creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

Disclaimer

dCollection

의류학석사 학위 논문

직물특성이 세탁 시 섬유 방출량과 해수 중 생분해성에 미치는 영향

2021년 02월

서울대학교 대학원

의류학과

김서연

직물특성이 세탁 시 섬유 방출량과 해수 중 생분해성에 미치는 영향

지도 교수 박 정 희

이 논문을 의류학석사 학위논문으로 제출함

2021년 1월

서울대학교 대학원

의류학과

김 서 연

김서연의 의류학석사 학위논문을 인준함

2021년 1월

위 원 장 김 성 민

부위원장 김 주 연

위 원 박 정 희

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. 실험 ····· 8

1. 시료 및 시약 ····· 8

2. 실험 방법 ····· 10

2.1. 섬유 방출량 측정 ····· 10

2.2. 직물의 물리적 특성 평가 ····· 14

2.2.1. 강경도 ····· 14

2.2.2. Fuzziness ····· 15

2.2.3. 마모강도 ····· 16

2.2.4. 흡수성 ····· 17

2.3. 생분해성 평가 ····· 18

2.3.1. 인장강도 감소율 ····· 18

2.3.2. Biological oxygen demand ····· 20

Ⅲ. 결과 및 고찰 ····· 22

1. 직물 특성이 세탁 시 섬유 방출에 미치는 영향 ····· 22

1.1. 직물의 기하학적 구조에 따른 섬유 방출 ····· 22

1.1.1 세탁 횟수에 따른 방출량 ····· 22

1.1.2 총 방출량 ····· 24

1.1.3 배수구로 방출된 섬유 길이 ····· 26

1.1.4. 세탁기 여과량 및 배수구 방출량 비율 ····· 28

1.2. 염색/발수가공/기모가공에 따른 섬유 방출 ····· 29

1.2.1 세탁 횟수에 따른 방출량 ····· 29

1.2.2 총 방출량 ····· 31

1.2.3 배수구로 방출된 섬유 길이 ····· 33

1.2.4 세탁기 여과량 및 배수구 방출량 비율 ····· 34

1.3. 섬유 방출량에 영향을 미치는 직물 특성 ····· 36

1.3.1. 직물의 구조인자와 섬유 방출 간의 상관관계 ····· 36

1.3.2. 구조인자와 가공 여부에 따른 직물 물성과 섬유 방출 간의 상관관계 ····· 42

2. 방출된 섬유의 생분해성 ····· 46
2.1 방출 환경에 따른 생분해성 ····· 46
2.2 직물 종류에 따른 해수 중 생분해성 ····· 50

Ⅳ. 결론 및 제언 ····· 53

참고 문헌

Abstract

List of Tables

Table 1. Specification of specimens. ····· 9
Table 2. Calculate fabric structural factors of the specimens. ····· 38
Table 3. Stiffness of cloth, fuzziness, abrasion resistance, wicking height of the specinmens. ····· 43
Table 4. Correlation between total amount of fiber emissions and fabric properties of all specimens. ····· 46

List of Figures

Figure 1. Mechanism of fuzz formation and fiber breakage. ····· 4
Figure 2. Schematic diagram of the structure of a typical textile and its dual porosity due to spaces between yarns and spaces between fibers of the yarns. ····· 5
Figure 3. The deflection of the yarns and fabric due to the mechanical action of the washing machine. ····· 5
Figure 4. Appearance and weave structure of the fabrics. ····· 10
Figure 5. Photographic image of washing machine(Samsung WA10F5S2QWW1). ····· 12
Figure 6. Protocol of standard washing process. ····· 12
Figure 7. Process of filteration of the fibers sieved through the washer or the released fibers. ····· 14
Figure 8. Photographic image and measuring process of L&W Fiber Tester. ····· 14
Figure 9. Cantilever method. ····· 15
Figure 10. Tissue softness analyzer measurement images. ····· 16
Figure 11. Diagrammatic representation of the fabric wicking test apparatus. ····· 18
Figure 12. Image of Oxi-Top®BOD Respirometer System(Global Water Instrumentation). ····· 21
Figure 13. Total amount of fibers after 10 repeated cycles of washing. ····· 23
Figure 14. Ratio of the amount of fibers released by 1st washing to the total amount released during 10 washing cycles. ····· 23
Figure 15. Effect of fabric structural characteristics on the amount of fibers released from 1st wash cycle and on the total amount of fibers during10 cycles of washing. ····· 25
Figure 16. Fiber length distribution (a) Filtered by washing machine, (b) Released through the drain. ····· 27

Figure 17. Fiber length(mm) and width(μm) of each specimen. ····· 27
Figure 18. Proportion of amount of fibers released through the drain and the fiber amount filtered by washing machine and length of released fibers. ····· 28
Figure 19. Total mass of fibers after 10 repeated cycles of washing. ····· 30
Figure 20. The ratio of the amount of the released fibers from the first washing to the total amount of fibers released during 10 washing cycles. ····· 30
Figure 21. Effect of finishes on the amount of fibers released by 1st washing cycle and total amount accumulated during 10 washing cycles. ····· 31
Figure 22. Fiber length(mm) and width(μm) of each specimen. ····· 33
Figure 23. Proportions of the amount of fibers released through the drain and the amount filtered by washing machine and length of released fibers. ····· 35
Figure 24. One repeating unit of plain weave. ····· 38
Figure 25. Amount of the released fibers and their length vs. geometrical parameters of the specimen. ····· 40
Figure 26. Correlation between the amount of the released fibers or their length and weave parameter. ····· 41
Figure 27. Correlation between total amount of fiber emissions and fabric properties of the specimens. ····· 44
Figure 28. Biodegradability of the untreated cotton fabric (30Ne 130×68 twill) in different environmental conditions. ····· 49
Figure 29. Biodegradability of the fibers released from untreated cotton fabric(30Ne 130×68 twill) in the sea water. ····· 50
Figure 30. Biodegradability in 20℃ seawater of the specimens untreated, dyed, and water-repellent finished after dyed. ····· 54

Ⅰ. 서 론

최근 해양오염 문제로 이슈가 되고 있는 미세플라스틱은 크기가 1μm 이상 5mm이하인 플라스틱으로, 표면적이 넓어 유해 화학물질을 잘 흡수하고 해양 플랑크톤이나 해양생물 같은 먹이사슬을 통해 유해화학물질을 이동시키며, 체내에서 유독 물질을 방출하여 심뇌혈관계, 내분비계, 생식계 등에 유해한 영향을 줄 수 있다.[1] 세계자연보전연맹에 따르면, 전세계적으로 연간 방출되는 미세플라스틱은 0.8~2.5Mt에 이르며, 이중 35%는 의류를 세탁하는 과정에서 발생한다.[2]

세탁에 의한 섬유의 방출은 세탁기의 기계적 작용에 의해 Fig 1과 같이 실 표면의 섬유들이 탈락하면서 방출되게 되며, 이에 영향을 미치는 요인으로는 섬유의 종류, 실과 직물의 구조, 가공, 세탁 조건 등이 있다[3]. 선행연구에 따르면, 세제 첨가에 의해 섬유의 배출이 1.2~5.6배 증가되었다는 보고가 있으며[4], 세제의 종류에 따라서는 분말 세제보다 액체 세제에서 더 많은 양의 섬유가 배출되었다[5]. 세탁 온도의 경우, 30℃에서보다 60℃에서 세탁했을 때 더 많은 섬유가 방출되었으며[4], 세탁기의 종류에 따른 방출량의 경우, 드럼 세탁기에서보다 더 강한 기계력을 가지는 임펠러식 세탁기에서 방출량이 더 많은 경향을 보였다[5].

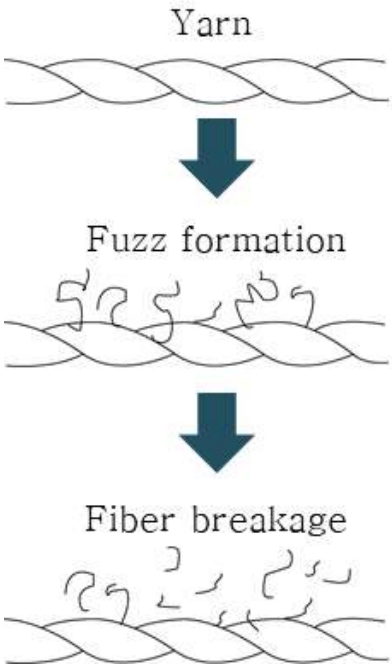


Fig 1. Mechanism of fuzz formation and fiber breakage.

한편, 세탁 중 섬유의 탈락은 직물의 물리적 변형이나 직물 간 마찰 및 간섭을 일으켜 오구를 세탁물에서 분리시키는 세탁기의 기계적 작용에 의한 불용성 고형오구의 제거 과정과 흡사한 것으로 알려져 있다[6].

세탁에서의 기계적인 힘은 대부분 수류의 형식으로 오구에 작용하게 되며 Fig 2과 같이 직물 조직이나 실을 이루는 섬유 사이로 세액이 출입하면서 실과 실, 섬유와 섬유 사이에 부착된 오구를 제거하고[7], 수류로 인하여 발생하게 되는 직물의 굴신이나 직물 간의 마찰이 Fig 3와 같이 세탁 중 섬유 방출에 영향을 주게 된다.[8] 직물의 굴신의 경우, 평행 수류의 작용이 미치지 못하는 직물의 표면과 내부에 부착된 극히 작은 오구 입자에 기계적 에너지를 전달하고, 세액이 직물 내부로 출입함에 따라 직물 조직이 이완되면서 섬유 간 간격에 변화가 생겨 섬유 내에 있던 오구가 빠져나올 수 있도록 한다.[8][9] 또한, 세탁기의 기계적 작용에 의해 섬유와 섬유, 직물과 직물 사이의 마찰이 발생하게 되며, 오구에 직접적인 힘을 가하여 직물로부터 제거되게 하는 작용을 한다.[10]

이때, 직물의 굴신은 직물을 이루는 실의 굵기나 직물의 밀도, 경위사 교차점에 따른 실의 자유도나 교차점에서의 압력에 의해 변화되며, 직물을 이루는 실의 굵기가 두껍고 직물의 밀도가 높으며, 경위사 교차점이 많을수록 교차점에서 실이 받는 압력이 증가하고 실의 자유길이(free-length)는 감소하게 된다.[11]

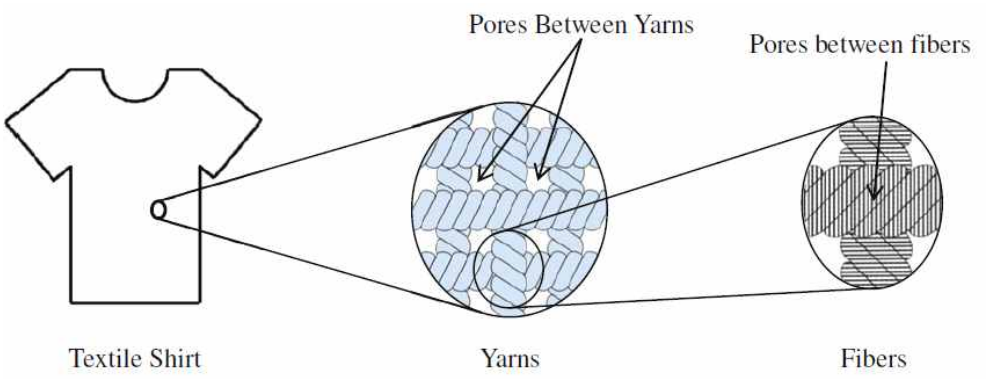


Fig 2. Schematic diagram of the structure of a typical textile and its dual porosity due to spaces between yarns and spaces between fibers of the yarns.[7]

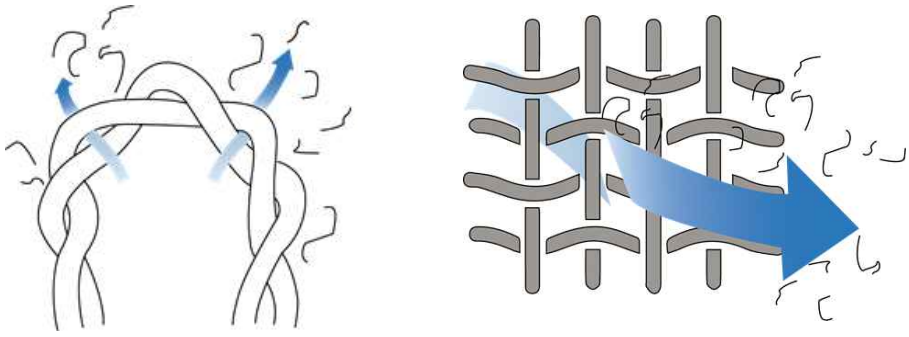


Fig 3. The deflection of the yarns and fabric due to the mechanical action of the washing machine.

한편, 세탁 시 발생한 섬유는 하수처리장을 거쳐 바다로 흘러 들어가며, 해수의 비중이 약 1.025인데 비해 폴리에스터 섬유나 면섬유는 비중이 각각 1.35, 1.5로 해수보다 비중이 높아 심해에 가라앉거나 해류에 의해 표층, 중간층에 존재할거라 보고되고 있다[12]. 이에, 세탁에 의해 해수로 배출된 섬유들은 빛이나 열에 의한 분해보다는 수중에서 생분해 될 거라 예상된다. 생분해는 미생물이 유기물을 영양분으로 사용하여 에너지를 획득하는 과정이며, 최종산물로 이산화탄소와 바이오매스, 메탄가스 그리고 물 등이 생성되게 된다. 생분해가 발생하기 위해서는 우선 미생물이 분비하는 가수분해 효소의 작용으로 고분자 소재가 저분자화 되는 1차 분해가 발생하여야 한다. 미생물이 체외로 분비한 효소가 고분자에 결합하고 가수분해를 촉진시켜 고분자를 저분자로 분해시킨다. 이렇게 1차 분해된 저분자 물질은 세포막을 통과할 수 있기 때문에 미생물에 흡수되어 대사 작용을 통해 최종산물인 바이오매스와 이산화탄소, 물 등으로 분해되게 된다.[13]

해수로 방출된 섬유의 생분해 거동에 영향을 미치는 요인으로 예상되는 것은 섬유의 결정화도와 분자의 중합도, 섬유의 친수성과 소수성 정도, 분해에 관여하는 미생물의 종류와 상태 등이 있다.[14] 선행 연구들에 의하면 대부분의 고분자는 분자량과 결정화도, 중합도가 낮을수록, 그리고 친수성이 높을수록 생분해가 잘 일어나는 것으로 알려져 있으며[14], 같은 면섬유라고 해도 염색이나 가공 과정을 거치게 되면 화학적 구조나

물리적 특성이 달라져 생분해 거동에 차이를 나타낼 것으로 예상된다.

그 동안 세탁 중 방출되는 섬유 관련 연구는 주로 낮은 생분해성으로 인해 바다에 계속 축적되는 것으로 알려진 폴리에스터나 아크릴과 같은 합성섬유를 위주로 진행되어왔다.[5][15] 그러나 천연섬유 또한 제조 시 염료나 가공제 등 화학물질이 첨가되고 해양에서 화학오염물질을 흡수하며, 체내에서 분해, 흡수되면서 미세플라스틱과 마찬가지로 독성화학물질을 확산시킬 수 있다는 연구가 밝혀지면서 천연섬유의 미세섬유 방출에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.[16][17]

또한, 세탁 중 섬유의 방출에는 세탁기의 기계적 작용에 의한 직물의 물리적 변형, 직물 간 마찰이 영향을 미치며, 이는 섬유의 종류 뿐 만 아니라 직물 구조나 가공에 따라 달라지는 직물의 특성에 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서 직물의 구조와 가공 조건을 통제한 연구를 통해 세탁 중 섬유 방출에 영향을 미치는 요인을 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 면직물의 기하학적 구조와 가공 조건을 달리하여 세탁 중 섬유 방출 경향을 비교하였으며, 방출된 섬유들의 해수 중 생분해 거동을 비교하였다. 섬유 방출에 영향을 미치는 직물의 구조인자 및 직물의 물성을 도출하고자 하였다.

이를 위해 실의 굵기, 직물 밀도, 조직과 가공이 다양한 면직물을 시료로 선정하였고, 세탁기 여과량, 배수구로의 방출량 및 총 방출량과 방출

된 섬유의 길이를 측정하였다. 또한 해수에서의 생분해 속도를 매립환경과 비교하였고, 방출된 섬유들의 해수 중 생분해 거동을 BOD 측정을 통해 비교하여 직물의 구조 및 가공이 해수환경에 미치는 영향을 평가하였다.

Ⅱ. 실험

1. 시료 및 시약

본 연구는 직물의 구조와 가공에 따른 세탁 중 섬유 방출 경향을 비교하기 위해 면 번수, 직물 밀도, 조직이 다른 다양한 면직물을 실험에 사용하였으며, 가공에 따른 섬유 방출 경향을 비교하기 위해 30수 Twill직물을 control 시료로 하여 반응성 염색, 반응성 염색+발수가공, 반응성 염색+peach skin 공정을 거친 직물을 사용하였다.

모든 면직물은 Yesung Textile사에서 구입하였으며 자세한 특성은 Table 1과 같다. 모든 시료는 액비를 30:1 중량비율로 하여 증류수에 sodium carbonate anhydrous(>99%)(대정화금㈜,한국)를 용해시켜 0.5%의 정련용액을 만든 후, 60cm x 60cm크기의 면직물을 침지하여 80℃에서 30분 동안 처리하였다. 그 후, 정련된 면직물은 증류수로 세척한 후 상온에서 건조하였다.[18]

Table 1. Specification of the specimens.

Name	Yarn count	Weave structure	Density		Weight (g/m^2)	Thickness (mm)	Finish
			Warp(e.p.i)	Weft(p.p.i)			
30Ne 130×68 (Twill)	30Ne	Twill	130	68	175.8	0.33	–
40Ne 120×100 (Plain)	40Ne	Plain	120	100	147.1	0.24	–
60Ne 90×88 (Plain)	60Ne	Plain	90	88	80.4	0.19	–
60Ne 140×120 (Plain)		Plain	140	120	113	0.20	–
60Ne 175×105 (Satin)		Satin	175	105	119.6	0.27	–
Dye	30Ne	Twill	130	68	181.5	0.33	Reactive dye
Dye + WR					178.2	0.29	Reactive dye + Water Repellent
Dye + PS					186.1	0.35	Reactive dye + Peach skin

2. 실험 방법

2.1. 섬유 방출량 평가

세탁 시 60cm x 60cm 크기의 시료가 5장씩 투입되었으며, 이때 투입된 시료의 무게는 최소 143g, 최대 314g 이었다.

시료의 가장자리에서 방출되는 실과 섬유의 영향을 배제하기 위해 100% 폴리에스터 봉제사로 박음질 처리를 하였다.

세탁은 Fig 5 임펠러식 Samsung WA10F5S2QWW1(10kg)를 사용하여 표준세탁 코스, 냉수(25℃) 조건으로 진행하였으며, 세제는 첨가하지 않았다. 표준세탁 코스는 Fig 6과 같이 세탁 16분, 헹굼 25분, 탈수 11분, 총 52분이었으며, 세탁 수 방출은 세탁과정에서 1회, 헹굼 과정에서 2회로, 총 3회 진행하였다. 본 실험에 사용한 세탁기는 세탁물 무게를 자동으로 감지하여 수량을 1~5단계로 설정하게 설계되어 있는데, 모든 실험에서 시료들의 무게가 1kg 이하이므로 세탁 수량은 38L로 동일하게 자동으로 설정되었다. 전 세탁과정에 의한 섬유가 잔류하는 것을 배제하기 위해 모든 세탁 전 시료를 넣지 않고 세탁하는 과정을 거쳤다.

Fig 5. Photographic image of washing machine(Samsung WA10F5S2QWW1).

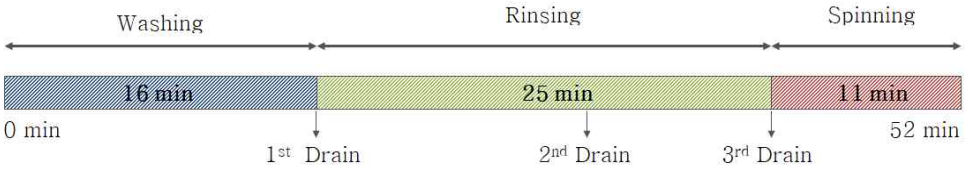


Fig 6. Protocol of standard washing process.

세탁 시 배수구로 방출되는 섬유 및 세탁기에 여과된 섬유를 포집하기 위한 과정을 Fig 7로 나타내었다. 세탁기 배수구에 CellMicroSieves™ Nylon filter (pore size : 25μm)를 6 x 6cm 로 잘라 원형 클램프(지름 3.5cm)을 이용해 고정시켜 배수구로 방출되는 섬유들을 포집하였으며, 이를 500ml 비커에 재분산 시킨 후 진공여과장치를 이용해 Glassfiber filter(pore size : 1.2μm)에 여과시켰다.

또한 세탁기 내부 거름망(pore size : 300μm)에 포집된 섬유의 경우 같은 방법으로 비커에 재분산 시킨 후 Glassfiber filter(pore size: 1.2μm)에 여과시켰다.

배수구로 방출 및 세탁기에 여과된 섬유의 무게를 측정하기 위해 섬유를 여과하기 전,후의 Glassfiber filter를 105℃ 오븐에서 90분간 건조시킨 후 desiccator에서 실온으로 냉각시킨 후 그 무게를 측정하였다. 이 때 건조 전후의 glassfiber filter 무게 차이를 섬유 방출 무게로 정하였다.

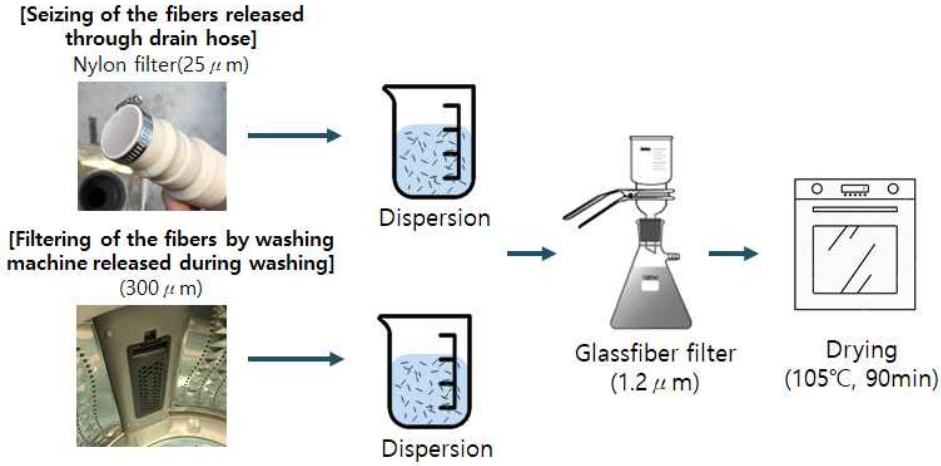


Fig 7. Process of filteration of the fibers sieved through the washer or the released fibers.

방출된 섬유의 길이와 폭은 Fig 8과 같이 섬유장 분석기(L&W Fiber Tester)를 이용하여 측정하였다. 이때, 비커 당 한 개의 시료에서 방출된 섬유들을 분산시킨 후 섬유장 분석기 내부로 투입하며, 기기 내부의 좁은 통로를 지나가는 섬유들을 카메라가 포착하여 섬유의 길이와 폭을 실시간으로 측정하여 평균 길이와 폭, 길이 분포 등을 산출하게 된다.

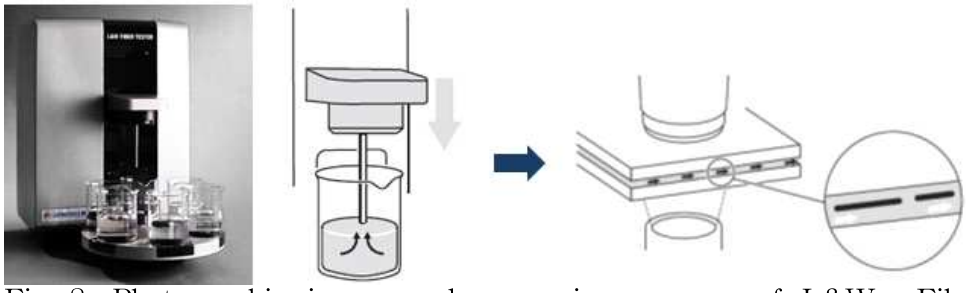


Fig 8. Photographic image and measuring process of L&W Fiber Tester.

2.1. 직물의 물리적 특성 평가

2.1.1. 강경도

직물의 강경도는 캔틸레버법(KS L ISO4604:2008)에 의해 측정되었으며, Fig 9와 같이 41.5°경사를 가진 스탠드 평면대 위에 자가 붙어있는 윗면에서 2.5x15cm의 시험편을 살며시 밀어내어 그 끝이 사면에 닿을 때까지 밀려나간 시험편의 길이(l)를 읽고, 다음 식에 따라 관용 휨강성(G)를 계산하였다. [19]

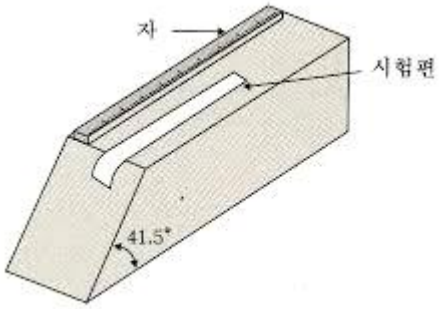


Fig 9. Cantilever method.

$$G(\mathrm{mN} \times m) = g \times \rho_A \left(\frac{l}{2}\right)^3$$

$g = acceleration\, of\, gravity\, [m/s^2]$

ρ_A=시험편의 무게(g/m^2)

$l =$ 밀려나간시험편의길이(m)

2.1.2. Fuzziness

직물 표면의 fuzziness는 Fig 10과 같이 직물의 표면 촉감을 측정하는 장치인 TSA(Emtec, Germany)를 통해 측정되었다. 12x12cm 크기의 시료들을 23℃, 50% 조건에서 24시간동안 컨디셔닝하였다. 시료는 기기의 클램프에 끼워 고정시켰으며, 기기 위쪽에 장착된 6개의 blade들이 직물에 수직으로 내려와 시료 표면에 닿은 후 회전하게 되면 blade가 직물 표면 fiber를 지나가면서 진동이 발생하게 되고, 이러한 진동을 기기의 음향센서가 포착하여 주파수로 변환한다. 이때, 6500Hz에서의 데시벨을 제곱근한 값을 TS7이라 하며, 시료 표면의 fiber가 강직할수록 blade가 지나갈 때 더 강한 진동이 발생하며, 따라서 피크가 낮을수록 표면의 섬유가 유연한 시료임을 나타낸다. 이때, 같은 종류의 fiber라면, 노출된 fiber의 길이가 길수록 더 유연하므로[20] TS7값이 낮게 측정된다.

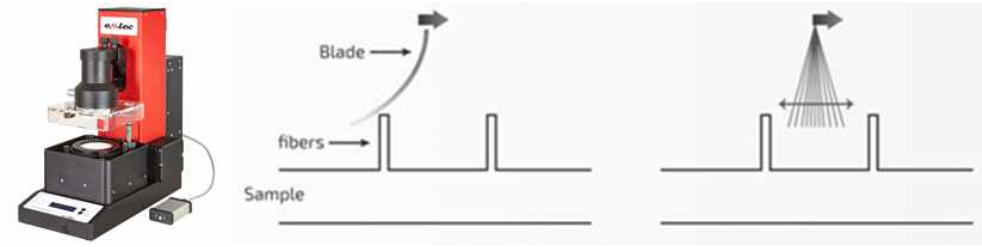


Fig 10. Tissue fuzziness analyzer measurement images.

2.1.3. 마모강도

ASTM D4966에 따라 각 직물을 30,000번 rubbing 한 후 무게 유지율(%)을 다음과 같이 측정하였다.

$$\text{Weight retention}(\%) = \frac{A_r}{A} \times 100$$

A : Rubbing 전 시료의 무게

A_r : Rubbing 후 시료의 무게

2.1.4. 흡수성

직물의 흡수성은 AATCC TM 197-2011 표준방법에 따라 Figure 11과 같은 장치를 이용해 측정하였다. 25cm×3cm의 직물을 증류수에 수직으로 침지시키고 30분 동안 증류수가 wicking에 의해 직물에 흡수되어 올라간 높이를 측정하였다.

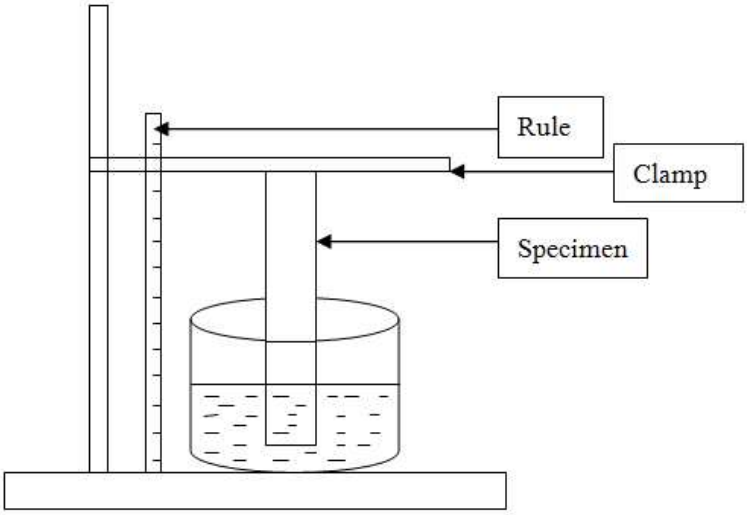


Figure 11. Diagrammatic representation of the fabric wicking test apparatus.

2.2. 생분해성 평가

2.2.1. 인장강도 감소율 측정

토양 및 해수에서의 생분해 속도를 비교하기 위해 AATCC TM 30-1993에 제시된 실험방법을 참고하여, 배양토를 약 11cm높이로 채운 후, 시료를 15cm x 2.5cm(경x위사)의 일정한 크기로 잘라 토양에 약 3cm깊이로 묻고 23℃, 50% R.H 환경에서 6주간 분해하였다. 분해하는 동안 일정간격으로 일정량의 수분을 공급하여 토양 수분율을 약 25%로 유지시켜주었다.

해수에서의 생분해를 위해 인천 영종도에서 해수를 채취하였으며, 채취한 해수 300ml를 600ml 비커에 넣고 해수 속 미생물들에 영양분을 공급하기 위해 ASTM D6691에 따라 NH_4Cl 0.5g/L, $KH_2(PO)_4$ 0.1g/L의 무기질 영양소를 첨가하였다. 시료는 토양매립과 동일하게 15cm x 2.5cm (경x위사)의 일정한 크기로 잘라 해수에 침지시켰으며, 해수 온도는 심해온도인 7℃, 표층 해수 온도인 20℃로 유지시켰다.

일정 시간 경과 후 토양매립 및 해수에 침지한 시료를 꺼내어 증류수로 가볍게 세척한 후 자연건조하고, 23℃, 50% R.H. 항온항습기에 24시간 이상 보관하여 컨디셔닝 하였다. 컨디셔닝된 시료는 KS K 0520의 Ravelled strip method에 따라 생분해 전, 후의 시료의 절단 강도를 측정

하였다. Crosshead speed 10cm/min, 하중 50kg인 조건에서, Instron(Universal Testing Machine Instron-5543)을 사용하여 측정하였다. 토양매립에 의한 생분해율은 다음 식에 의해 인장강도 감소율로써 평가하였다.

$$\text{Biodegradability}(\%) = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \qquad \text{(eq.1)}$$

S_0 : Tensile strength of control

S : Tensile strength of specimen after soil, seawater burial test

2.2.2. BOD 측정

생분해 시 소모되는 산소의 양(BOD; biodegradable oxygen demand)을 측정하기 위해 Figure 12 Oxi-Top®BOD Respirometer System(Global Water Instrumentation)을 이용하였으며, 미생물의 호흡에 따라 발생되는 CO_2를 KOH로 제거하고 소모되는 산소의 양을 측정용기 내 발생되는 감압정도를 측정하는 방법으로 측정하였다.

해수는 인천 영종도 부근에서 채취하였으며, 채취한 해수에는 ASTM D6691에 따라 NH_4Cl 0.5g/L, $KH_2(PO)_4$ 0.1g/L의 무기질 영양소를 첨가하였다. 각 Oxi-top bottle에는 해수 150ml, 세탁 후 방출된 섬유 50mg을 투입하였으며, 심해 온도, 표층 해수온도에서의 생분해율을 비교하기 위해 7℃, 20℃에 보관하였다.

Figure 12. Image of Oxi-Top®BOD Respirometer System(Global Water Instrumentation).

BOD 측정에 의한 생분해율은 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\text{Biodegradability}(\%) = \frac{BOD}{ThOD} \times 100 \qquad \text{(eq.2)}$$

BOD : Biological oxygen demand (mg)

ThOD : Theoretical oxygen demand (mg)

eq.2에서 ThOD는 유기물질이 완전히 산화되기 위해 필요한 산소의 양을 말한다.[21] 1몰의 셀룰로오스가 이산화탄소와 물로 분해되기 위해 6몰의 산소 분자가 필요하며, 셀룰로오스 시료 무게가 w(g)일 경우 시료가 완전히 분해되기까지 필요한 산소의 양은 다음과 같이 산출하였다.

$$\text{ThOD} = \frac{wg}{162g/mole} \times 6 \times 32g/mole \qquad \text{(eq.3)}$$

셀룰로오스($C_6H_{10}O_5$)의 분자량 : 162g/mole

산소(O_2)의 분자량 : 32g/mole

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 직물 특성에 따른 세탁 시 섬유 방출

1.1 직물의 기하학적 구조에 따른 방출량

1.1.1. 세탁 횟수에 따른 방출량

직물의 기하학적 구조에 따른 섬유 방출량 측정을 위해 직물 구조가 다양한 다섯 종류의 면직물을 1kg씩 세탁하였고, 세탁기에서 여과된 섬유와 배수구로 배출된 섬유의 무게를 합산하여 총 방출량으로 나타내었을 때 세탁 횟수에 따른 섬유 방출 경향은 Figure 13와 같다.

모든 시료에서 공통적으로 첫 번째 세탁에서 가장 많은 양의 섬유가 방출되었으며, 세탁 횟수가 증가함에 따라 감소하다가 세 번째 세탁 후에는 일정해지는 경향을 보였다.

첫 번째 세탁에서의 총 방출량의 경우, Figure 14에서 볼 수 있듯이 세탁 10회까지의 누적 방출량에서 차지하는 비율이 30~40%였으며, 이는 생산이나 유통 과정에서 마찰에 의해 약해지거나 느슨하게 붙어있던 섬유들이 첫 번째 세탁에서 탈락되면서 방출되었기 때문이라 사료된다.

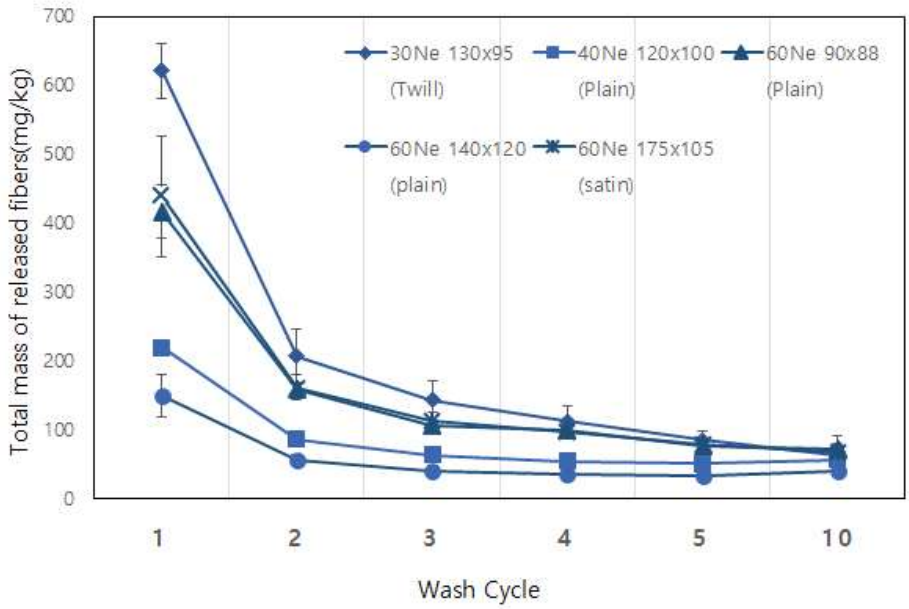


Figure 13. Total amount of fibers after 10 repeated cycles of washing.

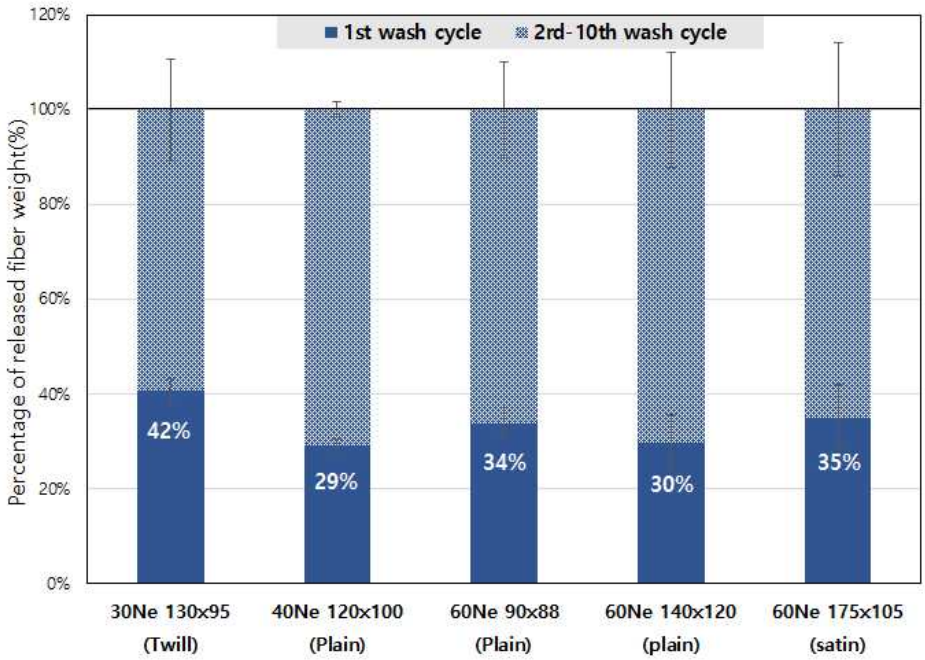


Figure 14. Ratio of the amount of fibers released by 1st washing to the total amount released during 10 washing cycles.

1.1.2. 총 방출량

직물의 구조적 특성 별로 세탁 1회 후 총 방출량과 세탁 10회까지의 누적 섬유 총 방출량을 비교한 결과는 Figure 15과 같으며, 첫 번째 세탁에 의한 총 방출량과 세탁 10회까지의 누적 방출량에서 시료 간 방출량 차이는 유사한 경향을 나타내었다. 실의 굵기에 따른 방출량을 비교하였을 때, 가장 두꺼운 30수 직물에서 가장 많은 방출량을 보였고, 40수, 60수 순으로 감소하는 경향을 보였다. 직물의 밀도에 따른 방출량의 경우 60수 면사를 90x88로 직조한 저밀도 직물에서 더 많은 방출량을 보였으며, 직물 조직에 따른 방출량의 경우, 평직보다는 직물의 단위면적 당 경위사의 교차점이 적은 주자직 직물에서 더 많은 방출량을 보여, 실이 가늘고 직물이 조밀할수록 방출량이 감소하는 경향을 확인하였다.

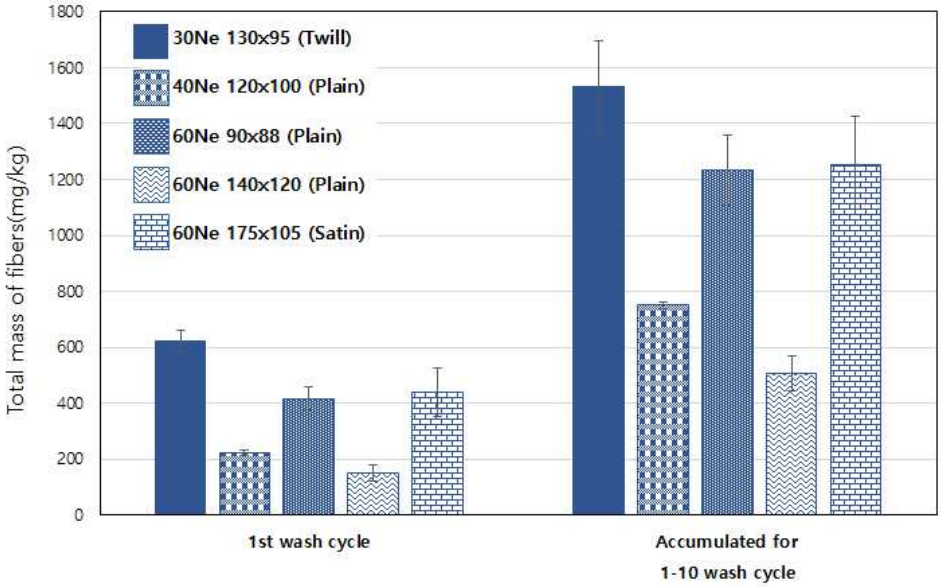


Figure 15. Effect of fabric structural characteristics on the amount of fibers released from 1st wash cycle and on the total amount of fibers during 10 cycles of washing.

1.1.3. 세탁 시 탈락된 섬유의 평균 길이

본 실험에 사용된 임펠러식 세탁기의 경우 내부에 pore size가 약 300μm인 거름망이 설치되어 있었으며, 각 직물을 세탁했을 때 세탁기 내부 거름망에 의해 여과된 섬유들과 배수구로 방출된 섬유들의 길이분포는 Figure 16 와 같으며, 평균 길이는 각각 2.4mm, 0.8mm로, 길이가 1mm 이하인 섬유들은 대부분 배수구로 방출됨을 알 수 있었다. 여과 및 방출된 섬유들의 폭의 경우 각각 평균 20.9μm, 21.5μm 로 비슷한 경향을 나타났다.

직물의 구조적 특성에 따라 방출되는 섬유의 길이에도 차이가 있었으며, Figure 17 와 같이 실이 가늘고 직물 밀도가 높거나 경,위사 교차점이 많은 경우 방출된 섬유의 길이가 짧은 경향을 보였지만 섬유들의 폭은 일정한 경향을 보였다.

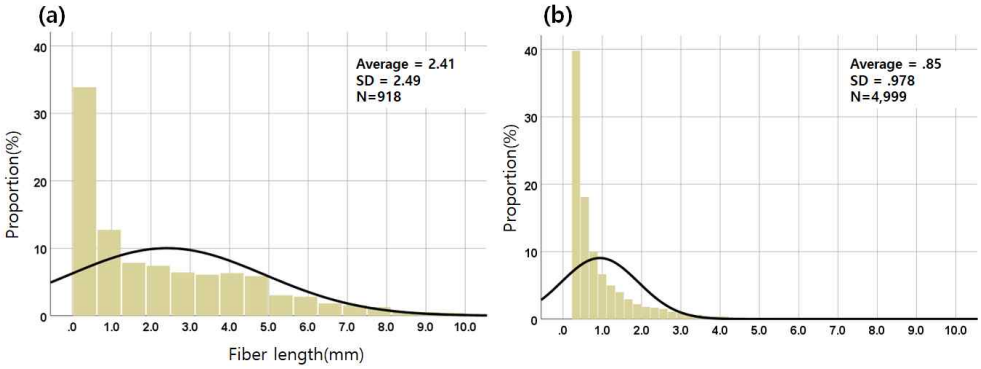


Figure 16. Fiber length distribution (a) Filtered by washing machine, (b) Released through the drain.

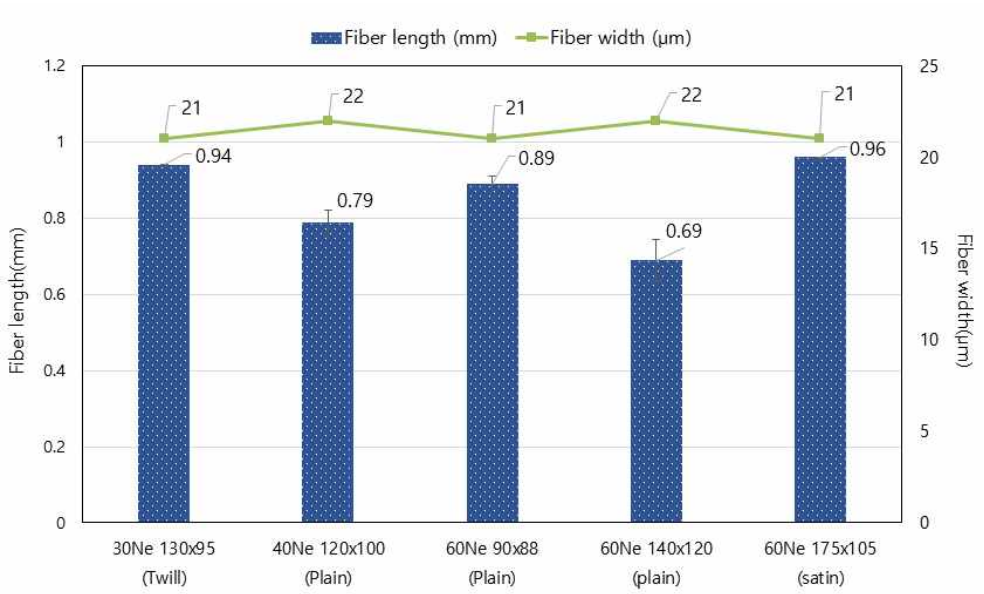


Figure 17. Fiber length(mm) and width(μm) of each specimen.

1.1.4. 세탁기 여과 섬유량 및 배수구 방출 섬유량 비율

Figure 18.과 같이 직물 특성에 따라 직물에서 탈락된 섬유가 세탁기 내부 거름망에 여과되는 비율과 배수구로 방출되는 비율에도 차이가 있었다. 실이 가늘고 직물 밀도가 높으며 경위사 교차점이 많은 경우 배수구로 방출되는 비율이 증가하였고, 방출된 섬유의 길이도 짧은 경향을 보였다. 그러나 세탁에 의해 탈락된 섬유의 전체 절대량이 적었기 때문에 실제 해수로 방출되는 방출량은 다른 직물들에 비해 적은 것을 확인하였다.

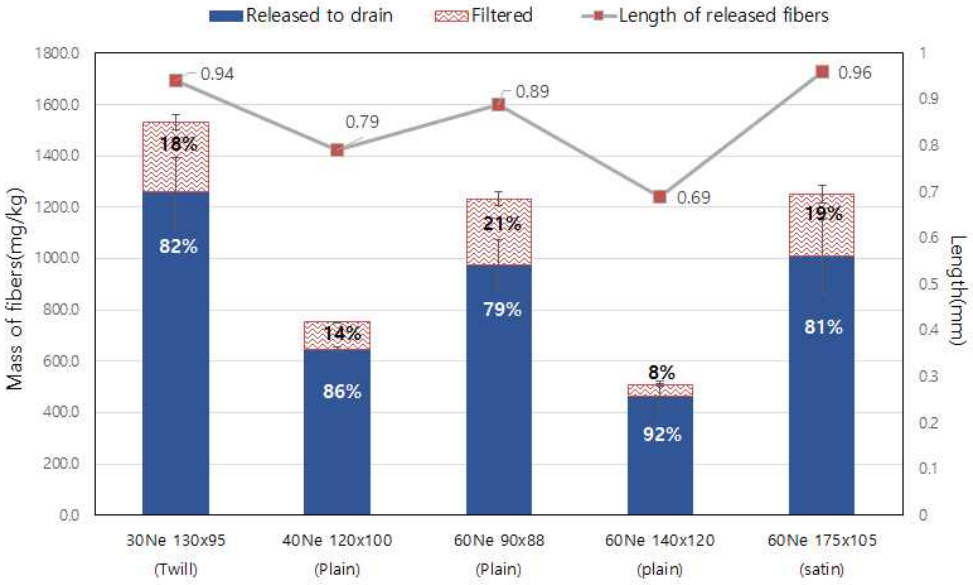


Figure 18. Proportion of amount of fibers released through the drain and the fiber amount filtered by washing machine and length of released fibers.

1.2 직물의 가공에 따른 방출량

1.2.1. 세탁 횟수에 따른 방출량

가공 종류에 따른 섬유 방출량 측정을 위해 미처리 면직물(30Ne 130×68 Twill)을 control시료로 하고 여기에 반응성 염색, 염색과 발수가공, 염색과 기모가공 처리한 직물을 1kg씩 세탁하였고, 세탁기에서 여과된 섬유와 배수구로 배출된 섬유의 무게를 합산하여 총 방출량으로 나타내었을 때 세탁 횟수에 따른 섬유 방출 경향은 Figure 19.와 같다.

이때, 첫 번째 세탁 시 가공 직물들은 모두 미처리 면직물에 비해 적은 방출량을 보였으며, 첫 번째 세탁에서의 총 방출량이 전체 누적 방출량에서 차지하는 비율도 Figure 20.에서 볼 수 있는 것처럼 미처리 면직물에 비해 가공 직물들에서 감소하였다. 이것은 미처리 면직물의 첫 번째 세탁에 해당하는 과정이 가공 직물들의 경우 공장에서 표백, 염색, 가공 과정 등을 거치며 이미 수행되었으며, 이 과정에서 표면에 느슨하게 붙어있던 섬유들이 이미 탈락된 상태이기 때문이라 사료된다.

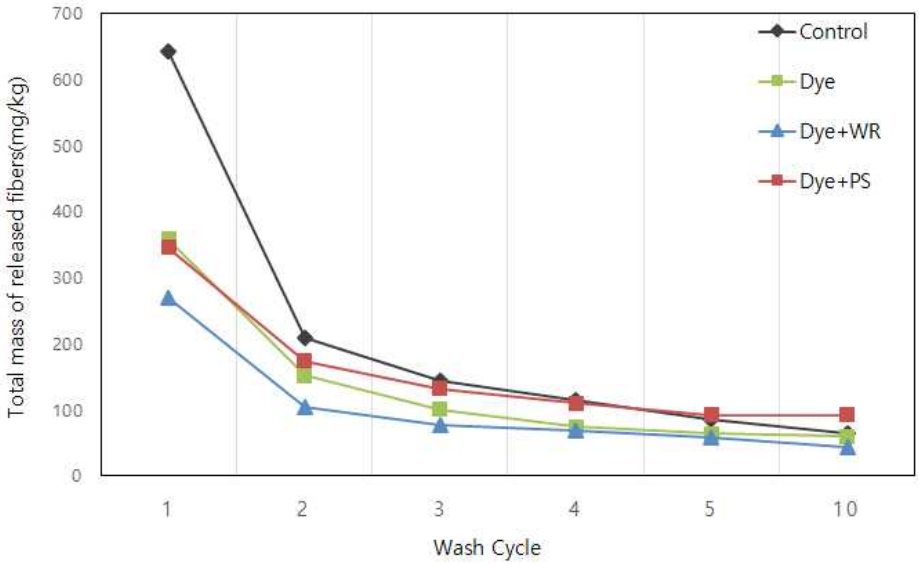


Figure 19. Total mass of fibers after 10 repeated cycles of washing.

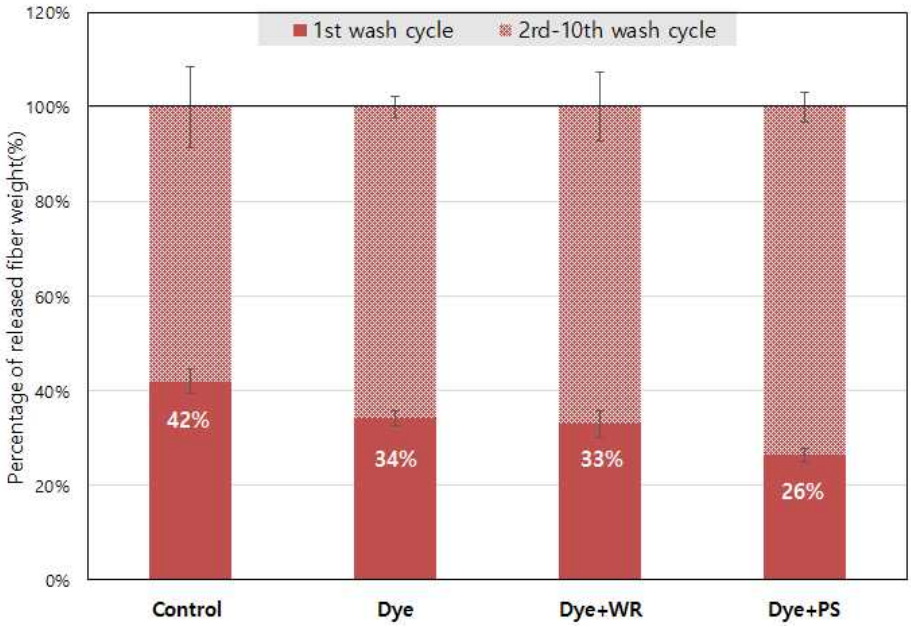


Figure 20. The ratio of the amount of the released fibers from the first washing to the total amount of fibers released during 10 washing cycles.

1.2.3. 총 방출량

직물의 처리 종류 별로 세탁 1회 후 총 방출량과 세탁 10회까지의 누적 섬유 총 방출량을 비교한 결과는 Figure 21.과 같다.

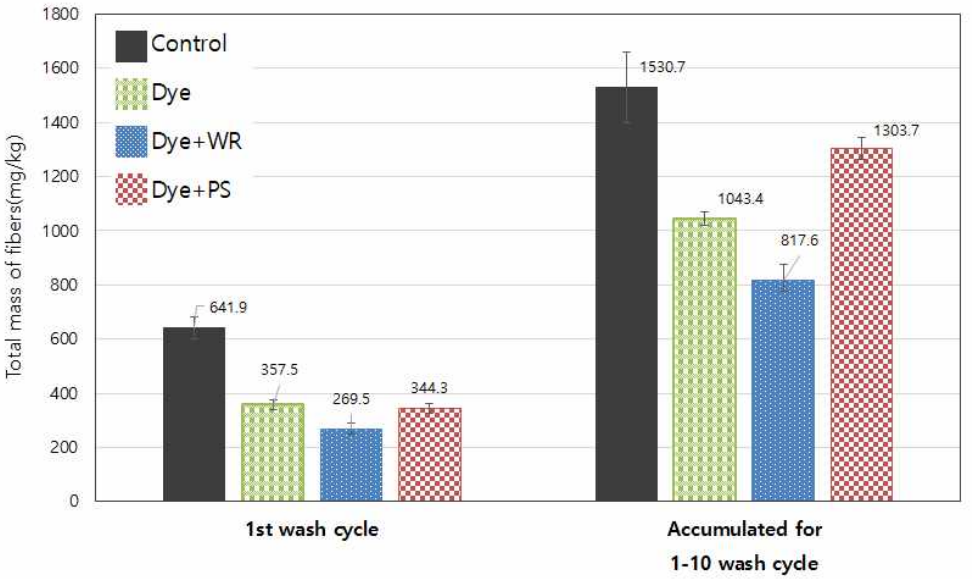


Figure 21. Effect of finishes on the amount of fibers released by 1st washing cycle and total amount accumulated during 10 washing cycles.

발수가공 직물의 경우 발수가공을 하지 않은 직물에 비해 첫 번째 세탁과 누적 세탁에서 모두 약 23% 감소하는 경향을 나타내었으며, 이것은 불소계열 가공제 및 crosslinking agent에 의해 표면에 섬유가 강하게 결합되었으며[22] 직물의 표면에너지가 낮아지고 표면 마찰계수가 낮기 때문에 수력의 영향을 덜 받았기 때문이라 사료된다[23].

한편, 기모가공 직물의 경우, 첫 번째 세탁에서 기모가공을 하지 않은 직물과 비슷한 방출량을 보였지만 10회까지의 누적 방출량의 경우 기모가공 직물에서 약 25% 더 많은 섬유가 방출되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 첫 번째 세탁에서의 섬유 방출은 세탁에 의한 마찰보다는 생산이나 유통과정에서 느슨하게 붙어있던 섬유들이 탈락되면서 방출되는 거라 예상되며, 세탁 횟수가 증가할수록 직물 표면에 이미 fuzz들이 많이 노출된 기모 직물의 경우 직물끼리 마찰이나 수류의 영향을 더 잘 받기 때문에 더 많은 방출량을 보이는 것으로 사료된다.

1.2.4. 배수구로 방출된 섬유 길이

직물의 가공 종류 별로 방출된 섬유들의 길이를 비교해본 결과, Figure 22.과 같이 가공에 따라 배수구로 방출된 섬유들의 길이가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 염색이나 발수가공을 했을 시 평균길이 0.94mm의 섬유를 방출한 미처리 면직물에 비해 짧은 섬유들이 방출되었으며, 특히, 발수가공의 경우 평균 길이가 0.66mm로 가장 짧은 경향을 보였다. 기모가공을 했을 경우 기모가공을 하지 않은 시료보다 방출된 섬유의 평균 길이가 긴 경향이 나타났다. 방출된 섬유들의 폭의 경우 모두 약 20μm로 일정한 경향을 보였다.

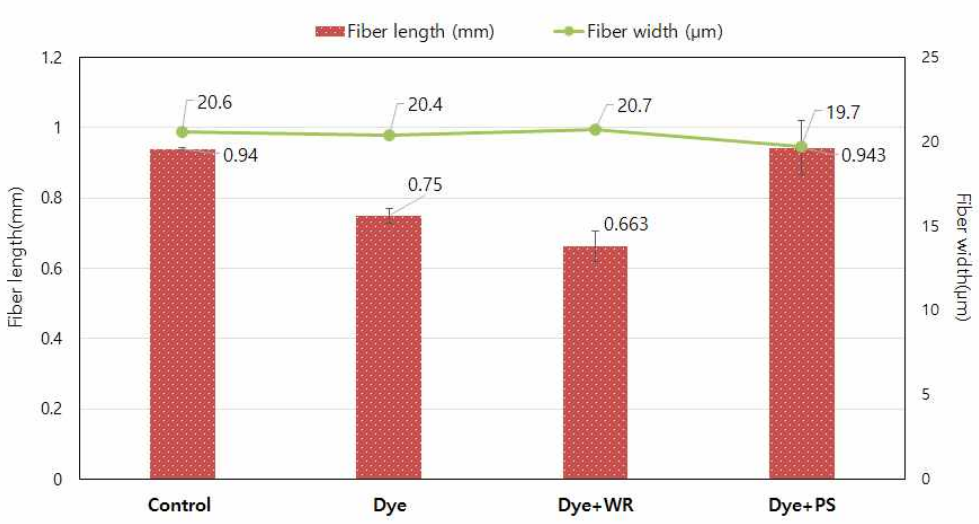


Figure 22. Fiber length(mm) and width(μm) of each specimen.

1.2.5. 세탁기 여과 및 배수구 방출량 비율

Figure 23.과 같이 가공 종류에 따라 세탁기 내부 거름망에 여과되는 비율과 배수구로 방출되는 비율에도 차이가 있었으며, 발수가공 직물의 경우 세탁에 의해 탈락된 섬유의 약 95%가 배수구로 방출되고 기모가공 직물의 경우 전체의 약 67%만이 배수구로 방출되었으며, 방출되는 섬유의 길이가 짧을수록 배수구로의 방출비율이 증가하는 경향을 확인하였다. 한편, 실제로 배수구 밖으로 방출되는 섬유의 양을 비교해보았을 때 미처리 면직물이 가장 많은 방출량을 나타냈으며, 발수가공 직물에서 가장 적은 양이 방출되었다. 기모가공 직물의 경우 총 방출량은 기모가공을 하지 않은 직물에 비해 약 25% 더 많았지만 세탁기에 여과되는 비율이 높아, 실제 방출량은 오히려 다소 적은 것을 확인하였다.

이를 통해 가공에 따라 달라지는 방출되는 섬유의 길이 및 여과비율이 실제 해수로의 방출량에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

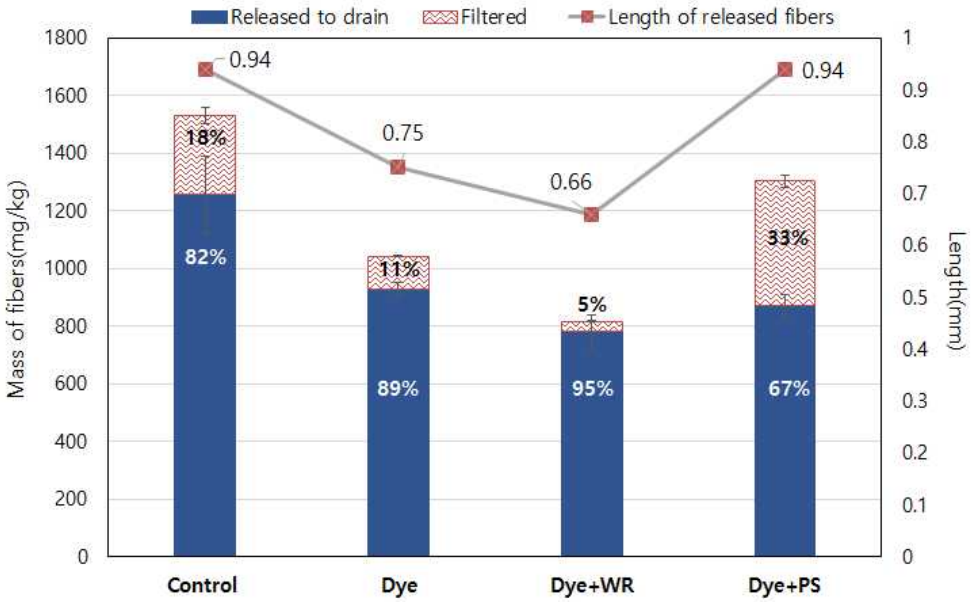


Figure 23. Proportions of the amount of fibers released through the drain and the amount filtered by washing machine and length of released fibers.

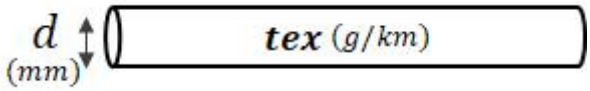
1.3 섬유 방출에 영향을 미치는 직물 특성

1.3.1 직물의 구조인자와 섬유 방출 간의 상관관계

세탁 중 섬유의 방출에는 세탁기의 기계적 작용에 의한 직물의 물리적 변형과 직물 간 마찰이 영향을 미치며[6], 직물 조직이나 실을 이루는 섬유 사이 기공을 통해 출입하는 세액이나[7], 수류로 인하여 발생하게 되는 직물의 굴신이나 직물 간의 마찰이 세탁 중 섬유 방출에 영향을 주게 된다[8]. 이때, 직물의 굴신 및 세액의 출입 정도는 직물을 이루는 실의 굵기나 직물의 밀도, 경위사 교차점에 따른 실의 자유도나 교차점에서의 압력에 의해 변화되며[11][24][25], 직물을 이루는 실의 굵기가 두껍고 직물의 밀도가 높으며, 경위사 교차점이 많을수록 교차점에서 실이 받는 압력이 증가하고 실의 자유길이(free-length)는 감소하여[11] 직물의 굴신이 비교적 덜 일어나고 실이나 직물 사이로 수류의 출입이 어려우며, 마찰에 대한 저항성이 증가할거라 예상된다. 또한 실의 밀도가 높을수록 실 및 직물 표면에 노출된 fiber의 양과 길이가 감소하여 세탁에 의한 섬유 방출량이 감소할 것으로 사료된다. [26]

따라서 세탁에 의한 섬유 방출에 영향을 미치는 직물의 구조인자로 실의 밀도, 직물의 밀도, 직물의 구조를 선정하였고, 각 인자들은 yarn packing density[27], cover factor[28], crossing-over firmness factor[29]를 이용해 수치화하고 섬유 방출과의 상관관계를 알아보았다. 각 구조인자들은 다음과 같은 방법으로 산출하였다.

$$\text{Yarn packing density} = \frac{specific\ volume\ of\ fiber}{specific\ voulme\ of\ yarn} = \frac{tex}{380\pi d^2} \quad \text{(eq. 3)}$$



$$\text{Cover factor} = k_{wa} + k_{we} - \frac{k_{wa} \times k_{we}}{28} \quad \text{(eq. 4)}$$

$$k = t/\sqrt{N}$$

t = threads per inch

N = yarn count(Ne)

Crossing over firmness factor

$$CFF = \frac{\textit{Number of crossing-over lines in the complete repeat}}{\textit{Number of interlacing points in the complete repeat}} \quad \text{(eq. 5)}$$

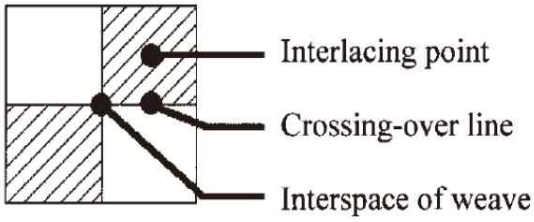


Figure 24. One repeating unit of plain weave.

Table 2. Calculate fabric structural factors of the specimens.

	Yarn packing density	Cover factor	CFF
30Ne 130x95 (Twill)	0.41	26	1.3
40Ne 120x100 (Plain)	0.63	24	2
60Ne 90x88 (Plain)	0.68	18	2
60Ne 140x120 (plain)	0.68	24	2
60Ne 175x105 (satin)	0.68	25	0.8

각 구조인자들과 섬유 방출 경향과의 상관관계를 비교해보았을 때, 구조인자들과 섬유 총 방출량, 방출된 섬유의 길이는 Figure 25 에 나타내었다. 각각의 구조인자들이 섬유방출 경향과 높은 상관관계를 보이지는 않은 것은 시료를 선정할 때 비교하려는 인자 외에 다른 인자를 완벽하게 통일하여 컨트롤하기 어려웠으며, 구조인자들이 직물에 개별적으로 적용되는 것이 아니라 복합적으로 적용되기 때문으로 사료된다.

각 구조인자들을 통합적으로 반영하기 위해 yarn packing density, cover factor, crossing over firmness factor를 곱한 weave parameter[25]를 아래와 같이 도출하여 섬유 방출 경향과의 상관관계를 비교해본 결과, Figure 26 와 같이 섬유 총 방출량과 방출된 섬유의 평균 길이 모두 각각 설명력 80.9%, 88.4%을 가지며 weave parameter와 유의한 상관관계를 보였으며, weave parameter값이 클수록, 즉, 직물이 빽빽할수록 섬유의 총 방출량과 방출된 섬유의 길이가 감소하는 것을 확인하였다.

Weave parameter (eq. 6)

= Yarn packing density × Cover factor × CFF

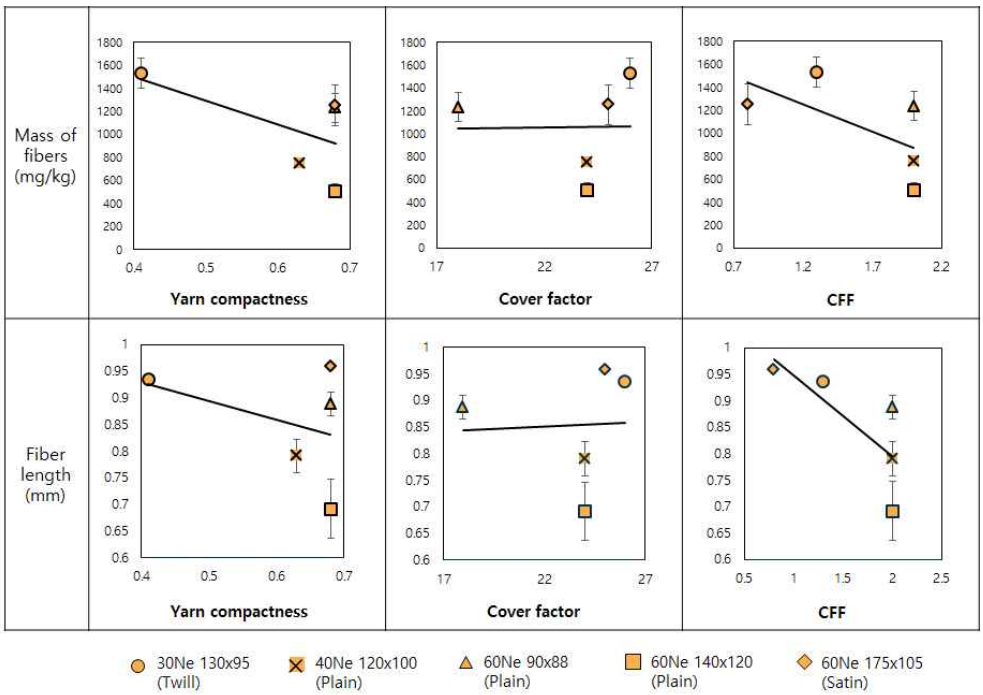


Figure 25. Amount of the released fibers and their length vs. geometrical parameters of the specimen.

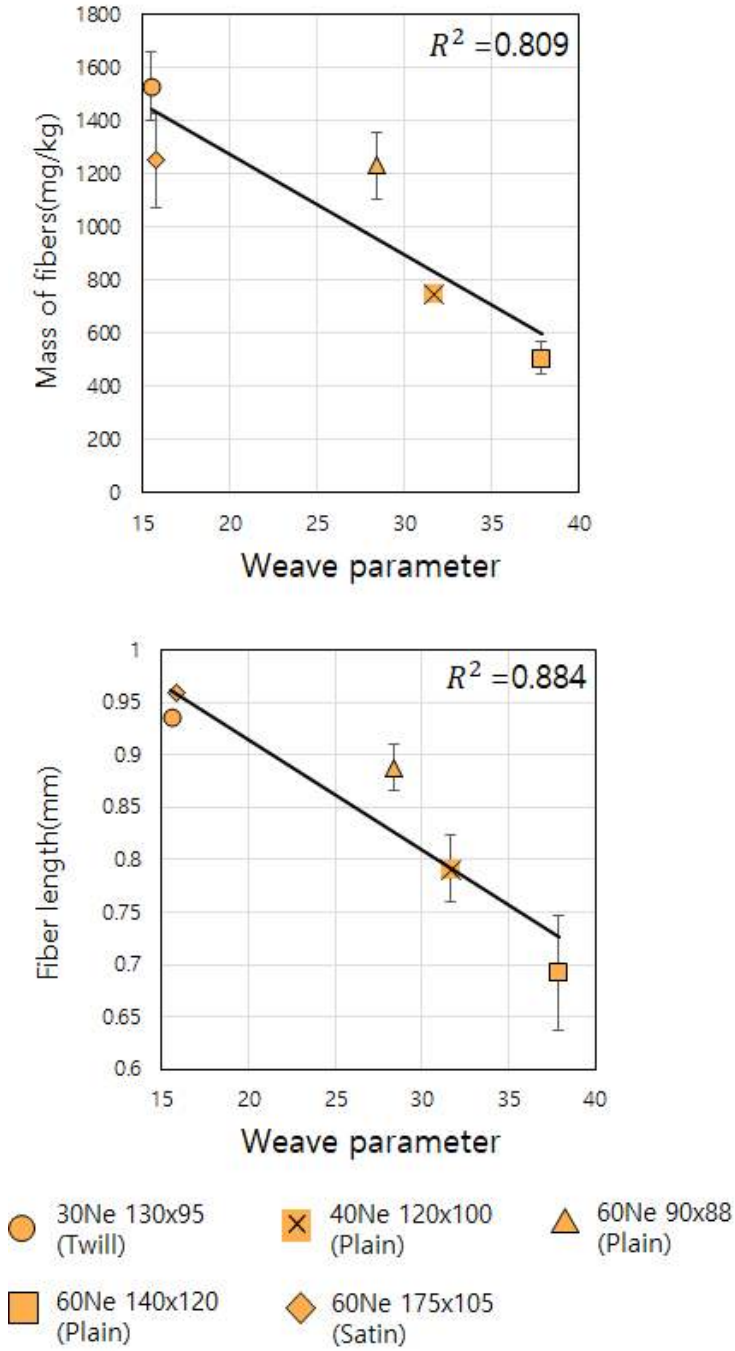


Figure 26. Correlation between the amount of the released fibers or their length and weave parameter.

1.3.2 직물 물성과 섬유 방출 간의 상관관계

직물의 구조적 인자 및 가공에 따라 달라지는 다양한 직물의 물성 변화들 중 섬유의 방출에 유의한 영향을 미치는 직물의 물성을 도출하기 위해 Table 3 과 같이 모든 시료들의 물성을 측정하고, Fig 27 과 같이 직물들의 물성에 따른 섬유 방출 경향성을 비교하였으며, 직물 표면이 fuzzy할수록, 마모강도가 약할수록, 흡수성이 높을수록 세탁 시 섬유 방출량이 증가하는 경향을 확인하였다.

한편, 상관분석을 통해 Table 4 와 같이 섬유 방출에 유의한 영향을 미치는 직물의 특성을 도출해 내었으며, 본 연구의 조건에서는 weave parameter, fuzziness, 마모강도, 흡수성이 섬유의 방출에 유의한 영향을 미치는 직물의 특성임을 도출하였다.

Table 3. Stiffness of cloth, fuzziness, abrasion resistance, absorbency of the specimens.

		Stiffness of cloth (G)	Fuzziness (TS7)	Abrasion resistance (%)	Absorbency (cm)
30Ne (130x68) Twill		0.02 ±0.004	15.4 ±1.8	85.6 ±0.5	8.7±0.5
40Ne (120x100) Plain		0.02 ± 0.003	16.2 ±0.8	95.2 ±1.1	7.3±0.2
60Ne (90x88) Plain		0.005 ± 0.002	14.1 ±0.7	63.5 ±1.3	9.0±0.4
60Ne (140x120) Plain		0.009 ± 0.001	16.3 ±1.1	96 ±1.0	6.9±0.4
60Ne (175x105) Satin		0.007 ±0.001	13.5 ±1.8	89.9 ± 0.6	12.4±0.3
30Ne (130x68) Twill	Dye	0.01 ± 0.007	15.1 ±1.6	90.4 ±2.1	10.4±0.2
	Dye +WR	0.01 ± 0.002	15.0 ±0.5	82 ±0.5	0±0
	Dye +PS	0.01 ±0.001	8.1 ±0.5	87.7 ±0.6	10.8±0.5

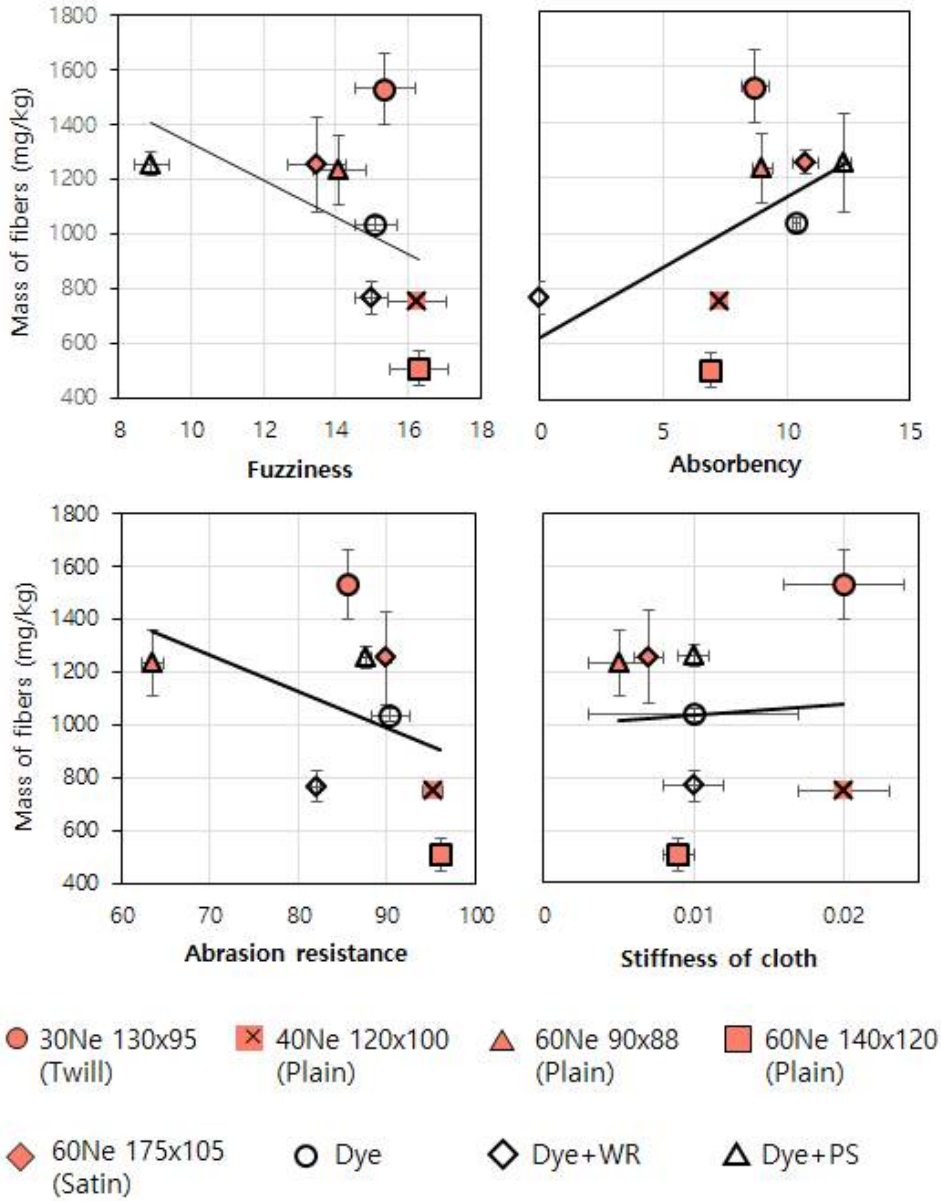


Figure 27. Correlation between total amount of fiber emissions and fabric properties of the specimens.

Table 4. Correlation between total amount of fiber emissions and fabric properties of all specimens.

		Weave parameter	Fuzziness	Abrasion resistance	Absorbency	Stiffness of cloth
Total amount of the released fibers (mg/kg)	Pearson 상관	−.621**	−.429*	−.406*	.532**	0.058
	유의확률 (양측)	0.001	0.037	0.049	0.007	0.786

*. 상관관계가 0.05 수준에서 유의 (양측).

**. 상관관계가 0.01 수준에서 유의 (양측)

2. 방출된 섬유의 생분해성

2.1 환경에 따른 생분해성

물질의 생분해는 미생물의 종류와 농도, 생분해가 일어나는 온도, 습도, pH와 같은 실험 조건, 그리고 시료들의 물리, 화학적인 성질 등 많은 변수들이 함께 작용하여 일어난다.[30] 또한 평가방법에 따라 ultimate biodegradation을 측정하기도 하고, primary degradation을 측정하기도 하며, 인장강도 변화로 생분해성을 평가하는 방법은 어떤 물질이 생물학적 작용에 의해 화학적 구조가 변화하고 그 물질의 특정한 성질을 잃게 되는 primary biodegradation를 평가하는 방법이다.[31] 따라서 완전히 물질이 분해되는 시간이나 속도를 예측하기는 다소 어려우나, 비교적 단기간 내에 생분해성을 평가할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 해수에 방출된 섬유가 생분해되는 속도를 토양에 매립되었을 경우와 비교하기 위해 인장강소 감소율을 측정하였으며, 그 결과를 Figure 28.에 나타내었다. 이는 미처리 면직물(30Ne 130×68 Twill)의 토양 매립과 해수 침지 후 시간에 따른 인장강도 감소율을 나타낸 것이다.

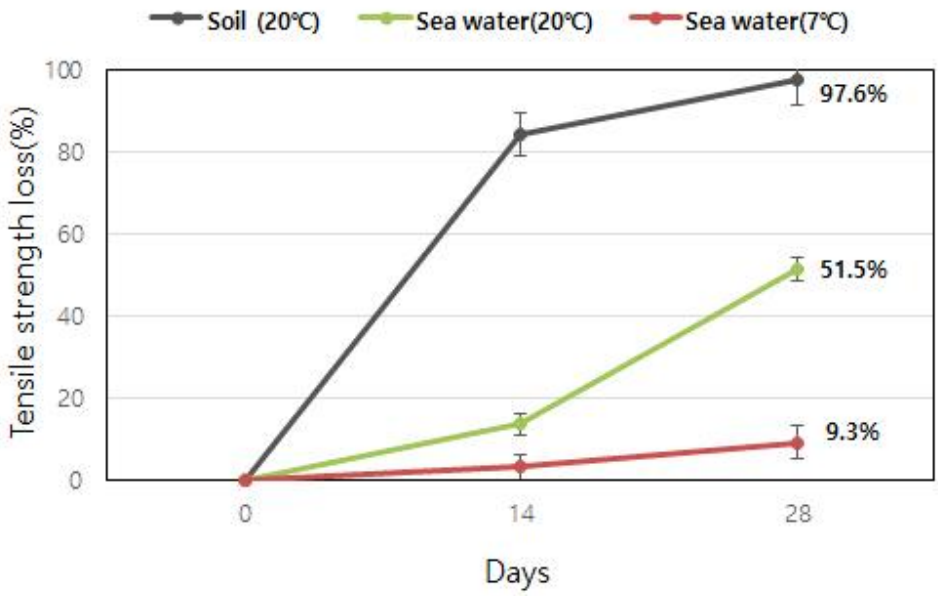


Figure 28. Biodegradability of the untreated cotton fabric (30Ne 130×68 twill) in different environmental conditions.

그 결과, 미처리 면직물(30Ne 130×68 Twill)을 토양에 매립하여 20℃ 온도에서 보관한 경우 해수에 비해 높은 인장강도 감소율이 나타났다. 본 실험에 사용된 배양토의 경우 천연흙, 톱밥, 쌀겨 등을 혼합하고 발효 과정을 거쳐 풍부한 미생물을 함유한 토양이며, 고형분 45%, 유기물 5%, 수분25%, 공기25%로 이루어져[32] 영양분과 수분, 산소 공급이 잘 이뤄졌기 때문에 미생물이 서식하기에 유리한 환경이라 사료된다. 반면 본 연구에 사용한 해수의 경우, 약 96.5%의 물과 3.5%의 염분으로 이뤄져[33] 토양에 비해 영양분 및 산소가 부족한 환경이며, 토양 및 해수에 존재하는 미생물의 종류가 다르기 때문이라 사료된다.[34]

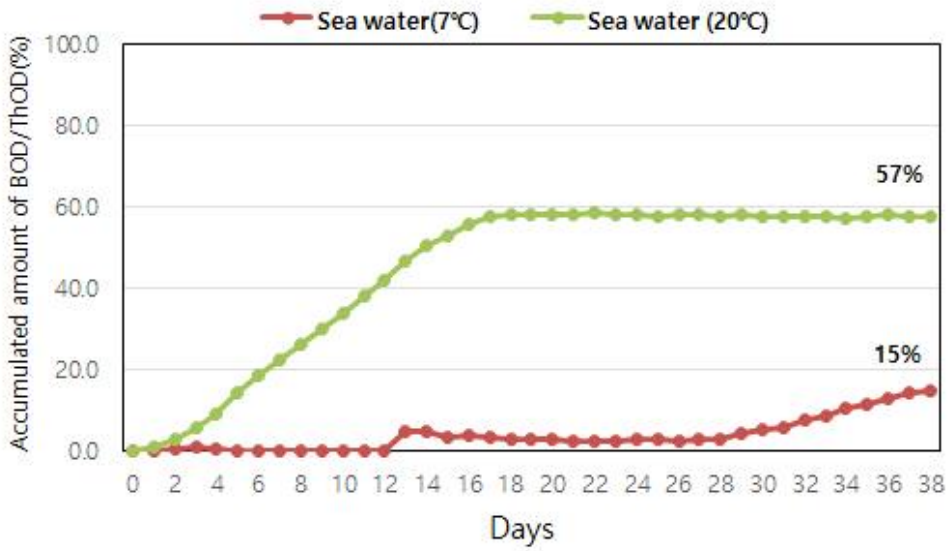


Figure 29. Biodegradability of the fibers released from untreated cotton fabric(30Ne 130×68 twill) in the sea water.

한편, Figure 29 과 같이 면직물 (30Ne 130×68 Twill) 세탁 후 방출된 섬유들의 산소요구량(BOD)을 측정한 결과, 인장강도 소실율 측정과 유사하게 7℃의 저온 해수에 비해 20℃의 해수에서 더 높은 생분해율이 나타났다. 이는 온도가 증가하면 섬유의 가수분해 속도가 증가하며, 저온에 서식하는 미생물의 경우, 높은 온도에 서식하는 미생물의 성장률에 다다르기 위해 더 많은 양의 용존 유기물질(DOM)이 필요하기 때문에[35], 같은 양의 용존 유기물질 조건 하에서 7℃의 낮은 온도에서는 미생물의 활성이 저하된 것으로 사료된다.

또한, 생분해 과정에서는 미생물이 분비하는 가수분해 효소의 작용으로

고분자 사슬이 저분자화 되는 1차 분해가 필수적이다. 이때, 미생물이 분비한 효소는 저온 적응력(cold adaptation)이 낮은 것으로 알려져 있으며[36], 특히 cellulose를 분해하는 효소인 cellulase의 최적 활성화 온도는 약 50℃이기 때문에[37] 7℃해수에 비해 20℃ 해수에서 효소의 활성이 증가하여 더 높은 생분해율을 보인 것으로 사료된다.

2.2 직물 종류에 따른 생분해성

또한 직물의 염색 및 가공에 따른 생분해성을 비교하기 위해 20℃ 해수 조건에서 미처리 면직물, 반응성 염색, 반응성 염색+발수가공 직물에서 방출된 섬유들의 산소요구량(BOD; biodegradable oxygen demand)측정을 통한 생분해율을 비교해봤을 때, Figure 30.과 같이 미처리 면직물에 비해 염색 및 발수가공 시료에서 낮은 생분해성을 나타냈다.

섬유의 생분해성은 보통 결정화도나 분자의 중합도, 섬유의 친수성 정도에 따라 다르며, 대부분의 고분자는 분자량과 결정화도, 중합도가 낮을수록, 그리고 친수성이 높을수록 생분해가 잘 일어나는 것으로 알려져 있다[14]. 본 연구에 사용된 염색 직물은 반응성 염색 및 유연제 처리가 된 직물이며, 반응성 염료는 주로 vinyl sulfone, chlorotriazine, trichloropyrimidine 등과 같은 작용기를 가지는 아조 화합물로서, 면섬유와 강한 공유결합을 형성하여 염착되며, 안정적인 방향족 분자구조를 가지고 있고 반응성 염료의 벌키한 구조로 인해 미생물의 접근이 어려워 생분해되기 어려운 성질을 갖기 때문으로 사료된다.[38][39] 또한 염색 시 유연제 처리가 함께 진행되고, 양이온 계면활성제인 유연제로 인해 발수성이 증가하고, 친수성이 감소하기 때문[40]에 미처리 면시료에 비해 낮은 생분해성을 나타낸 것으로 사료된다.

또한 본 연구에 사용된 발수가공 시료의 경우, 발수가공제로 탄화수소의 기본 골격 중 수소가 모두 불소로 치환된 C8계 과불화화합물을 사용하였다. 과불화화합물은 자연적으로 잘 분해되지 않는 난분해성 물질이며, 25℃의 증류수에서의 반감기는 약 55년으로 추정된다.[41] 일반적으로 미생물에 의한 가수분해는 효소와 수분이 분자와 많이 접촉할수록 더 잘 일어난다. 그런데 발수가공 시료의 경우, 불소의 낮은 표면에너지로 인해 효소나 수분의 침투가 어렵고[42] 면섬유가 분해되기 위해서는 효소에 의해 과불화화합물과 면 섬유 간 에스테르 결합이 끊어져 섬유로부터 발수제가 분리된 후에 섬유의 분해가 진행되기 때문에 생분해에 더 오랜 시간이 걸리는 것으로 사료된다.[43]

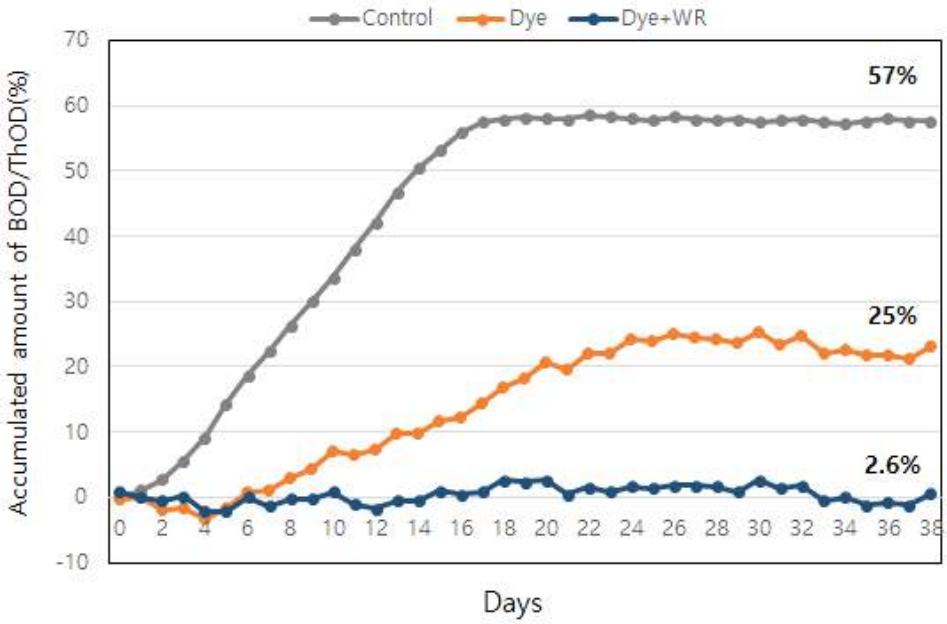


Fig 30. Biodegradability in 20℃ seawater of the specimens untreated, dyed, and water-repellent finished after dyed.

Ⅳ. 결론 및 제언

본 연구에서는 면직물의 기하학적 구조와, 가공 조건을 달리하여 세탁 중 섬유 방출 경향을 비교하였으며, 방출된 섬유들의 해수 중 생분해 거동을 비교하였다. 또한 각 시료 별 특성에 따라 세탁기 내 여과량과 배수구 배출량, 세탁에 의한 총 방출량을 비교하고 섬유 방출에 영향을 미치는 직물의 구조인자 및 직물의 물성을 도출하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 실과 직물의 밀도가 높고 경위사의 교차점이 많을수록 섬유 총 방출량이 감소하고, 세탁기 내 여과비율이 감소하며 짧은 길이의 섬유가 방출되었다.

2. 발수가공을 한 시료는 섬유의 총 방출량과 세탁기 내 여과비율이 감소하였으며 짧은 길이의 섬유가 방출되었다. 기모가공 시료는 섬유의 총 방출량은 증가하지만 세탁기 내 여과 비율이 높아 실제 방출량은 기모 가공을 하지 않은 직물과 비슷한 것으로 확인되었으며, 방출된 섬유의 길이가 긴 경향을 보였다.

3. 모든 시료들의 방출량을 종합한 결과, 본 실험 조건에서는 세탁기 내부 거름망에서 평균 16wt%의 섬유가 여과되며, 방출되는 섬유의 길이가 길수록 여과비율이 증가함을 확인하였다.

4. 섬유 방출에 영향을 미치는 직물의 구조적 요인과 물리적 특성을 규명하였으며, weave parameter 값이 작고 표면이 fuzzy할수록, 마모강도가 약할수록, 흡수성이 높을수록 섬유의 총 방출량이 증가하는 경향을 확인하였다.

5. 세탁에 의해 해수로 방출된 섬유들이 방출 환경에 따라 어떠한 생분해 거동을 보이는지 비교해본 결과, 미처리 면 시료는 토양환경에 비해 해수에서 낮은 생분해율을 보였으며, 표층 해수 온도인 20℃에서에 비해 심해온도인 7℃에서 낮은 생분해 거동을 보였다. 이는 토양 환경에 미생물이 생존하기 유리한 영양분을 더 많이 포함하고 있으며, 낮은 온도에서는 미생물 및 미생물이 방출하는 효소의 활성이 저하되기 때문이라 사료된다.

6. 반응성 염색 및 유연제 처리가 된 염색시료와 발수가공 시료는 미처리 면 시료에 비해 낮은 생분해율을 보였으며, 특히 발수 가공된 시료는 생분해 속도가 현저히 감소하는 경향이 나타났다. 이는 면 시료 표면에 결합된 반응성 염료와 발수 가공제가 자연적으로 잘 분해되지 않는 난분해성 물질이며, 해양 미생물이 면 시료에 접근하기 어렵고 효소 및 수분의 침투가 어렵기 때문에 생분해에 더 오랜 시간이 걸리는 것으로 사료된다.

직물 설계 시 실과 직물의 밀도를 높이고 경위사의 교차가 많도록 직물 구조를 조절하거나 세탁기의 여과 필터를 개선하여 섬유 방출량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 세탁 프로그램이나 부하량을 조절하는 추가적인 연구를 통해 섬유 방출 경향을 명확하게 제시하고 소비자들에게 섬유 방출을 줄이기 위한 방안을 제안하는 연구가 필요한 것으로 보인다.

참고문헌

[1] Lusher, A. L., Mchugh, M., & Thompson, R. C. (2013). Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. Marine pollution bulletin, 67(1-2), 94-99.

[2] Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources (pp. 2017-002). Gland, Switzerland: IUCN.

[3] Hernandez, E., Nowack, B., & Mitrano, D. M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. Environmental science & technology, 51(12), 7036-7046.

[4] Yang, L., Qiao, F., Lei, K., Li, H., Kang, Y., Cui, S., & An, L. (2019). Microfiber release from different fabrics during washing. Environmental Pollution, 249, 136-143.

[5] Hernandez, E., Nowack, B., & Mitrano, D. M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. Environmental science & technology, 51(12), 7036-7046.

[6] Cesa, F. S., Turra, A., & Baruque-Ramos, J. (2017). Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: a review from textile perspective with a focus on domestic washings. Science of The Total Environment, 598, 1116-1129.

[7] Mac Namara, C., Gabriele, A., Amador, C., & Bakalis, S. (2012). Dynamics of textile motion in a front-loading domestic washing machine. Chemical Engineering Science, 75, 14-27.

[8] 김성련. (2002). 세제와 세탁의 과학. 교문사, 서울, 169-170.

[9] Mercadé-Prieto, R., & Bakalis, S. (2013). Washing simulator rig to study the effect of abrasion on the removal of soils from fabrics.

Tribology Letters, 52(2), 175-183.

[10] Yun, C., & Park, C. H. (2016). The effect of fabric movement on washing performance in a front-loading washer III: Focus on the optimized movement algorithm. Textile Research Journal, 86(6), 563-572.

[11] Bae, J. H., Park, J. W., & An, S. K. (2005). The mechanical properties and hand of cotton fabrics with the variation of weft density. Science of Emotion and Sensibility, 8(4), 345-354.

[12] UNEP, G. Arendal.(2016). Marine litter vital graphics. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal. Nairobi and Arendal.

[13] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: a comprehensive review. Biotechnology advances, 26(3), 246-265.

[14] Park, C. H., Kang, Y. K., & Im, S. S. (2004). Biodegradability of cellulose fabrics. Journal of Applied Polymer Science, 94(1), 248-253.

[15] Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks. Environmental science & technology, 45(21), 9175-9179.

[16] Ladewig, S. M., Bao, S., & Chow, A. T. (2015). Natural fibers: a missing link to chemical pollution dispersion in aquatic environments.

[17] Remy, F., Collard, F., Gilbert, B., Compère, P., Eppe, G., & Lepoint, G. (2015). When microplastic is not plastic: the ingestion of artificial cellulose fibers by macrofauna living in seagrass macrophytodetritus. Environmental science & technology, 49(18), 11158-11166.

[18]Ming Lu, Ruyi Xie, Zulan Liu, Zhenyun Zhao, Hong Xu and Zhiping Mao. (2016). Enhancement in electrical conductive property

of polypyrrole-coated cotton fabrics using cationic surfactant. J ournal of Applied P olymer Science, DOI: 10.1002/APP.43601.

[19] 김성련. (2000). 피복재료학. 서울: 교문사, 284.

[20] Rabie, A. A. M., Weidong, Y., Yong-hong, Z., & Yong, H. (2016). Fabric-evoked prickle of fabrics made from single fibres using axial fibre-compression-bending analyzer. Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR), 41(4), 385-393.

[21] Luo, L., Wang, X. C., Guo, W., Ngo, H. H., & Chen, Z. (2012). Impact assessment of excess discharges of organics and nutrients into aquatic systems by thermodynamic entropy calculation. Journal of environmental management, 112, 45-52.

[23] Shirtcliffe, N. J., McHale, G., Newton, M. I., & Zhang, Y. (2009). Superhydrophobic copper tubes with possible flow enhancement and drag reduction. ACS applied materials & interfaces, 1(6), 1316-1323.

[24] Zupin, Ž., Hladnik, A., & Dimitrovski, K. (2012). Prediction of one-layer woven fabrics air permeability using porosity parameters. Textile Research Journal, 82(2), 117-128.

[25] Tahvildar, A., Ezazshahabi, N., & Mousazadegan, F. (2019). Appearance and comfort properties considering yarn-spinning system and weave structure in worsted woven fabrics. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 14, 1558925019845978.

[26] Tanaka, K. (1967). Effects of the Structure of Spun Yarns and Fabrics on Their Fuzz. Journal of the Textile Machinery Society of Japan, 13(3), 81-89.

[27] Srinivasan, J., Sengupta, A. K., & Kothari, V. K. (1992). Air-Jet Texturing of Spun Cotton Yarns for Improved Comfort: Part II: Texturability of Carded Spun Yarns Compared to Combed Spun Yarns. Textile Research Journal, 62(3), 169-174.

[28] Akgun, M., Becerir, B., & Alpay, H. R. (2010). Assessing the

relationship among fabric constructional parameters, fractional reflectances and cover factors of polyester fabrics by experimental and mathematical methods. Fibers and polymers, 11(2), 291-302.

[29] Morino, H., Matsudaira, M., & Furutani, M. (2005). Predicting mechanical properties and hand values from the parameters of weave structures. Textile Research Journal, 75(3), 252-257.

[30] 김수민, 박정희, & 임승순. (2002). 산소 플라즈마 처리가 폴리부틸렌숙시네이트의 친수성과 생분해성에 미치는 영향. 한국섬유공학회지, 39(4), 396-406.

[31] Kyrikou, I., & Briassoulis, D. (2007). Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. Journal of Polymers and the Environment, 15(2), 125-150.

[32]https://www.doopedia.co.kr/doopedia/master/master.do?_method=view&MAS_IDX=101013000863623

[33] Fred T. Mackenzie, Alyn C. Duxbury,(2020) Seawater. Encyclopædia Britannica.https://www.britannica.com/science/seawater

[34] Jones, E. G. (2000). Marine fungi: some factors influencing biodiversity. Fungal Divers, 4(193), 53-73.

[35] Wiebe, W. J., Sheldon, W. M., & Pomeroy, L. R. (1992). Bacterial growth in the cold: evidence for an enhanced substrate requirement. Applied and Environmental Microbiology, 58(1), 359-364.

[36] Reichardt, W. (1987). Differential temperature effects on the efficiency of carbon pathways in Antarctic marine benthos. Marine ecology progress series. Oldendorf, 40(1), 127-135.

[37] Pardo, A. G., & Forchiassin, F. (1999). Influence of temperature and pH on cellulase activity and stability in Nectria catalinensis. Revista Argentina de microbiologia, 31(1), 31-35.

[38] Aksu, Z. (2005). Application of biosorption for the removal of

organic pollutants: a review. Process biochemistry, 40(3-4), 997-1026.

[39] Varjani, S., Rakholiya, P., Ng, H. Y., You, S., & Teixeira, J. A. (2020). Microbial degradation of dyes: An overview. Bioresource Technology, 123728.

[40] 이혜원, & 박정희. (2001). 관리 방법에 따른 섬유소계 직물의 물리적 특성 변화 및 생분해성 평가. 한국의류학회지, 25(1), 173-182.

[41] Washington, J. W., & Jenkins, T. M. (2015). Abiotic hydrolysis of fluorotelomer-based polymers as a source of perfluorocarboxylates at the global scale. Environmental science & technology, 49(24), 14129-14135.

[42] Colin, G., Cooney, J. D., Carlsson, D. J., & Wiles, D. M. (1981). Deterioration of plastic films under soil burial conditions. Journal of Applied Polymer Science, 26(2), 509-519.

[43] Schellenberger, S., Jonsson, C., Mellin, P., Levenstam, O. A., Liagkouridis, I., Ribbenstedt, A., ... & Cousins, I. T. (2019). Release of side-chain fluorinated polymer-containing microplastic fibers from functional textiles during washing and first estimates of perfluoroalkyl acid emissions. Environmental Science & Technology, 53(24), 14329-14338.

Abstract

Effect of fabric properties on the fiber release and the marine biodegradation

Seoyoun Kim
Department of Textiles,
Merchandising and Fashion Design
The Graduate School
Seoul National University

The purpose of this study is to investigate the correlation of fiber emissions during washing with the fabric properties such as fabric structure and finishing. Furthermore, we studied the biodegradability of fibers in marine environment compared to those in soil burial and the impact of fabric properties on the biodegradability. The results showed that the fabric which has the higher density of yarn and fabric and the more compact weave structure released less amount of fibers and the length of released fibers tend to be shorter. Peach skin finish with microfibers exposed on the surface released more and longer fibers whereas water-repellent finish reduced the fiber emission and fiber length. It was confirmed that an average of 16wt% of fiber was filtered through the washing machine, and the filtration rate increased as the length of the discharged fiber

increased. The structural factors and physical properties of the fabric that influence the fiber release were analyzed, and the total amount of fiber emission decreased when the fabric has greater weave parameter, lower fuzziness , higher abrasion resistance and lower water absorbency. In addition, the fibers submerged in the 7℃ seawater showed a lower biodegradability compared with those submerged in 20℃ seawater or buried in soil. Also, water-repellent fabric was less biodegradable compared with the untreated one. Base on the results, different structure or finishing of fabrics could affect the amount of fiber emissions during washing and biodegradability in marine environment.

Keywords : Fiber release during washing, Washing machine filtration, Weave parameter, Biodegradation,

Student number : 2019-28391