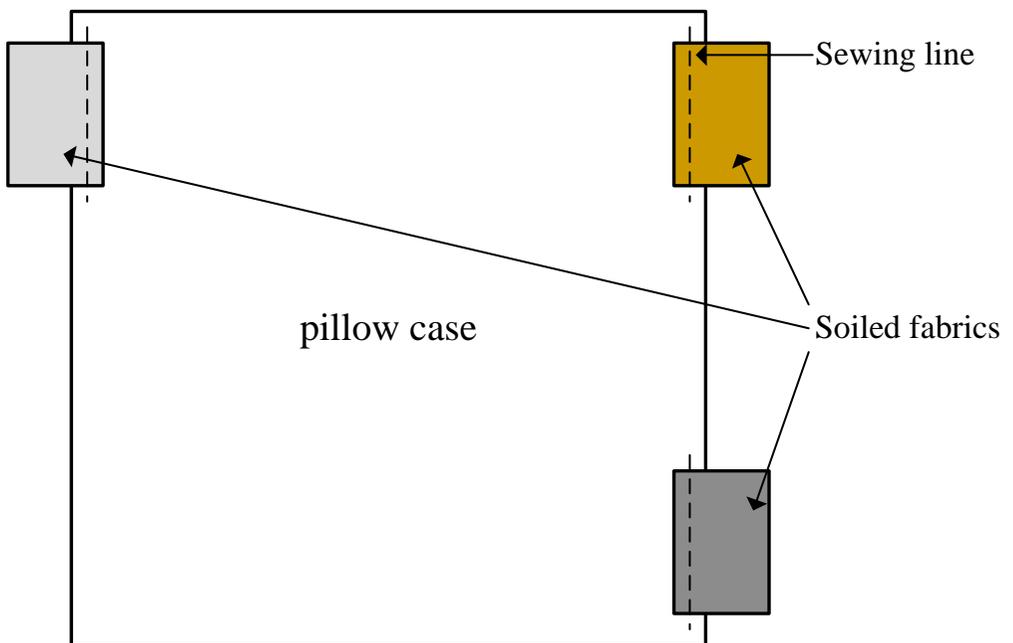


Figure 5. Attached artificial soiled fabrics on pillow case

4.1.2. 시료준비

세척성 평가 실험에서 사용한 세탁물은 직물거동 분석 실험에서 사용한 것과 동일한 pillow case 13장을 세탁물 더미(dummy)로 사용하였다. 다만, 세척성 평가를 위하여 세 장의 인공오염포가 부착된 10장의 pillow cases를 사용하였다.

세탁물을 넣을 때에는 직물거동 분석과 마찬가지로 그림 3과 같이 세탁기를 정면에서 봤을 때 가로 방향으로 한 장씩 서로 엇갈리게 투입하였다. 이 때, 인공오염포가 부착되지 않은 3장의 pillow cases를 먼저 투입하였으며, 그 후에 인공오염포가 부착되어 있는 10장의 pillow cases를 투입하였다.

4.1.3. 세탁용수

세탁용수는 실험실에 공급되는 수돗물을 15℃로 맞추어 사용하였다. 일정한 온도의 세탁용수를 안정적으로 공급해주기 위하여, 세탁기 유입수 공급장치(SH-WB90R, Samheung Energy)를 사용하였다.

세탁수량은 표 3에 나와있는 직물 거동 관찰 시 투입되었던 세탁수량과 동일하게 투입하였다. 이는 실제 세탁 행정에서 세탁물량에 따라 자동적으로 투입되는 물의 양을 측정하여 그대로 적용한 것이다.

4.1.4. 세제

세제는 IEC 60456(5th edition)에서 표준 실험세제로 명시된 IEC reference detergent A* 세제[22]를 사용하였으며, 세제의 조성은 표 7에 나타내었다. IEC reference detergent A*는 효소 프틸과 거품 방지제인 SIK를 함유한 기본 파우더와 표백제인 퍼보레이트-4 수산화 나트륨, 그리고 표백활성화제인 4-아세틸에틸렌디아민의 세 가지로 분리되어 있다[9]. 그러므로 각 성분을 IEC 60456(5th edition) 규격에 따라 위에 명시된 순서대로 77% : 20% : 3%의 비율로 혼합하여 사용하였다[9].

세제의 양은 세탁용수의 특성(냉수, 연수)에 대해 IEC 60456(5th edition)에서 권장하는 사용량인 2g/L를 사용하였다[22]. 실험 전 15°C의 0.5L의 물에 세제를 최대한 용해한 후 세제 투입구를 통하여 세제를 공급하였다.

Table 7. Ingredients of IEC reference detergent A* [22]

Ingredient	%
Linear sodium alkyl benzene sulfonate	8.8
Ethoxylated fatty alcohol	4.7
Sodium soap(tallow soap)	3.2
Foam inhibitor concentrate(12% silicon on inorganic carrier)	3.9
Sodium aluminum silicate zeolite 4A(80% active substance)	28.3
Sodium carbonate	11.6
Sodium salt of a copolymer from acrylic and maleic acid	2.4
Sodium silicate($\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}=3.3:1$)	3.0
Carboxymethylcellulose	1.2
Phosphonate(DEQUEST 2066, 25% active acid)	2.8
Optical whitener for cotton(stilbene type)	0.2
Sodium sulfate	6.5
Protease(Savinase 8.0)	0.4
Sodium perborate tetrahydrate(active oxygen 10.0%-10.4%)	20.0
Tetra-acetythylenediamine(active content 90.0%-94.0%)	3.0

4.1.5. 세탁, 헹굼 및 건조

세척성 평가에 있어 세탁시간은 20분으로 하였으며, 부분(phase) 별 운전 시간은 30초, 정지 시간은 4초로 하였다.

세탁 실험이 종료된 후, 시료에서 떼어낸 인공오염포를 세탁용수와 동일한 온도인 15℃의 정지된 물에서 총 3회 헹굼하였다.

헹굼이 끝난 후, 인공오염포를 상온에서 24시간 이상 자연 건조하였다. 각 조건에 대해서 총 3회의 반복 실험을 실시하였다.

또한, 시료는 1회 실험이 종료된 후, 세탁기에서 5회 헹굼하여 시료에 남아있는 세제를 제거해 다음 실험에 영향을 미치지 않도록 하였으며, 이후 24시간 이상 자연 건조하였다.

4.2. 세척성 측정

세척성을 평가하기 위해 분광광도계(Minolta CM-2600d)를 사용하여 세탁 전과 세탁 후의 인공오염포의 520nm 파장에 대한 표면 반사율 값을 측정하였다[5]. 반사율 측정 시에는 측정하고자 하는 대상 인공오염포 밑에 같은 실험 조건의 인공오염포 세 장을 추가로 겹쳐서 측정하였다. 이를 통해 측정 시 빛이 직물을 투과하여 직물 아래에 있는 대상을 측정하여 실험 값에 오차가 발생하는 것을 방지하였다[6]. 측정 위치는 표면과 이면의 각각 임의의 두 군데 반사율 값을 측정하여 한 인공오염포 당 네 위치를 측정하였다. 그리고 네 곳 반사율의 평균값을 이용하였다.

측정된 반사율을 식 (1)의 Kubelka-Munk equation을 이용하여 K/S값으로 변환한 다음, 식 (2)을 이용하여 세척성을 계산하였다. 본 논문에서 최종적으로 제시된 세척성은 총 3회의 실험 값을 평균한 데이터이다.

세척의 불균일성 평가의 경우, 같은 조건으로 실험한 각 10장의 세 가지 인공오염포에 대해서 세척성 표준편차를 구하였다. 즉, 세척성 표준편차가 클수록 세척이 불균일하고 표준편차가 작을수록 세척이 균일하게 되었다고 판단하였다. 세척의 불균일성(세척성 표준편차)를 구하는 식은 아래 식 (3)과 같았다.

$$K/S = \frac{(1 - R)^2}{2R} \dots [\text{Eq. 1}]$$

K: absorption coefficient
 S: scattering coefficient
 R: reflectance

$$D = \frac{(K/S)_s - (K/S)_w}{(K/S)_s - (K/S)_o} \times 100 \dots [\text{Eq. 2}]$$

D: detergency
 $(K/S)_s$: K/S value of the soiled fabric
 $(K/S)_w$: K/S value of the washed fabric
 $(K/S)_o$: K/S value of the original fabric

$$\text{Unevenness of Detergency}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n d^2}{N}} \times 100 \dots [\text{Eq. 3}]$$

d: difference between the average and the individual detergency(%)
 N: number of the measured artificial soiled fabric

5. 통계 분석

직물 거동과 세척성과의 상관관계를 분석하기 위하여 통계 프로그램 PASW Statistics 18을 사용하였다. 일원배치 분산분석을 통하여 10개의 직물 거동 지수 중 세탁 회전 속도 별로 유의미한 차이를 보이는 직물 거동 지수가 무엇인지 살펴보았다. 다음으로, 피어슨 상관분석을 통해 세척성과 유의미한 상관관계를 가지는 직물 거동 지수들을 추출하였다. 마지막으로, 추출된 거동 지수들과 세척성과의 선형 회귀분석을 실시하여 직물 거동 지수를 독립변수로 하고 세척성을 종속변수로 하는 회귀식을 도출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 직물 거동 분석의 조건

본격적인 직물 거동 분석에 앞서, 직물 거동 관찰을 위한 대표 부하량을 선정하고자 예비 실험을 하였다.

실험에 사용된 세탁기의 최대 용량(13kg)을 기준으로 4단계의 부하량, 25%(3.25kg), 50%(6.5kg), 75%(9.75kg), 100%(13kg)에 대해서 각각의 드럼 세탁기 내 거동 특성을 관찰하였다.

우선 46rpm 세탁 회전 속도의 운전 상태에서 각 부하량이 세탁기 내에서 차지하는 면적의 차이를 2차원적으로 살펴보았다. 그 결과는 그림 6에 나타냈는데, 각 부하량 별로 한 부분(phase)에서 초기 3회전(turns)에 대하여 세탁물 집합의 윤곽선을 1/8회전 간격으로 총 24프레임에서 추적하여 세탁물 집합의 면적을 산출한 뒤 그 평균값을 전체 세탁기 면적에 대한 비율로 나타내었다. 같은 방법으로 동일 방향으로 회전하는 두 부분(phase)에 대해서 추가 측정하여 총 세 부분(phase)의 값을 평균하였다. 젖은 상태의 세탁물은 그 부하량이 늘어날수록 세탁기 내에서 더 많은 면적을 차지하였다. 그러나 그림 6에서 볼 수 있듯이 큰 부하량(75%, 100%)에서는 부하량 증가에 따른 면적 증가 폭이 크지 않았다. 이는, 세탁물의 부하량이 늘어날수록 직물이 세탁기 내에서 자유롭게 움직일 수 있는 여유공간이 부족해졌음을 뜻한다.

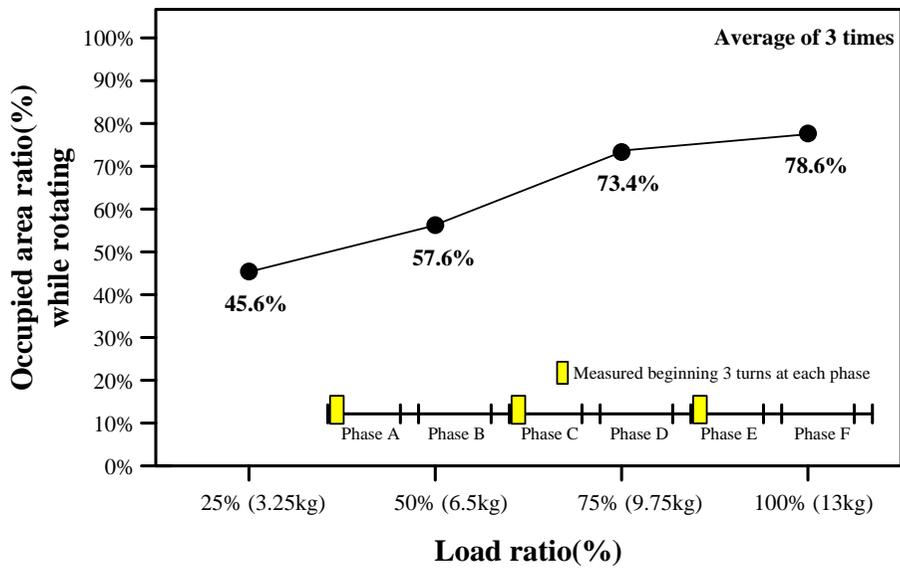


Figure 6. Occupied area ratio(%) in front-loading washer according to load ratio(%) at every beginning 3 turns of drum rotating.

세탁 회전 속도 46rpm 조건에서 각 부하량의 세탁기 내 거동 특성을 육안으로 관찰하였다. 25%(3.25kg) 부하량과 50%(6.5kg) 부하량에서는 직물 거동이 상당히 복잡하며 세탁물이 인접 직물과 서로 엉키고 부딪히는 등의 상호 작용이 지속적으로 일어남을 보았다. 실제 세탁 부하량에서는 Yun의 연구[5]에서 밝힌 슬라이딩, 낙하, 회전 거동 이외에 다양하고 복잡한 직물 거동이 나타났으며, 실제 세탁 부하량에서의 직물 거동을 설명함에 있어서 다른 직물과의 상호작용으로 인한 마찰이나 다른 직물의 중량에 의한 압축 효과 등이 세척성에 영향을 미치는 중요한 변수로 고려되어야 한다[24].

그러나, 75%(9.75kg) 부하량과 100%(13kg) 부하량에서는 오히려 직물의 거동이 단순해지고 획일화되는 것을 보았다. 이는 세탁물이 드럼 세탁기 내에서 자유롭게 움직일 수 있는 공간이 부족해짐에 따라 직물 거동이 제한되었기 때문인 것으로 사료된다[23]. 즉, 부하량이 일정 수준 이상으로 늘어나면 세탁기 내에서 개별적인 직물의 자유로운 움직임이 줄어들고, 직물이 집합적 단위로 뭉쳐서 움직이게 되어 단순하고 획일적인 거동 특성을 보였다.

본 연구에서는 직물 거동이 비교적 자유롭고 직물 간의 상호작용이 활발했던 두 가지 부하량 25%(3.25kg)과 50%(6.5kg)에 한하여, 세탁 시간 별로 각 세탁물이 세탁기 내에서 차지하는 면적의 변화를 관찰하였다. 16초 1부분(Phase)의 세탁 운전 시간 대 별로 초기 3회전(turns), 중기 3회전, 후기 3회전으로 나눈 뒤,

각각의 시간에서 한 회전 당 1/8회전 간격으로 세탁물 집합의 윤곽선을 추적하였다. 시간 대 별로 두 부하량의 세탁기 전체 면적에 대한 세탁물 면적 비율의 평균과 그 평균 값의 편차를 비교하였다. 그 결과 25%(3.25kg) 부하량의 시간대 별 면적 비율 평균은 57.17%, 편차는 11.40이였으며, 50%(6.5kg) 부하량의 시간대 별 면적 비율 평균은 72.3%, 편차는 1.80이었다. 앞서 관찰된 부하량 별 면적 비율 평균 값보다 시간 대 별 면적 평균 값이 크게 나온 이유는 초기 면적뿐 아니라 세탁물 집합이 충분히 흩어진 중기, 후기 면적 값이 포함되어 있었기 때문이다. 면적 비율의 편차 값을 살펴보면, 25%(3.25kg) 부하량에서 시간에 따른 세탁물 차지 면적의 변화가 50%(6.5kg)의 그것보다 더 컸음을 알 수 있다. 이는 25%(3.25kg) 부하량에서 직물 거동이 더 자유로웠음을 의미한다.

결과적으로, 25%(3.25kg)을 직물 거동 관찰을 위한 대표 부하량으로 선정하였다. 그 이유는 세탁 회전 속도가 달라짐에 따라서 25%(3.25kg) 부하량에서 가장 다양한 직물 거동이 유도될 것이라 판단하였기 때문이다. 다양한 거동 특성으로 인해 세척성의 차이가 나타날 것이며, 이를 통해 직물 거동이 세척성에 미치는 영향을 분석할 수 있을 것으로 예상하였다. 또한, 실제 세탁 부하량에서의 드럼 세탁기 내 직물 거동 분석에 대한 학술적 연구가 거의 전무하므로, 비교적 작은 부하량에서 거동 분석 연구를 시작하고 향후에 연구의 범위를 확대해나가는 것이 좋을 것이라 판단하였다.

직물 거동 관찰을 위한 대표 세탁 회전 속도로는 34rpm, 46rpm, 50rpm, 54rpm의 네 가지 세탁 회전 속도를 선정하였다. 30rpm부터 60rpm까지 2rpm의 간격으로 세탁 회전 속도를 변화시켜가며 세탁기 내 직물 거동을 육안으로 관찰한 결과, 위 네 가지 세탁 회전 속도에서 특징적인 직물 거동을 나타낼 것이라고 판단하였다.

2. 세탁 회전 속도에 따른 직물 거동

실제 세탁 부하량 조건에서는 세탁물이 서로 엉키고 간섭하여 여러 직물이 연결되어 집합적으로 거동한다. 그러므로, 직물 한 장의 거동을 살펴본 선행연구[5]와 달리, 세탁물의 집합적인 거동 특성을 살펴볼 필요가 있다. 또한, 세탁물이 집합적으로 움직인다고 하더라도, 그 안에서 나타나는 개별 직물의 거동은 복잡하고 상이하다. 실제 세탁 부하량에서 나타나는 직물의 개별 거동은 선행연구에서 정의한 슬라이딩, 낙하, 회전의 거동으로 설명되기에는 한계가 있으며, 따라서 실제 세탁 부하량에서의 개별적인 거동 특성을 새롭게 관찰하였다. 본 연구에서는 집합적 거동과 개별적 거동이라는 용어를 사용하였으며, 집합적 거동은 집합적 차원(macro dimension)에서 살펴본 세탁물 집합의 전체적 거동, 개별적 거동은 개별적 차원(micro dimension)에서 살펴본 한 장의 표지 직물 거동을 의미한다. 두 가지 거동 관찰의 차이는 아래 그림 7에 나타난 바와 같다.

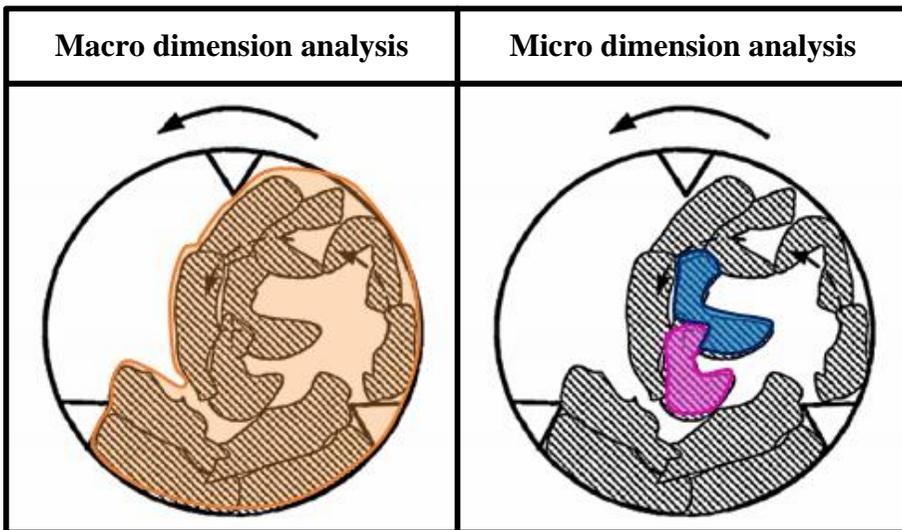


Figure 7. Two different viewpoints for fabric movement analysis

[23].

2.1. 집합적 거동

세탁기 내 직물 거동을 우선 집합적인 차원에서 살펴보았다.

세탁 회전 속도에 따라 세탁물의 집합이 세탁기 내에서 차지하는 면적을 비교 분석 하였다. 측정된 값은 모두 표 8에 나타냈는데, 세탁 회전 속도가 빨라질수록 직물이 세탁기 내에서 차지하는 면적의 평균값이 증가함을 알 수 있다. 또한, 세탁물이 차지하는 면적의 최소값 대비 최대값의 비율 값도 증가하였다. 이는 세탁 회전 속도가 빨라지면 원심력의 영향이 더 크게 작용하기 때문에 세탁물의 외곽에 위치한 직물이 드럼 벽에 붙어 움직이는 회전의 거동이 더 빈번하게 나타났기 때문이다. 그림 8은 각 조건 별로 한 부분(phase)에서 초기 3회전(turns)에 대하여 세탁물 집합의 윤곽선을 1/8회전 간격으로 총 24프레임에서 추적하여 집합적 거동을 시각화한 것이다. 앞서 관찰된 면적 변화가 그대로 반영되어 나타나는 것을 알 수 있다. 비교적 느린 세탁 회전 속도인 34rpm에서는 같은 양의 세탁물이 비교적 좁은 면적 내에서 움직이지만, 비교적 빠른 세탁 회전 속도(46rpm, 50rpm)에서는 세탁물이 비교적 넓은 면적에서 움직이며, 54rpm까지 세탁 회전 속도가 더 빨라졌을 때에는 원심력의 영향으로 회전의 거동이 더욱 빈번하게 나타남을 유추해 볼 수 있다.

Table 8. Occupied area(cm²) by laundry loads at each drum rotation speed

	34rpm	46rpm	50rpm	54rpm
Average occupied area(cm ²)	980	1199	1404	1442
Maximum value of occupied area / Minimum value of occupied area	1.39	1.63	1.81	1.97
Maximum value of occupied area(cm ²)	840	920	930	860
Minimum value of occupied area(cm ²)	1170	1500	1680	1690
Standard deviation of occupied area	88.7	118.2	79.9	106.0

Measured beginning 3 turns at each phase

Phase A Phase B Phase C Phase D Phase E

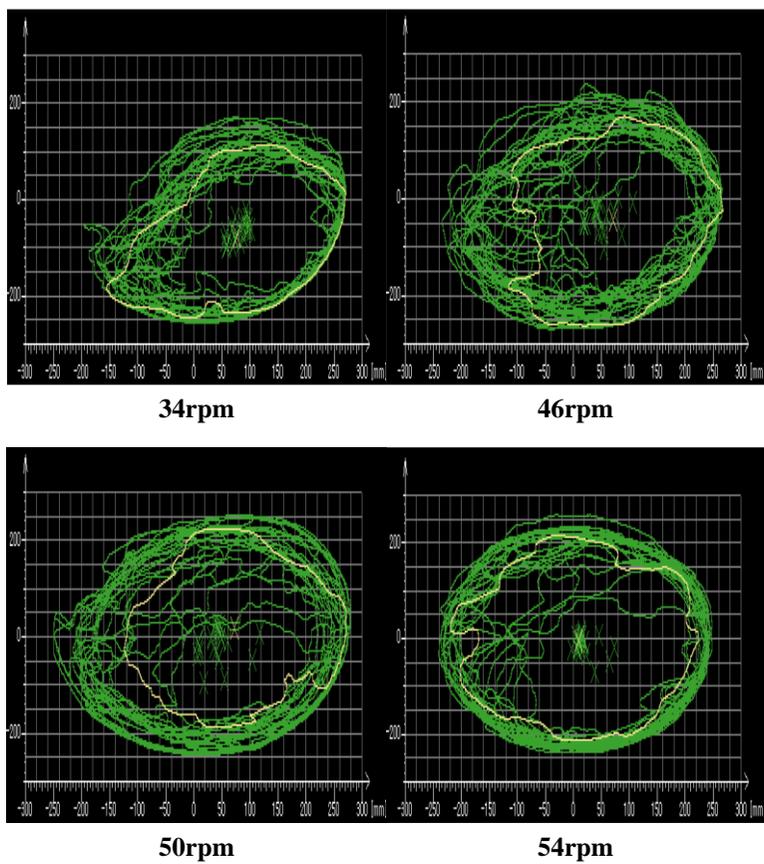


Figure 8. Visualized macro movement pattern at each rotation speed.

또한, 세탁물의 집합이 세탁기 내에서 차지하는 면적의 변화를 시간 별로 살펴보았다.

각 세탁 회전 속도 별 한 부분(phase)의 초반 3회의 회전에 대하여 1/8회전 간격으로 총 24회의 세탁기 내 차지 면적을 계산하였다.

결과는 그림 9와 같으며, 모든 세탁 회전 속도에서 초기 한 회전에서는 정지 상태에서 세탁물이 흩어지기 시작하기 때문에 세탁물 면적이 증가하는 양상을 보인다. 그러나 그 후부터는 세탁물 면적 값이 지속적으로 변화(variation)를 보이는 것을 보았다.

세탁물이 흩어지는 양상을 보이는 초기 1회전의 면적 값은 제외하고, 그 후 2회전의 면적 값에 대해서, 각 세탁 회전 속도 별로 차지 면적의 평균 값을 살펴보았다. 그 결과, 그림 9와 같이 세탁 회전 속도가 높아질수록 면적의 평균 값은 증가하였는데, 이는 세탁 회전 속도가 커질수록 세탁물이 더 멀리 흩어지고 있음을 의미한다.

각 세탁 회전 속도 별 세탁물 집합 면적의 평균 값의 차이로 알 수 있는 세탁물 움직임 반경의 차이는 각 세탁 회전 속도에서 나타나는 직물 거동 특성과 연관된다. 34rpm에서는 세탁물 집합 내에서의 복잡한 상호작용과 짧은 거리의 낙하 거동이 주로 나타났고, 46rpm에서는 34rpm보다 길어진 거리의 낙하 거동이 나타났으며, 50rpm, 54rpm으로 세탁회전속도가 빨라질수록 세탁물이 드럼 벽에 붙어 회전하는 거동이 더 빈번하게 나타났다.

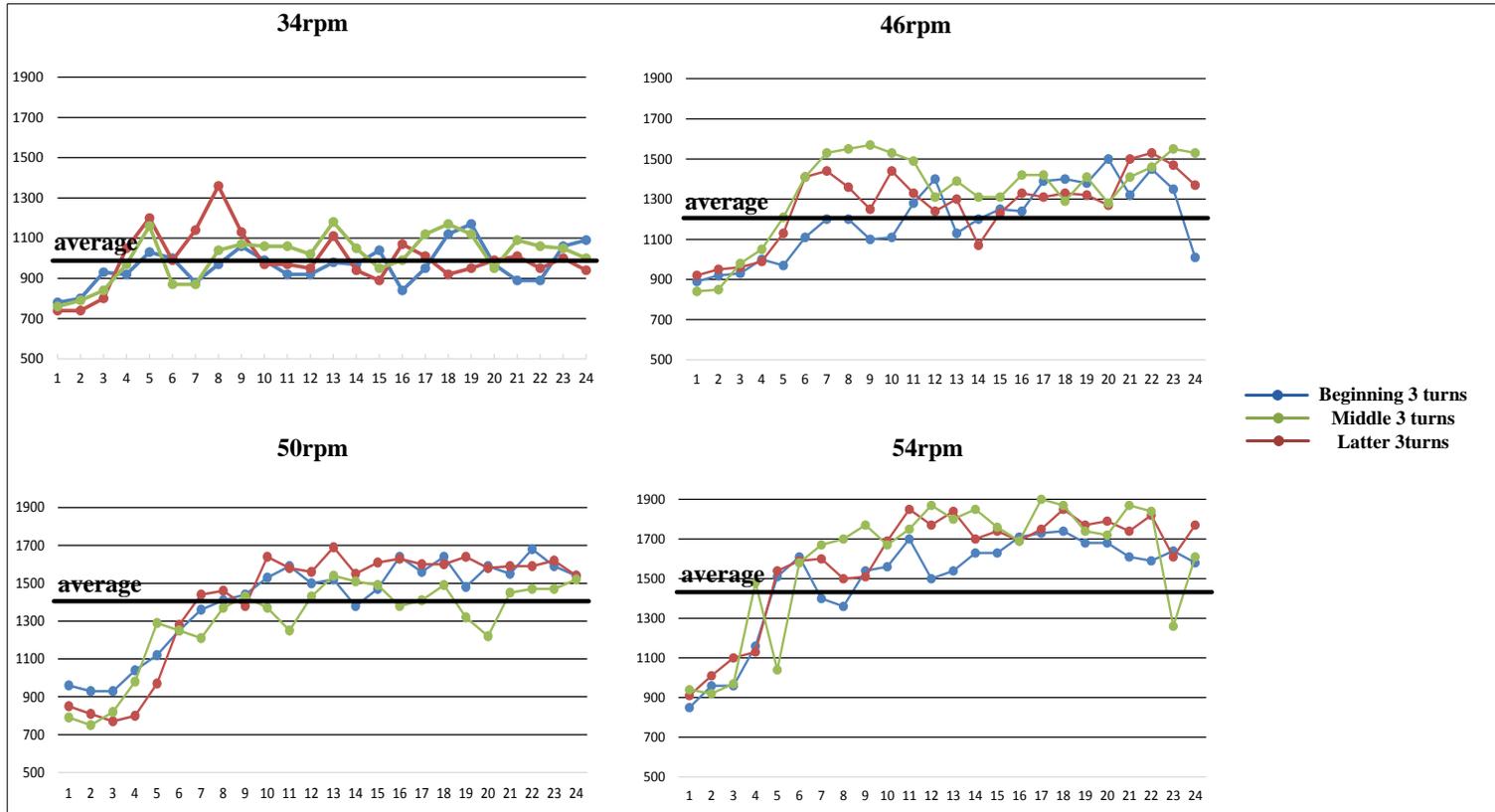


Figure 9. Occupied area(cm²) at each drum rotation speed.

2.2. 개별적 거동

다음으로, 세탁기 내 직물 거동을 개별적인 차원에서 살펴보았다.

파란 색으로 염색된 표지 직물을 투입하고, 표지 직물의 움직임을 육안으로 관찰하였다. 실제 세탁 부하량에서의 개별 직물의 거동은 매우 다양하고 복잡한 양상을 띠었다. 그러므로 선행연구[5]와 같이 뚜렷한 정의를 가진 거동으로 표현하기에는 한계가 있었다. 다만, 개별 직물은 모든 세탁 회전 속도에서 세탁물 집합의 중심에서 외곽을 오가는 순환적인 거동을 보임을 공통적으로 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 관찰되는 개별 직물의 거동을 간단하고 명확하게 표현하기 위하여 ‘표지 직물의 이동거리’와 ‘표지 직물의 모양’이라는 두 가지 파라미터를 이용하여 총 12가지의 거동으로 그림 10과 같이 분류하였다. 그림 10의 가장 왼쪽 표는 각 12가지의 개별 직물 거동의 모식도이고, 그림 10의 오른쪽 표는 각 거동을 객관적 정의를 이용하여 분류한 것인데, R은 행(row)을 의미하며, C는 열(column)을 의미한다. 그리고 12가지의 개별 거동을 Section으로 분류하고 $S_{rc}(r:row, c:column)$ 라고 명명하였다. 위 두 파라미터를 객관적으로 분류하기 위하여 ‘표지 직물의 이동거리’에는 tracer fabric position factor라는 분류 방법을 사용하였고, ‘표지 직물의 모양’에는 tracer fabric shape factor라는 분류 방법을 사용하였다. Tracer fabric position factor과 tracer fabric

shape factor의 개념과 산출 방법에 대한 설명은 부록 I에 나타내었다.

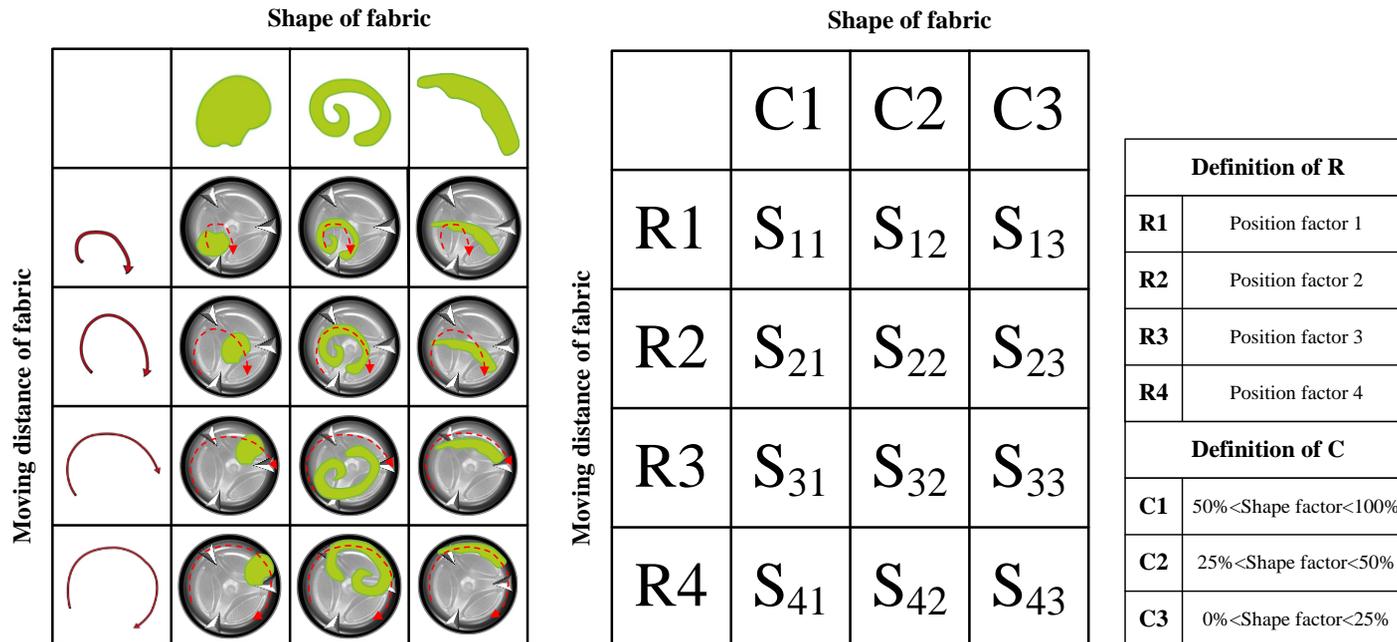


Figure 10. Classification of micro fabric movement.

TEMA motion 프로그램을 이용하여 각 세탁 회전 속도 별로 세 부분(phase)의 16초 운전 시간 동안 나타난 초반 3회전, 중반 3회전, 후반 3회전의 1/8회전 간격으로 총 216개의 프레임에서 표지 직물의 윤곽선을 추적하였다. 단, 개별 직물 거동 관찰의 경우 표지 직물이 다른 직물에 가려지거나 드럼 세탁기의 안쪽으로 깊이 들어가서 정면에서 보이지 않는 경우가 있었으며, 그러므로 216개의 모든 프레임에서 윤곽선 추적이 가능했던 것은 아니다. 추적된 윤곽선을 바탕으로, 표지 직물의 무게중심의 위치와 상하좌우 최외곽점의 위치를 산출하였고, 표지 직물의 면적을 계산하였다. 부록 I에 설명된 대로, 우선 각 프레임에 대해서 표지 직물의 위쪽 끝점의 위치를 기준으로 tracer fabric position factor를 구하였다. 다음으로, 표지 직물의 무게중심과 가장 먼 끝점과의 거리를 반지름으로 가지는 원의 면적 대비 표지 직물의 관찰된 실제 면적의 비율을 계산하여 tracer fabric shape factor를 산출하였다. 이렇게 구해진 tracer fabric position factor와 tracer fabric shape factor를 종합하여 세탁 회전 속도 별로 각 section에 나타나는 개별 거동의 빈도를 백분율로 나타내었다. 그림 11는 한 부분(phase)의 초기 3회전, 중반 3회전, 후반 3회전의 총 9회전의 개별 거동 빈도를 1회 측정 결과로 보고, 총 세 부분(phase)에 대해서 측정한 3회 측정 결과를 평균하여 나타낸 결과이다. 색깔이 진하게 표시된 거동일수록 그 출현빈도가 높음을 의미한다.

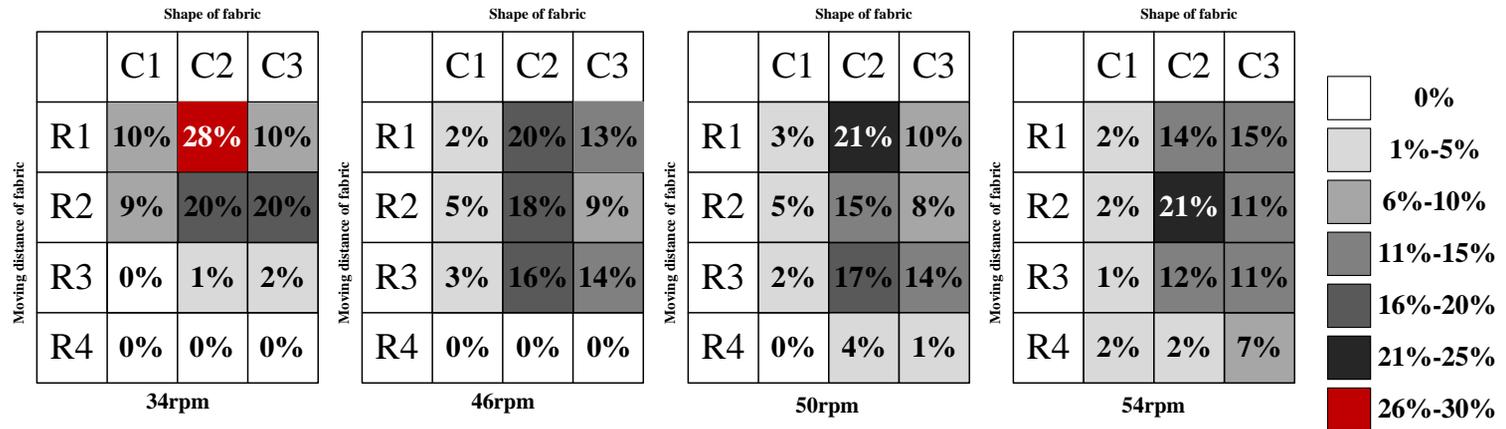


Figure 11. Appearance frequency of micro fabric movement at each drum rotation speed.

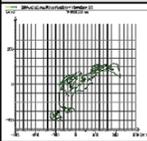
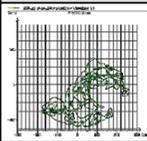
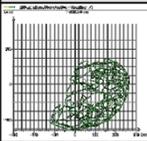
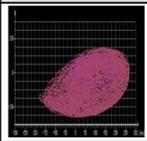
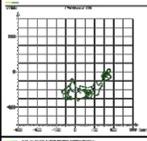
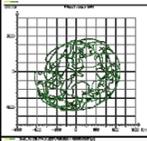
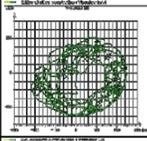
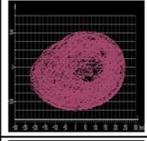
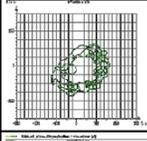
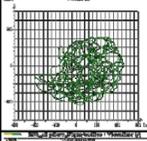
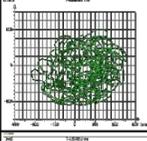
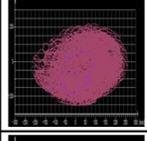
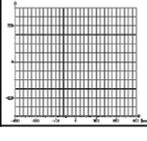
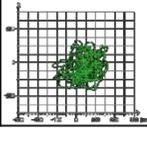
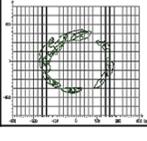
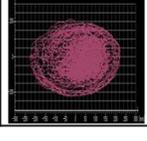
그림 11에 나타난 대로, 세탁 회전 속도 별로 각 거동의 출현 빈도에 차이를 보임을 확인하였으며, 각기 다른 거동 특성을 보이게 됨에 따라 세탁기 내에서 직물 간 상호 작용의 정도와 직물이 받는 기계력의 정도가 달라질 것이라고 예상하였다.

세탁 회전 속도가 빨라짐에 따라 S_{rc} 에서 $r+c$ 의 값이 큰 영역으로 직물 거동 출현 빈도가 증가하는 경향을 보였다. 즉, 세탁 회전 속도가 빨라질수록 직물의 이동 거리가 늘어나고, 펼쳐진 모양으로 거동하는 양상을 보였다. Lee[6]는 직물이 펼쳐지면 직물이 서로 연결되어 움직이고, 직물의 표면 마찰 면적이 넓어지기 때문에 직물 간 상호작용이 증가한다고 하였다. 그러므로 세탁 회전 속도가 빨라져서 직물이 펼쳐진 상태에서 운동하면 주변 직물과 영키는 등 직물 간 상호작용이 상대적으로 많이 나타날 것이라 예상하였다. 그러나 50rpm, 54rpm에서처럼 세탁 회전 속도가 일정 속도 이상으로 빨라지면 세탁물이 드럼 벽을 타고 움직이는 회전의 거동(R4)의 비율이 증가하는데, 이는 직물 간 상호작용과 기계력이 가장 약할 것이라고 예상되는 거동이다.

개별 직물의 거동도 시각화하였다. 표 9는 한 부분(phase)의 16초 운전 시간에 대해서 초기 3회전, 중기 3회전, 후기 3회전의 개별 직물 윤곽선을 추적하여 시각화 한 것이다. 앞서 관찰한 결과와 상응하는 이미지를 확인할 수 있다. 표 9에서 출현빈도(Appearance frequency)는 총 관찰 프레임 수 대비 관찰 가능했던 프레임 수의 비율을 뜻한다. 출현 빈도가 낮다는 것은 표지 직물이 다른 직물에

의해 가려지거나 드럼 세탁기의 깊이 방향으로 들어가 있음을 뜻한다. 직물이 서로 넓게 흩어져서 표지 직물의 관찰이 더 많이 가능한 경우보다 출현 빈도가 낮은 경우가 섞임과 마찰 등의 직물 간 상호작용의 영향을 더 많이 받을 것이라 예상된다. 즉, 시각적으로 봤을 때, 46rpm과 50rpm에서는 세탁회전수가 충분히 빨라짐에 따라 낙하와 같은 기계력이 큰 거동이 상대적으로 많이 나타나는 듯 보이지만 두 세탁회전속도에서 표지 직물의 출현 빈도를 비교해 보았을 때, 표지직물이 다른 직물에 가려지는 횟수가 많았던 46rpm에서 직물 간의 상호작용이 더 많을 것임을 추측할 수 있다. 또한 54rpm의 경우, 초기 3회전에서는 표지 직물이 아예 관찰되지 않았고, 중기 3회전에서는 드럼의 중심, 후기 3회전에서는 드럼의 외곽에서 집중적으로 관찰되었다. 이는 다른 세탁 회전 속도에서는 나타나지 않는 특이한 모습인데, 이는 54rpm에서는 원심력이 강하게 작용하여 직물의 위치 이동이 원활하지 않아 직물이 서로 섞이기 보다는 한 위치에 머무는 거동이 많았음을 의미한다.

Table 9. Visualized micro movement pattern at each rotation speed.

	Phase A-1	Phase A-2	Phase A-3	Total	Appearance frequency
34rpm					15.6/24
46rpm					15.4/24
50rpm					21.6/24
54rpm					13.6/24

3. 직물 거동이 세척성에 미치는 영향

3.1. 세탁회전속도에 따른 세척성과 세척의 균일성

각 세탁 회전 속도에 따른 세척성과 세척의 균일성을 평가하였고 결과는 그림 12, 그림 13과 같다. 34rpm과 46rpm에서 세척성이 높게 나타났으며, 50rpm과 54rpm에서 세척성이 상대적으로 낮게 나타났다. 그리고 세척의 균일성은 세탁 회전 속도 간에 유의한 차이를 보이지 않았다.

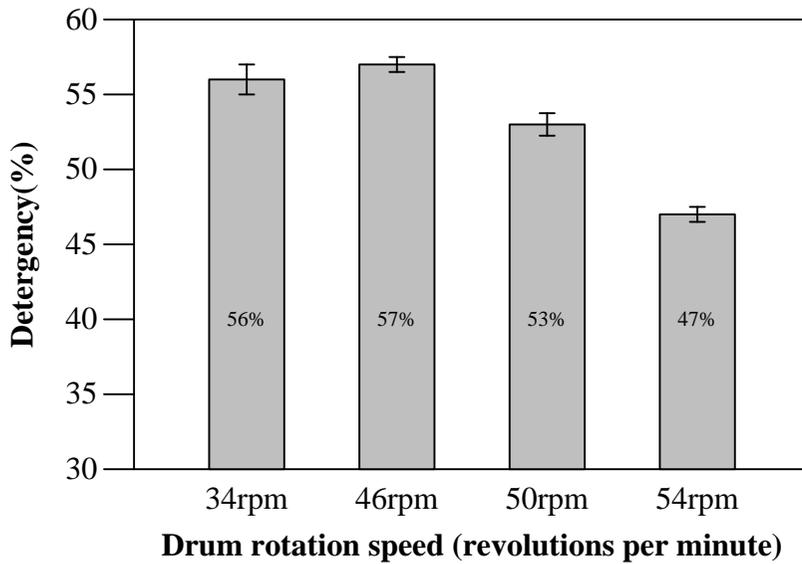


Figure 12. Detergency(%) at each drum rotation speed.

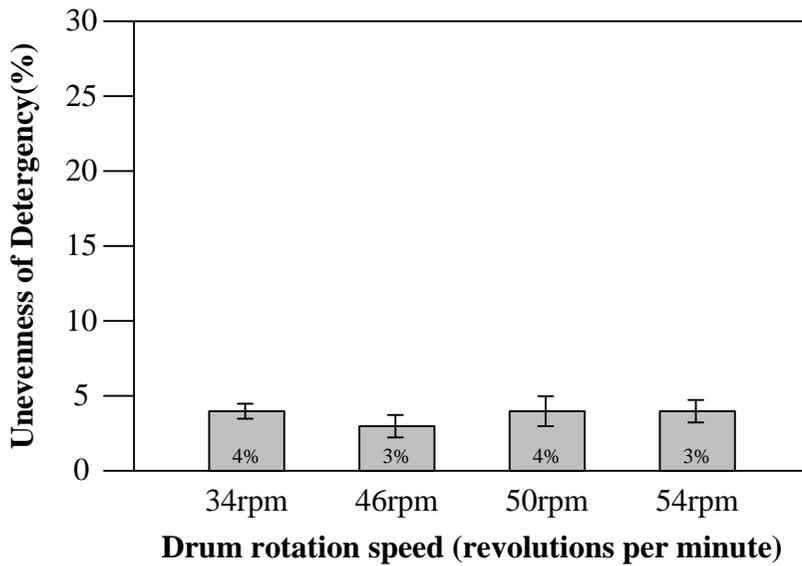


Figure 13. Unevenness of detergency(%) at each drum rotation speed.

앞서 관찰된 직물의 집합적 거동과 개별적 거동의 특성을 분석한 세척성 결과와 연관 지어 생각해보면, 34rpm의 경우 동일한 양의 세탁물이 좁은 운동 반경 내에서 움직이기 때문에 섞임, 마찰과 같은 직물 간의 상호작용이 활발하여 세척성이 좋은 것으로 생각된다. 이는 34rpm의 경우 표지 직물의 출현 빈도가 비교적 낮았던 데에서도 유추할 수 있다.

46rpm의 경우 기계력이 큰 낙하를 비롯하여 다양한 거동이 복합적으로 나타나고, 직물 간의 상호 작용이 상당하기 때문에 세척성이 높은 것으로 생각된다. 낙하의 거동이 많음은 개별 직물의 시각화된 그림을 통해 확인할 수 있으며, 직물 간 상호 작용이 많은 것은 표지 직물의 출현 빈도가 비교적 낮았던 데에서 추측할 수 있다.

반면, 50rpm에서는 세척성이 저하되었다. 개별 직물의 시각화된 그림을 볼 때, 50rpm에서도 46rpm과 마찬가지로 기계력이 큰 낙하와 같은 거동이 충분히 일어남을 알 수 있었다. 그러나 직물의 출현 빈도가 비교적 높은 것을 보아, 세탁물이 보다 넓은 반경으로 흩어지면서 섞임, 마찰을 비롯한 직물 간 상호작용이 줄어든 것으로 보인다.

마지막으로 54rpm에서의 세척성이 가장 낮았다. 54rpm에서는 세탁 회전 속도가 필요 이상으로 빨라지면서 세탁물 외곽 직물이 원심력의 영향을 받아 회전의 거동을 보였다. 즉, 세탁물이

세탁기에 의한 기계력의 영향과 직물 간의 상호작용에 노출될 기회가 적어졌기 때문에 세척에 있어서 불리했다고 사료된다.

즉, 실제 세탁 부하량에 있어서는 세탁기의 의한 기계력과 직물 간의 상호작용이 모두 활발히 일어날 때 세척성이 가장 높아짐을 알 수 있었다.

3.2. 직물 거동의 수치화

세탁물의 집합적 거동과 개별적 거동을 객관적으로 표현하기 위하여 각 거동 특성을 수치화된 데이터로 변환하여 이를 직물 거동 지수로 표현하였다. 수치화를 하는 방법은 우선적으로 윤창상의 연구[5]에서 사용된 방법 중에서 본 실험과 공통되는 5가지 방법들을 추출하였으며, 추가적으로 실제 세탁 부하량이라는 본 연구의 목적에 맞도록 새롭게 고안된 5가지 방법들을 함께 사용하였다.

수치화된 직물 거동 지수는 모두 세탁 과정 중에 직물이 드럼 세탁기 내에서 어떠한 경향을 가지고 움직이는지를 알 수 있는 값들이다. 본 연구에서 사용된 직물 거동 지수는 표 10에 나타난 바와 같다. 선행연구로부터 참고한 직물 거동 지수로는 표지 직물의 드럼중심으로부터의 거리, 표지 직물의 총 이동거리, 드럼과 표지 직물 간의 속도 차, 표지 직물의 둘레 길이, 표지 직물의 면적이 있다. 그 중, 표지 직물의 총 이동거리를 제외한 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리와 드럼과 표지 직물간의 속도 차, 표지 직물의 둘레 길이, 표지 직물의 면적에 대해서는 각각 평균 값뿐 아니라 편차 값도 함께 산출하였다. 이는 각 지수의 평균 값뿐 아니라 각 지수가 얼마나 다양하게 나타나는지를 나타내는 편차 값도 직물 거동 특성을 대변할 수 있기 때문이다. 또한, 집합적 거동과 개별적 거동의 두 가지 차원에서 실제 세탁 부하량의 직물 거동을

분석하고자 한 본 연구의 목적에 맞추어 고안된 직물 거동 지수로는 우선 집합적 거동 특성을 대변하는 지수로 세탁물 집합의 차지 면적, 세탁물 집합의 차지 면적 최대값/최소값이 있다. 세탁물 집합의 차지 면적은 평균과 편차 값을 모두 산출하였다. 또한, 개별적 거동 특성을 대변하는 지수로는 앞서 개별 거동 분류를 위한 방법으로 사용되었던 tracer fabric position factor, tracer fabric shape factor와 표지 직물의 출현 빈도가 있다. 각 거동 지수에 대한 개념과 산출 방법은 부록 I에 나타내었다.

Table 10. Fabric movement indexes

Fabric movement indexes	Definition	Dimension
1. Occupied area of laundry batch	Occupied area of laundry batch in a front-loading washer	Macro fabric movement
2. Maximum and minimum value ratio of occupied area of laundry batch	Ratio of maximum to minimum occupied area value of laundry batch in a front-loading washer	
3. Distance between the center of drum and tracer fabric [5]	Distance between the center of drum and the center of gravity of tracer fabric	Micro fabric movement
4. Speed difference between drum and tracer fabric [5]	Difference between drum rotating speed and tracer fabric moving speed	
5. Area of tracer fabric [5]	Observed area of tracer fabric	
6. Outline length of tracer fabric [5]	Observed outline length of tracer fabric	
7. Total moving distance of tracer fabric [5]	Sum of moving distance of tracer fabric per a turn of drum	
8. Appearance	Ratio of the number of observable frames	

frequency of tracer fabric	to the number of total observed frames	
9. Tracer fabric position factor	Positioned area of the highest point of tracer fabric according to the classified position of a front-loading washer	
10. Tracer fabric shape factor	Ratio of imaginary circle area to tracer fabric area. *imaginary circle: radius of the circle is the distance between the center of gravity of tracer fabric and the point which is the furthestmost point from the center of gravity of tracer fabric	

3.3. 직물거동지수와 세척성의 상관관계

앞서 도출된 직물 거동 지수가 세탁 회전 속도 별로 유의미한 차이를 가지는지 일원배치 분산분석을 통해 확인하고, 피어슨 상관분석으로 각 거동 지수와 세척성의 상관성 유무를 평가하였다. 마지막으로, 세척성과의 상관성이 통계적으로 유의미하다고 밝혀진 직물 거동 지수들을 바탕으로 선형 회귀 분석을 실시하여 중요 직물 거동 지수로 세척성을 설명할 수 있는 회귀식을 산출하였다.

일원배치 분산 분석 결과, 통계적으로 해석했을 때, 세탁 회전 속도 별로 유의미한 차이를 보이는 직물 거동 지수는 세탁물 집합 차지 면적의 평균($p < 0.0001$)과 편차($p < 0.0001$), 세탁물 집합 차지 면적의 최대값/최소값($p < 0.0001$), 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리의 평균($p = 0.018$)과 편차($p < 0.0001$), 표지 직물의 총 이동 거리($p = 0.019$), 드럼과 표지 직물 간의 속도 차($p < 0.0001$), 표지 직물 면적의 평균($p < 0.0001$)과 편차($p < 0.0001$), 표지 직물 둘레 길이의 평균($p < 0.0001$)과 편차($p = 0.001$), 표지 직물의 출현빈도($p < 0.0001$)였다. 이 거동 지수들은 모두 유의수준 $p < 0.05$ 이하에서 유의성을 가졌다. 반면, 앞서 개별 직물 거동을 분류하는 데 사용되었던 tracer fabric position factor와 tracer fabric shape factor는 세탁 회전 속도 별 차이가 다른 거동 지수에 비하여 미미하였다. 세탁 회전 속도 별 tracer fabric position factor와 tracer fabric shape factor의 경향성은 확인이 가능했지만, 그 차이가 통계적으로 유의미하게 해석될 만큼

뚜렷하지는 않았음을 알 수 있다.

세탁 회전 속도 별로 유의미한 차이가 검증된 총 8가지 직물 거동 지수에 대해서, 각 거동 지수와 세척성의 상관관계를 평가한 결과, 세탁물 집합 차지 면적의 평균과 편차, 세탁물 집합 차지 면적 최대값/최소값, 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리의 평균과 편차, 드럼과 표지 직물 간의 속도 차의 평균, 표지 직물 출현 빈도의 5가지 직물 거동 지수가 세척성과 유의미한 상관성을 보였으며, 상관분석 결과는 표 11과 같다.

Table 11. Correlation between each fabric movement index and detergency(%)

	Average of occupied area of laundry batch	Standard deviation of occupied area of laundry batch
Detergency Pearson correlation coefficient	-.786**	-.060
Significance probability	.000	.567
N	12	12
	Average of distance between the center of drum and tracer fabric	Standard deviation of between the center of drum and tracer fabric
Detergency Pearson correlation coefficient	-.307**	0.302*
Significance probability	.000	.003
N	108	108
	Maximum and minimum value ratio of occupied area of laundry batch	Total moving distance of tracer fabric
Detergency Pearson correlation coefficient	-.670**	.116
Significance probability	.000	.267
N	108	108
	Average of speed difference between drum and tracer fabric	Standard deviation of speed difference between drum and tracer fabric
Detergency Pearson correlation coefficient	-.254**	.093
Significance probability	0.014	.375
N	108	108
	Average of area of tracer fabric	Standard deviation of tracer fabric
Detergency Pearson correlation coefficient	-.052	.028
Significance probability	.622	.788
N	108	108
	Average of outline length of tracer fabric	Standard deviation of outline length of tracer fabric
Detergency Pearson correlation coefficient	-.078	.159
Significance probability	.458	.129
N	108	108
	Appearance frequency of tracer fabric	Position factor
Detergency Pearson correlation coefficient	-.456**	-.123
Significance probability	.000	.239
N	108	108
	Shape factor	
Detergency Pearson correlation coefficient	-.093	

Significance probability	.375	
N	108	

** . The correlation coefficient is significant at the p-value level of 0.01 (both sides).

* . The correlation coefficient is significant at the p-value level of 0.05 (both sides).

세척성과 유의미한 상관성을 가지는 직물 거동 지수들을 독립변수로 하여 세척성과의 회귀분석을 실시한 결과 식 (4)와 같은 회식이 얻어졌다. 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리의 평균, 표지 직물의 출현 빈도를 두 가지의 독립변수로 하여 종속변수인 세척성을 설명하는데, 회귀식의 유의 수준은 $P < 0.01$ 이었으며, R^2 값으로 본 회귀식의 설명력은 0.707이었다.

$$\text{Detergency}(\%) = -0.189x_1 - 0.027x_2 \quad (R^2=0.707) \dots [\text{Eq. 4}]$$

x_1 : average of distance between the center of drum and tracer fabric

x_2 : Appearance frequency of tracer fabric

식 (4)의 세척성 회귀식을 통하여, 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리의 평균, 표지 직물의 출현빈도가 작을수록 세척성에 유리한 것을 알 수 있다. 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리는 세탁기의 드럼 중심으로부터 직물의 무게 중심까지의 거리로, 값이 크다는 것은 세탁기의 드럼 벽에 가까운 움직임을 의미하고, 값이 작다는 것은 드럼 중앙 부분에서의 움직임을 의미한다[5]. 즉, 실제 세탁 부하량에서는 세탁물 집합이 드럼 벽까지 흩어지지 않고 비교적 좁은 반경에서 운동할 때 세척성이 높게 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 표지 직물의 출현 빈도가 낮을수록 세척성은 높았는데, 이는 출현 빈도가 낮을수록 세탁물 간의 상호작용이 활발하기 때문인 것으로 생각된다. 회귀식에서는 집합적 직물 거동 특성을 대변하는 거동

지수가 독립변수로 선택되지 않았고, 개별적 직물 거동 특성을 대변하는 거동 지수만이 독립변수로 선택되었다. 즉, 실제 세탁 부하량에서는 세탁물의 집합적 거동 특성보다 개별적 거동 특성이 세척성에 더 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 실제 세탁 부하량인 3.25kg 부하량 조건에서 드럼 세탁기 내 직물 거동을 분석하고 직물 거동 특성에 따른 세척성의 차이를 알아보려고 하였으며, 이를 위해 직물 거동을 직물 거동 지수로 수치화하고 각 지수의 유의성과 세척성의 상관성을 평가하였다. 연구의 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 세탁 부하량에 따른 거동 특성을 관찰한 결과, 세탁 부하량이 일정 수준 이상으로 증가하면 오히려 직물의 거동이 단순해지고 획일화됨을 보았으며, 이는 세탁물이 드럼 세탁기 내에서 자유롭게 움직일 수 있는 공간이 부족해짐에 따라 직물 거동이 제한되었기 때문인 것으로 사료된다.
2. 집합적 직물 거동을 분석한 결과, 세탁 회전 속도가 빨라질수록 세탁물이 차지하는 면적이 증가하였다. 그에 따라 세탁 회전 속도가 빨라질수록 세탁물이 차지하는 면적의 최소값 대비 최대값의 비율 또한 증가하였다. 이는 세탁 회전 속도가 빨라질수록 원심력에 의해 세탁물의 외곽에 위치한 직물이 회전의 거동을 빈번하게 하고 있다는 것을 의미한다.
3. 개별적 직물 거동을 분석한 결과, 드럼 세탁기 내 직물의 개별

거동은 12가지로 분류할 수 있었으며, 세탁 회전 속도 별로 거동 양상의 차이와 직물 간 상호작용의 정도를 비교할 수 있었다. 각 세탁 회전 속도에서 각기 다른 거동 특성을 보이게 됨에 따라 세탁기 내에서 직물이 받는 기계력과 직물 간 상호작용의 정도가 달라질 것이라고 사료된다.

4. 각 세탁 회전 속도에 따른 세척성과 세척의 균일성을 평가한 결과, 34rpm과 46rpm에서 세척성이 높게 나타났으며, 50rpm과 54rpm에서 세척성이 상대적으로 낮게 나타났다. 세척성이 가장 높았던 46rpm의 경우에는, 기계력이 큰 낙하를 비롯하여 다양한 거동이 복합적으로 나타났으며, 표지 직물의 출현 빈도가 낮은 것으로 보아 섞임, 마찰을 비롯한 직물 간의 상호작용이 상당한 것으로 사료된다. 반면에, 세척의 균일성은 세탁 회전 속도 간에 유의한 차이를 보이지 않았다.
5. 수치화된 직물 거동과 세척성과의 상관성을 평가한 결과, 실제 세탁 부하량에서 세척성에 영향을 미치는 주요 직물 거동 특성으로 세탁물 집합의 차지 면적 최대값/최소값, 세탁물 집합의 차지 면적 평균과 편차, 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리의 평균과 편차, 드럼과 표지 직물 간 속도 차의 평균, 표지 직물의 출현 빈도가 산출되었다. 종속변수인 세척성에 대하여 표지 직물의 드럼

중심으로부터의 거리의 평균, 표지 직물의 출현빈도의 두 가지 직물 거동 지수를 독립변수로 하는 회귀식을 얻을 수 있었다. 즉, 세탁물의 집합적 거동보다 개별적 거동이 세척성에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과를 통하여, 세탁 회전 속도 조절에 의해서 유도된 서로 다른 직물 거동은 마찰, 섞임과 같은 직물 간의 상호작용과 세탁물에 가해지는 기계력의 차이를 야기하여 세척성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 실제 세탁 부하량의 직물을 투입하면 기본적으로 직물 사이의 상호작용이 향상되어 직물 간의 상호작용의 정도가 세척성을 설명하는 데 중요한 요소가 된다. 그러나 세탁 회전 속도가 필요 이상으로 빨라지면 오히려 직물이 서로 간의 상호작용과 세탁기에 의한 기계력에 노출될 기회가 적어짐으로써 세척성이 저하된다. 즉, 실제 세탁 부하량에서는 낙하와 같은 기계력이 큰 거동과 함께 직물 간의 표면 마찰, 섞임과 같은 직물 상호작용의 기회를 충분히 제공해야 세척성을 향상시킬 수 있다.

V. 참고 문헌

1. 김성련, “세제와 세탁의 과학” (제3판), 파주: 교문사, 2013, p.129.
2. G. Jakobi and A. Lohr, “*Detergents and textile washing: Principles and practices*”, Weinheim: VCH, 1987, p.7.
3. K. L. Ganguli and J. V. Eendenburg, “Mass transfer in a laboratory washing machine”, *Textile Research Journal*, vol.50(7), pp.428-432, 1980.
4. 김성련, 이정숙, 정혜원, 강인숙, 박정희, “새의류관리”, 파주: 교문사, p.158, 2008.
5. C. Yun and C. H. Park, “The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading water II; under various physical washing conditions” *Textile Research Journal*, vol.85(3), pp.251-261, 2015.
6. 이아진, “드럼형 세탁 프로세스에서의 직물의 동역학적 거동”, 석사학위논문, 건국대학교 섬유공학과, 서울, 대한민국, 2008.
7. E. Kissa, “Kinetics and mechanisms of detergency-part I: Liquid hydrophobic (oily) soils”, *Textile Research Journal*, vol.45(10), pp.736-741, 1975.
8. A. Lee, M. Seo, S. Yang, J. Koh and H. Kim, “The effects of mechanical actions on washing efficiency”, *Fibers and Polymers*, vol.9(1), pp.101-106, 2008.
9. 양승도, “오염직물의 동역학적 세탁거동에 관한 연구”,

박사학위논문, 건국대학교 섬유공학과, 서울, 대한민국, 2007.

10. M. Ruben and B. Serafim, "Washing simulator rig to study the effect of abrasion on the removal of soils from fabrics", *Tribology Letter*, vol.52, pp.175-183, 2013.

11. A. P. Balt, L. D. M. Brekel, C. Vandecasteele and Z. Kolar, "Radiotracer study of wash load movement in a drum-type fabric washing machine using a gamma camera", *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*, vol.38(1), pp.7-12, 1987.

12. C. M. Namara, A. Gabriele, C. Amador and S. Bakalis, "Dynamics of textile motion in a front-loading domestic washing machine", *Chemical Engineering Science*, vol.75(18), pp.14-27, 2012.

13. S. Park, C. Yun, J. Kim and C. H. Park, "The effects of the fabric properties on fabric movement and the prediction of the fabric movements in a front-loading washer", *Textile Research Journal*, vol.83(11), pp.1201-1212, 2013.

14. C. Yun, S. Park and C. H. Park, "The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer", *Textile Research Journal*, vol.83(17), pp.1786-1795, 2013.

15. W. P. Utermohlen, Jr., E. L. Wallace, "Detergency studies I, II, III", *Textile Research Journal*, vol.17(12), pp.670-688, 1947.

16. W. P. Utermohlen, Jr., E. K. Fischer, M. E. Ryan and G. H.

Campbell, “Detergency studies IV: Influence of oily soil upon the removal of pigment soil”, *Textile Research Journal*, vol.19(8), pp.489-496, 1949.

17. J. J. Webb and S. K. Obendorf, “Detergency study: Comparison of the distribution of natural residual soils after laundering with a variety of detergent products”, *Textile Research Journal*, vol.57(11), pp.640-646, 1987.

18. Y. Tagawa and K. Gotoh, “Removal of carbon black particles from polymer substrates in water/ethanol mixture”, *Journal of Oleo Science*, vol.59(2), pp.109-112, 2010.

19. R. M. Prieto and S. Bakalis, “Methodological study on the removal of solid oil and fat stains from cotton fabrics using abrasion”, *Textile Research Journal*, online-published; June/13/2013, doi: 10.1177/0040517513490059.

20. L. Cohen, A. Moreno and J. L. Berna, “Influence of calcium concentration in the washing liquor on detergency performance of linear alkylbenzene sulfonate”, *Journal of the American Oil Chemist's Society*, vol.70(1), pp.79-82, 1993.

21. 윤창상, “드럼 세탁기 내 직물 거동과 세척성”, 박사학위논문, 서울대학교 의류학과, 서울, 대한민국, 2013.

22. IEC 60456, “*Clothing washing machines for household use-Methods for measuring the performance*”, Edition 5.0, 2010.

23. I. Schulze. "Washing and rinsing method for a washing machine", *United States Patent*, US 8,220,092 B2, Jul.17, 2012.
24. "Laundry Sustainability", *Leonardo da Vinci Project*. from <http://www.laundry-sustainability.eu>, Retrieved January 02, 2015

부 록 I. 직물 거동 지수

집합적 및 개별적 직물 거동 특성을 수치화하기 위하여 10가지의 직물 거동 지수를 이용하였다. 각 거동 지수의 정의와 산출 방법을 설명하면 아래와 같다.

1. 세탁물 집합의 차지 면적

집합적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 세탁물 집합의 2차원적인 면적을 의미한다. 세탁물 집합의 윤곽선을 TEMA motion 프로그램을 이용하여 추적하여 면적을 산출하였다.

2. 세탁물 집합의 차지 면적 최대값/최소값

집합적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 16초 운전의 한 부분(phase)에서 초기 3회전(turns)의 세탁물 집합의 차지 면적을 1/8회전 간격으로 총 24회 관찰하였을 때, 그 중 최대값을 최소값으로 나눈 값을 의미한다.

3. 표지 직물의 드럼 중심으로부터의 거리 [5]

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 드럼 중심으로부터 표지 직물의 무게 중심까지의 거리를 의미한다. 표지 직물의 무게 중심은 관찰된 만큼의 표지 직물의 윤곽선을

추적하였을 때 상하 좌우 연결선의 교차되는 지점으로 보았다.

4. 드럼과 표지 직물 간의 속도 차 [5]

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 드럼의 회전 속도와 표지 직물의 움직임 속도의 차이를 의미한다. 본 연구에 사용된 세탁 회전 속도는 34rpm, 46rpm, 50rpm, 54rpm 이고, 드럼의 반경은 27.5cm 로 식 (5)를 이용하여 계산한 세탁기의 회전 속도는 각각 98cm/s, 132cm/s, 144cm/s, 155cm/s 이다. 또한 표지 직물의 속도는 표지 직물 무게 중심의 이동거리를 시간으로 나누어 구할 수 있다.

$$\text{drum rotating speed} = \frac{2\pi \times \text{radius of drum}(cm) \times \text{rpm}}{\text{time}(seconds)} \dots [\text{Eq. 5}]$$

5. 표지 직물의 면적 [5]

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 관찰된 만큼의 표지 직물의 윤곽선에 의해 결정되는 2차원적인 면적을 의미한다. 표지 직물의 윤곽선을 TEMA motion 프로그램을 이용하여 추적하여 면적을 산출하였다.

6. 표지 직물의 둘레 길이 [5]

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 관찰된 만큼의 표지 직물의 윤곽선에 의해 결정되는 둘레 길이를 의미한다. 표지 직물의 윤곽선을 TEMA motion 프로그램을 이용하여 추적하여 둘레 길이를 산출하였다.

7. 표지 직물의 총 이동거리 [5]

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 드럼의 한 회전(turn) 동안 표지 직물의 무게중심이 움직인 궤적의 총합을 의미한다.

8. 표지 직물의 출현 빈도

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 총 관찰한 프레임의 개수 대비 표지 직물의 관찰이 가능했던 프레임의 개수의 비율을 의미한다. 실제 세탁 부하량에서는 다른 직물에 의해 표지 직물이 가려지는 경우가 있어 이를 반영할 수 있는 직물 거동 지수를 산출하였고, 표지 직물의 출현 빈도가 낮을수록 다른 직물과의 섞임과 마찰과 같은 상호작용이 활발한 것으로 해석하였다.

9. Tracer fabric position factor

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, 그림 14와 같이 분류된 드럼 세탁기 내 영역에 대해서 표지 직물의 가장 위 끝 점의 위치를 의미한다. 이는 표지 직물의 이동 거리를 설명할 수 있는 방법으로, A영역에서 표지 직물의 위 끝 점이 발견되는 경우보다 D영역에서 표지 직물의 위 끝점이 발견되는 경우에 표지 직물의 이동거리가 더 길다고 보았다. 그림 14에서 각 영역의 구분이 되는 2,3번의 선은 각 세탁 회전 속도에서 표지 직물의 거동을 시각화하여 누적하였을 때 나타나는 최외곽 선을 나타낸다. 2번은 34rpm에서의 표지 직물 거동 최외곽 선을, 3번은 46rpm과 50rpm에서의 표지 직물 거동 최외곽 선을 최대한 반영하여 나타내었다. 단, 1번 선은 34rpm에서 세탁물 집합의 최외곽을 움직이는 표지 직물의 윤곽선의 안쪽 선을 추적한 것이다. 이는 세탁물 집합의 외곽뿐 아니라 세탁물 집합의 안쪽에 표지 직물이 위치하는 경우를 반영하기 위하여 생성하였다. 아래와 같이 구분된 영역으로 위치를 파악하면 각 세탁 회전 속도 별로 표지 직물이 위치하는 영역 빈도의 차이를 객관적으로 구분할 수 있다. 각 선의 다항차수 식은 아래 그림 14의 오른쪽 하단에 나타난 바와 같이 나타난다. 2차원의 좌표 평면에서 각 1,2,3번 선의 다항차수 식으로 나뉜 영역과 표지 직물 위 끝 점의 좌표를 나타내어 표지 직물의 위치를 파악할 수 있다.

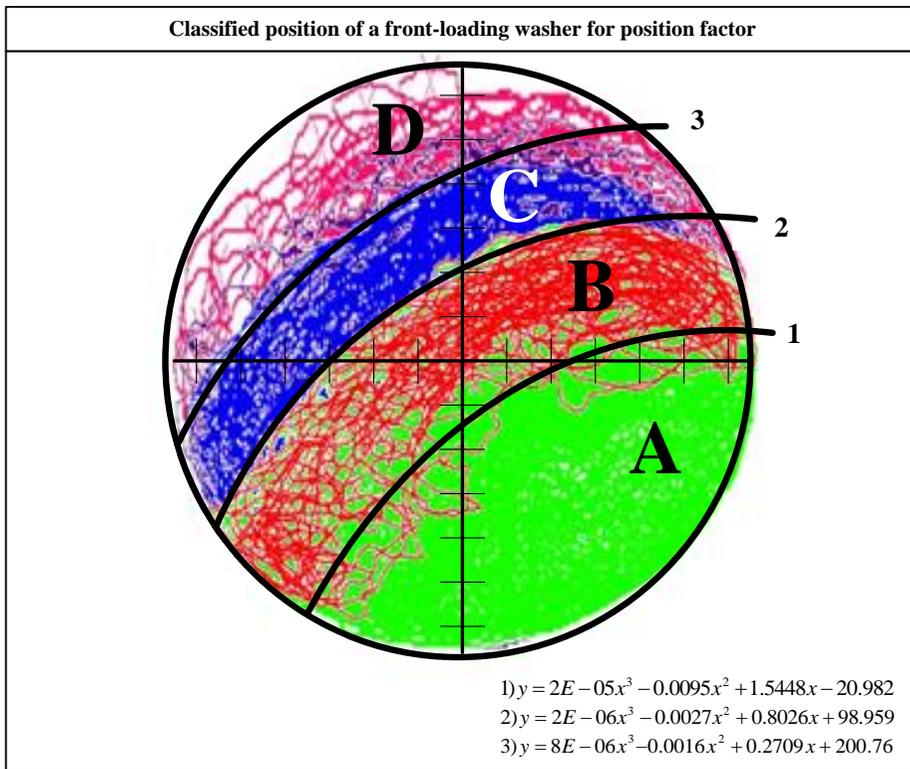


Figure 14. Classified position of a front-loading washer

10. Tracer fabric shape factor

개별적 거동 특성을 반영하는 직물 거동 지수로, '표지 직물의 모양'을 객관적으로 나타낸다. 산출방법은 실제 표지 직물의 면적을 직물의 네 가지 끝점(위쪽, 오른쪽, 왼쪽, 아래쪽)과 표지 직물 무게 중심 사이의 거리 중에서 가장 긴 거리의 값을 반지름으로 하는 원의 넓이로 나누어 구한다. 그림 15에 나타난 바와 같이 만약 표지 직물이 뭉쳐있다면 shape factor 값은 비교적 크고 그 값이 1에 가까울 것이며, 표지 직물이 많이 펼쳐져 있을수록 shape factor 값은 비교적 작고 그 값이 0에 가까워질 것이다.

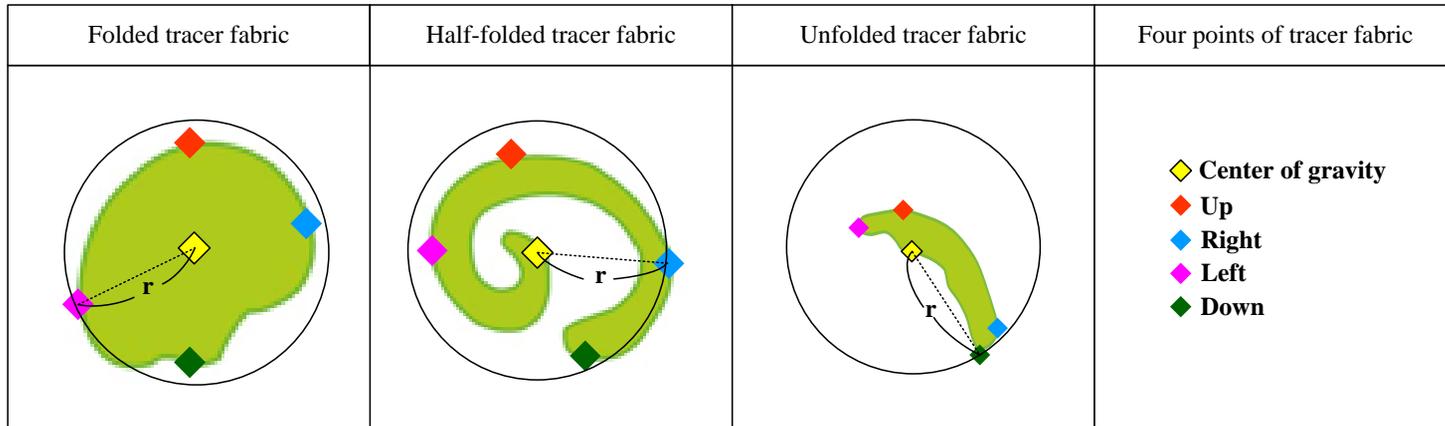


Figure 15. Calculating shape factor for various tracer fabric shapes.

Abstract

Fabric movement analysis of 3.25kg laundry load in a front-loading washer

Yoonkyung Cho

Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design

The Graduate School

Seoul National University

Fabric movements in a front-loading washer were analyzed and the correlation between fabric movements and detergency was investigated.

With 3.25kg laundry load, 25% of maximum load, various fabric movements were induced with different drum rotating speed. Fabric movements were observed by macro and micro dimension and they were digitized and visualized. Finally, the influence of fabric movements on detergency was investigated.

As for the macro fabric movements, the occupied area ratios by laundry loads in the washer were varied according to the drum rotating speed. As for the micro fabric movements, the movements

of tracer fabric were divided into 12 movements. The tendency of micro fabric movements as well as the degree of interactions between fabrics at each rotating speed were investigated. The characteristics of macro and micro fabric movement also influenced on detergency and resulted in the maximum detergency at 46rpm.

Among ten fabric movement indexes, five indexes (occupied area of laundry batch, maximum and minimum value ratio of occupied area of laundry batch, distance between the center of drum and tracer fabric, speed difference between drum and tracer fabric, appearance frequency of tracer fabric) came out to have a statistically significant correlation with detergency. Also, a regression equation of detergency was obtained with R^2 value of 0.707 and p-value below 0.01. The two independent variables of the regression equation were 'average value of distance between center of the drum and tracer fabric' and 'appearance frequency of tracer fabric', with an inverse correlation with detergency.

Therefore, it was concluded that not only mechanical force like falling movement but also interactions between fabrics like abrasion and mixing were needed to improve detergency for practical laundry loads.

Keywords: front-loading washer, practical laundry loads, fabric

movement, mechanical action, detergency

Student number: 2013-21522