

초음파 세탁과 가정 세탁의 세척성과 직물변형 비교

황나원 · 정혜원^{1)†} · 이광우[†]

경북대학교 섬유패션디자인학부

¹⁾인하대학교 의류디자인학과

Comparison of Detergency and Fabric Deformation between Ultrasonic and Home Laundry

Nawon Hwang, Hae-won Chung^{1)†}, and Kwang-Woo Lee[†]

School of Textile & Fashion Design, Kyungpook National University; Sangju, Korea

¹⁾Dept. of Clothing and Textiles, Inha University; Incheon, Korea

Abstract: In this study, the efficacy of ultrasonic washing in cotton and wool fabrics was compared and evaluated against conventional washing in terms of cleaning properties and fabric deformation. Factors such as washing temperature, time, liquid ratio, and detergent concentration were kept varied, and the cleaning properties of sebum-soiled fabrics were assessed using different detergents such as alcohol ethoxylate, linear alkylbenzenesulfonate, and IEC 60456 Reference Detergent A*. In addition, the effects and emulsification power of enzymes and oxygen bleach were examined. To compare the cleaning properties with general washing, a launder-O-meter was used. To investigate fabric deformation during the washing process, the loosening test cloth, shrinkage test cloth, and mechanical strength test cloth were compared between ultrasonic washing machines and household drum washing machines. The results indicate that ultrasonic washing exhibits superior cleaning properties than launder-O-meter when the temperature is low and the washing time is short. Furthermore, there is less deformation and damage during the washing process. It was also observed that the activity of the detergent increases when ultrasonic waves are applied to the washing process. Considering the increasing tendency to pursue convenience and simplicity in clothing management as well as the anticipated commercialization of smart clothing with built-in electric circuits, ultrasonic laundry could serve as a new alternative to existing laundry methods.

Key words: ultrasonics (초음파), detergency (세척성), sebum soiled fabrics (피지 오염포), blood soiled fabrics (피 오염포)

1. 서 론

액체에 초음파 에너지를 가하면 초음파 파장에서 정압과 부압이 반복적으로 나타나는데 압력이 낮아지면 주변 매질 밀도가 낮아지면서 분자 사이의 거리가 넓어지고 액체 속의 기체가 빠져 나와 빈 공간이 생기며 캐비테이션 버블(Cavitation bubbles)이 만들어진다(Azar, 2009; Cutler & Davis, 1972; Mason, 1997). 캐비테이션 버블 폭발 과정 중에 충격파가 생성되면서 압력과 온도가 상승하는데(Fuchs, 2004; Moholkar & Warmoeskerken, 2004) 이때 고체와 액체, 액체와 액체 시스템

에서 효소처리의 물리적, 화학적 효과를 증가시키고 초음파 캐비테이션에 의한 섬유, 효소, 액체의 계면에서의 강한 교반은 섬유표면을 향한 효소 분자의 이동을 실질적으로 향상시켜 기존 방법과 비교해 작업시간을 효과적으로 단축시키므로 물질 이동을 촉진시키기 위해 섬유 가공 단계에서 초음파로 처리하기도 한다(Sonochemistry”, n. d.; Warmoeskerken, 2002). 캐비테이션 버블 붕괴시 생성된 공백을 메꾸기 위해 주변 유체의 흐름이 빨라지면서 강력한 충격파가 만들어지고 이 충격파에 의해 이물질 사이에 균열이 발생하고 그 틈으로 버블들이 침투해 표면에서 이물질을 분리하여 제거할 수 있고 진동하는 버블에 의해 유체의 흐름이 가속화되어 오염물질을 제거한다(Blackstone-ney ultrasonics, 2009). 세척 시스템에 도입한 초음파 에너지는 수용성 오구의 용해나 불용성 오구의 이동을 촉진시키고 화학반응의 효과를 촉진시킨다(Kanegsberg & Kanegsberg, 2011). 초음파 에너지를 세탁에 이용한 선행 연구들을 살펴보면, 초음파 세탁과 세탁기 세탁의 세척력이나 직물의 손상 및 변형을 비교하는 연구가 많다. 울레인산과 카본블

†Corresponding author: Hae-won Chung and Kwang-Woo Lee

Tel. +82-54-530-1312

E-mail: hwchung@inha.ac.kr / lkw@knu.ac.kr

©2023 Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

락으로 오염된 면, 폴리에스터, T/C 직물을 음이온 계면활성제 세액에 주파수가 38kHz인 초음파로 세탁하였다니 표준 시험용 드럼세탁기 세탁을 한 경우보다 손상은 적으면서 세척성이 우수하다고 하였다(Gotoh et al., 2015b; Gotoh & Harayama, 2013). 또 면, 견, 양모, 레이온, 나일론, 폴리에스터 원단을 올레인산과 카본블랙으로 오염시키고 물로만 세탁하거나 음이온 계면활성제로 세탁하면 표준 시험용 드럼 세탁기 세탁과 비교하였을 때 세척성은 좋으면서 손상 역시 적었다고 하였다(Gotoh et al., 2015a). 이 외에 커피, 와인, 환타, 오일로 오염시킨 견직물을 28kHz의 초음파세척기로 세탁하면 드럼세탁기로 세탁하였을 때보다 오구를 11.6~28.8% 더 많이 제거하면서 인장강도와 치수의 변형은 적었으나 약간의 색바래 현상이 나타난다고 하였다(Ma et al., 2014). 커피, 차, 와인, 엔진오일, 오렌지 주스로 오염시킨 양모직물을 약 40kHz의 초음파로 세탁하면 손으로 세탁한 것보다 직물의 두께나 수축과 같은 변형이 적으면서 세척성은 비슷하였고 초음파 세탁한 직물에서만 섬유 미세균열이 발견되었고 인장강도는 손세탁한 직물과 큰 차이가 없었으며 섬유 표면 균열의 균일성을 확인하기 위해 염색한 결과 미세균열로 인해 염색성은 더 우수하였다(Hurren et al., 2008). 폴리에스터와 면/폴리에스터 혼방 소재로 된 의사의 수술용 가운을 혈액으로 오염시키고 47 kHz의 초음파 에너지로 세탁하였는데, 기존의 세탁방법은 혈액오염을 완전히 제거하려면 30분의 시간이 필요했지만 초음파 세탁은 15분만으로도 충분하였고 직물의 강도 손실도 적었다고 하였다(Canoğlu et al., 2004). 초음파에너지는 불규칙한 표면이나 틈새의 오구를 제거하는데 브러쉬나 스프레이보다 효과적인 것으로 알려져 있다(Hurren et al., 2008). 세탁은 주로 세탁기내 물살로 인한 직물 사이의 마찰이나 굵힘에서 얻어지는 물리력으로 이뤄지는데 초음파 세탁은 세탁기 안에 여러 벌의 옷을 쑤셔 넣을 필요가 없고 세탁기 세탁처럼 수류가 발생하지 않으니 세탁물의 회전이나 교반, 낙차로 인한 직물 변형이나 직물 표면 마찰이 일어나지 않을 것이다. 또한 직물은 실 사이나 실 내부로 오구가 확산되기 쉬워 캐비테이션 버블이나 마이크로스트리밍이 세탁기의 수류보다 더 효과적으로 오염을 제거할 수 있을 것이다.

옷은 면, 마, 모, 견 같은 천연섬유뿐 아니라 레이온, 폴리에스터, 나일론, 아크릴과 같은 인조섬유, 최근에는 금속이나 전자 소재로도 만들어지고 있다(Seo, 2017). 앞으로는 외부 자극을 감지하고 반응하고 네트워크에 접속해 정보까지 전달하는 디지털센서가 내장된 고기능성 섬유로 만든 스마트 의류가 상용화될 것이다(Park, 2019). 하지만 이러한 스마트 의류는 전자센서와 전기회로가 내장되어 있어 세탁 중의 잦은 마찰로 의뢰 고장이 날지도 모른다는 불안이 있다. 과학기술이 발달하면서 옷에 쓰이는 소재가 날로 새로워지고 다양한 소재가 혼재된 의류를 만드는 경우가 많아 앞으로는 지금보다 직물의 손상과 변형이 적은 세탁방법이 필요할 것이다. 가정에서 의류를 세탁하는 대표적인 기기인 수평 드럼식 세탁기는 고온 세탁이 가능하고 적은 물 소비량에도 세척력이 좋고 세탁물에 가해지는 기계

력이 적어 세탁 중 섬유 손상이 적다는 장점이 있는 대중적인 세탁방법이다(Kim, 2002). 세탁기를 사용한 세탁에서 섬유의 손상 정도를 확인하기 위해 와류식과 드럼식 세탁기로 표준 코스에서 남성용 셔츠 14개와 표준인공오염표를 세탁한 결과, 와류식은 56%, 드럼식은 39%의 영킴도를 보였고 섬유 손상도는 와류식이 11%, 드럼식은 10%를 보였다(Paio & Park, 2013). 이처럼 세척조의 회전으로 인한 세척물의 낙차로 세탁이 이루어져 세척물의 손상이 적다고 알려진 드럼식 세탁기조차 세척조의 회전으로 생성된 수류와 낙차로 만들어진 직물의 충격과 직물 사이의 마찰로 세탁물에 적지 않은 손상을 입히므로 스마트 의류의 세탁에는 적합하지 못할 것임을 추측할 수 있다(Kim, 2002). 섬유의 손상과 변형을 줄이고 의복 본래의 수명을 유지하기 위해, 세척성은 유지하면서 손상과 변형이 적은 세탁이 요구된다. 하지만 지금까지의 연구에서 초음파 세탁에 대부분 음이온 계면활성제만이 세제로 사용되었고, 효소와 표백제 또한 직물의 습윤공정을 제외하면 초음파 세탁에 사용된 경우는 거의 없다. 따라서 초음파 세탁시 여러 세제 성분으로 인한 세척성을 비교하는 연구가 필요하다. 그리고 초음파를 세제와 함께 사용하면 초음파만으로 세탁한 경우보다 세척효과가 우수하는데 세탁은 물리적 작용 말고도 세제성분의 화학적 작용으로도 이뤄지기 때문에, 세제만의 순수한 세척력과도 비교한다면 초음파만의 세척효과를 확실하게 알 수 있을 것이다. 또한 초음파 실험에는 대부분 올레인산과 그의 지표로 카본블랙이 오구로 많이 쓰였으나, 의복의 오구는 대부분 피지와 피부 단백질 탈락물이기 때문에 오구의 선택면에서 실질적인 세척성 비교하기에 제한적이다.

본 연구는 초음파를 이용한 세탁이 가정 세탁에 비해 얼마나 효과적인지를 알아보기 위해 초음파세척기와 룬도미터를 이용하여 지용성 면오염포의 세척성을 비교하였으며 초음파 세탁은 세탁 중 수류의 영향이 거의 없으므로 담금 세탁과의 세척성도 비교하였다. 그리고 가정용 세탁이 까다로운 양모오염포의 세척성 또한 비교하였다. 여기에 단백질 오염포로 표백제와 효소의 세척 효과를 비교하고자 하였다. 효소로는 세제에 일반적으로 많이 사용되는 프로테아제를 사용하였다. 초음파 에너지가 세액의 성질에 미치는 영향을 확인하고자 세액에 유동파라핀을 첨가하고 초음파나 룬도미터에서 처리한 후 유화력을 측정하여 비교하였다. 또한 초음파 세척기와 가정용 드럼 세탁기로 세탁한 후 직물의 손상과 변형을 비교하기 위해 올풀림 시험포, 수축성 시험포, 기계력 시험포를 세탁하고 직물 변형을 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시료 및 기구

2.1.1. 시료

Sebum과 pigment로 오염시킨 면 오염포(EMPA 118, EMPA Testmaterials AG, Switzerland)와 양모 오염포(Wfk 60012, Wfk-

Table 1. Specimens for fabric deformation test

Type of test fabric	Model	Fiber	Density (Warp X Weft/inch ²)	Weight (g/m ²)
Fraying	EMPA 304	Polyamide 100%	43 × 43	85
Shrinkage	EMPA 318	Wool 100%	29 × 30	150
Mechanical action	Wfk 11801	Cotton 100%	64 × 64	175

Testgewebe GMBH, Germany)는 세탁 조건에 따른 세척성을 비교하는 실험에 사용하였고 blood, ink, milk로 오염시킨 면오염포(EMPA 116, EMPA Testmaterials AG, Switzerland)는 표백제와 효소 사용시의 세탁 방법에 따른 세척성 비교 실험에 사용하였다. 재오염을 확인하기 위해 KS K 0905 규정을 따른 표준백면포를 10% 탄산나트륨 수용액에 2 시간 동안 끓여 정련한 후 건조시켜 사용하였다.

세탁 중 직물 변형을 평가하기 위한 시험포의 조건은 Table 1에 제시하였다. 올플림 시험포와(EMPA 304, EMPA Testmaterials AG, Switzerland), 수축 시험포 (EMPA 318, EMPA Testmaterials AG, Switzerland), 기계력 시험포 (Wfk 11801 MA Testpiece, Danish Textile institute, Denmark)을 사용하였다.

드림세탁시 세탁무게를 맞추기 위해 IEC 60456 규정에 따른 100% 면 베갯잇(EMPA 353, EMPA Testmaterials AG, Switzerland)과 수건(EMPA 351, EMPA Testmaterials AG, Switzerland)을 사용하였다.

2.1.2. 시약

세탁방법에 사용한 시약은 다음과 같다.

중질세제로 IEC 60456 Reference Detergent A*(이하 Detergent A; EMPA Testmaterials AG, Switzerland)와 중성세제로 울삼푸(Aekyung, Korea), 비이온계면활성제로 Alcohol ethoxylate (이하 AE; C12, EO = 7, (주)동남합성, Korea), 음이온계면활성제로 Linear alkylbenzensulfonate (이하 LAS; Tokyo Kasei Kogyo Co., Japan), 산소계 표백제로 옥시크린(옥시 레킷 벤키저, Korea), 단백질 분해효소인 Savinase 12T(Novozymes, Denmark) 그리고 이외에 효소의 활성을 높이고자 염화칼슘(CaCl₂ 95%, 덕산화학, Korea)을 사용하고 표백제 산화력을 측정하고자 0.1N의 과망간산칼륨 수용액(KMnO₄, 삼진화학, Korea)을 사용하였다. 실험에 사용한 물은 모두 증류수이며 사용한 시약은 모두 1급 이상이였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 세탁 방법

초음파 세탁: 업체에서 제시하는 기준에 따라 초음파 세척기(UIL-DHP20040, Uil Ultrasonics, Korea) 세척조에 증류수 7L를 넣고 비슷한 세척성을 가진 2곳의 지점을 선택하여 250 mm 비커를 설치하였으며 동일한 높이와 위치를 유지하도록 고정하였다. 이 비커 안에 세액 50 ml와 5 × 5 cm² 오염포(0.5 g)를 아크릴링으로 고정하였다. 아크릴링은 외경 60 mm, 내경 45 mm, 두께는 3 mm로 비커 내부에 맞는 크기였다. 세

척시 초음파는 3단계로 설정하였으며 초음파 세기는 5.1 mV이였다. 기본 세탁 온도는 25°C, 세탁시간은 20분, 액비는 1:100, 세제 농도는 0.1%이였다. 효소와 표백제 첨가 세탁시에는 세액에 효소 또는 산소계 표백제를 첨가하여 단백질 오염포를 25°C에서 20분간 세탁하였다. 효소의 농도는 60 ppm이였으며 효소의 활성도를 높이기 위해 세액에 염화칼슘 50 ppm을 첨가하였다. 산소계 표백제는 0.1%를 세제에 추가하였다.

룬더오미터 세탁: 500ml 용량의 스텐리스스틸 포트에 1매의 5 × 10 cm² 오염포와 10개의 스텐리스스틸 구슬, 100 ml의 세액을 넣어 42 rpm 조건으로 룬더오미터로(ASA-202-3, Asia testing machines, Korea) 세탁하였다. 기계력을 제외한 담금 세탁은 250 ml 비커에 50ml 세액에 5 × 5 cm² 오염포를 넣었다. 룬더오미터와 담금 세탁시의 세탁조건은 초음파 세탁과 동일하였다.

담금 세탁: 초음파 세탁과 동일한 조건에서 기계력을 가하지 않고 진행하였다.

세탁한 시료는 모두 증류수 100 ml에 2회 가볍게 헹군 뒤 상온에서 건조시켰다.

2.2.2. 세척성평가

세척성은 세탁 전·후 시료의 표면을 색차계(Color i5, X-rite, USA)로 520nm에서 측정된 K/S 값을 이용하여 식 (1)로부터 구하였다. K/S값은 Kubelka-Munk 식으로부터 얻는다.

$$\text{세척성(\%)} = \frac{(K/S)_S - (K/S)_W}{(K/S)_S - (K/S)_O} \times 100 \quad (1)$$

(K/S)_o: 원포(백포)의 K/S

(K/S)_s: 오염포의 K/S

(K/S)_w: 세탁 후 오염포의 K/S

재오염성은 재오염 전과 후의 시료의 표면 반사율을 측정하여 K/S값을 구하고 식(2)에 따라 계산하였다.

$$\text{재오염성(\%)} = \frac{(K/S)_{OW} - (K/S)_O}{(K/S)_O} \times 100 \quad (2)$$

(K/S)_o: 원포(백포)의 K/S

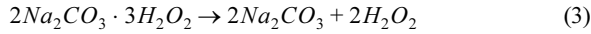
(K/S)_{ow}: 재오염포의 K/S

모든 세탁은 4회이상 반복하였고 평균과 편차를 구하였다.

2.2.3. 표백력 평가

표백력 평가는 사용된 과산화수소의 양으로 나타내었다(Heo

et al., 2013). 산소계 표백제에서 과탄산나트륨이 세액 안의 물과 반응하여 과산화수소가 되는 과정은 식 (3)과 같다.



초음파, 룬더오미터, 담금 세탁에서 소모된 과산화수소의 양을 비교하고자 단백질 오염포를 25°C 또는 40°C에서 액비 1:100조건으로 20분간 세탁하고 세탁 전과 후에 남아 있는 세액 안의 과산화수소의 양을 측정하였다. 사용한 표백제 수용액을 1/20로 희석하여 500 ml 삼각 플라스크에 희석한 50 ml 표백제 수용액, 30 ml 황산 수용액, 250 ml 증류수를 담고 0.1 N 과망간산칼륨 수용액으로 적정하였다. 이때, 1 ml의 0.1 N 과망간산칼륨 수용액은 0.0017 g의 과산화수소와 반응하므로 식(4) 따라 사용된 과산화수소의 양을 1L 기준으로 계산하였다.

$$\text{소모된 } H_2O_2(\text{g/L}) = 0.0017 \times (T_o - T_w) \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times 20 \quad (4)$$

T_o : 세탁 전 KMnO4의 적정 수용액의 부피(ml)

T_w : 세탁 후 KMnO4의 적정 수용액의 부피(ml)

2.2.4. 유화력 평가

유화력 평가 방법은 Kim(2002)의 저서에서 언급된 방법을 연구내용에 맞춰 일부 변형하였다. 초음파나 룬더오미터 세탁시의 유화력을 비교하고자 세액으로 증류수, 0.1% AE 수용액, 0.3% LAS 수용액, 0.1% Detergent A* 수용액을 사용하여 49.5 ml 세액에 0.5 ml 유동 과라핀을 담고 25°C에서 초음파 세척기나 룬더오미터로 20분간 처리하였다. 처리 후 수용액의 20ml를 메스실린더에 담고 25°C에서 24시간동안 보관하고 얻어진 유화층의 부피로부터 식(5)에 따라 유화력을 계산하였다.

$$\text{유화력}(\%) = \frac{V_f}{V_t} \times 100 \quad (5)$$

V_t : 전체 액의 부피

V_f : 유화층의 부피

2.2.5. 직물변형과 손상 평가

세탁시 직물변형과 손상을 평가하고자 울풀림 시험포, 수축성 시험포, 기계력 시험포와 스텐리스스틸혼방직물을 초음파나 수평 드럼식 세탁기 (WD-197ACGRSU1, Samsung Electronics, Korea)의 섬세코스 반복하여 10회까지 세탁하였다. 드럼세탁기에서 섬세코스는 31분 분세탁, 12분 행굼 2회, 6분 탈수과정으로 진행되었고, 사용된 물의 양은 세탁 22 L, 2회 행굼 각각 28 L, 25 L이었고 탈수 속도는 500 rpm이었다. 세탁시 직물의 무게는 시료와 함께 무게조정용포로 2 kg이 되도록 맞추었다. 중성세제를 권장 농도 기준하에 30.8 ml를 넣었다. 초음파 세탁시에는 초음파 욕조에 9.8 ml 중성세제와 7L의 물을 넣고 울 섬세코스의 세탁시간과 동일하게 31분 세탁하고 물로 2회 행구었다. 세탁용수는 온도는 25°C로 조절하였다. 세탁이 끝나면

평평한 스텐리스스틸 망사판 위에 직물을 두고 상온에서 건조시켰다. 울풀림 시험포는 세탁 후에 풀어진 경사, 위사의 수를 세어 더하였다. 수축성 시험포는 시료에 표기된 경사방향 3지점과 위사 방향의 3 지점의 세탁 전후의 길이를 0.5mm까지 측정하고 식(6)에 따라 수축율을 계산하였다.

$$\text{수축율}(\%) = \frac{L_o - L_w}{L_o} \times 100 \quad (6)$$

L_o : 세탁 전의 길이

L_w : 세탁 후의 길이

기계력 시험포는 세탁이 끝나고 구멍의 울이해진 수준을 사진에서 비교하였다. 양모 오염포의 세탁 전과 후에 직물 표면의 변화를 15 kV, 50배율 조건으로 SEM(SEM 4300, HITACHI, Japan) 이미지를 촬영하여 비교하였다.

3. 실험결과

3.1. 온도의 영향

온도별로 세탁 방법에 따른 세척성을 비교하고자 25°C, 40°C, 60°C에서 오염포를 20분간 세탁하였고 결과는 Fig. 1에 제시하였다. 세탁 방법과 세액의 종류에 관계없이 세탁온도가 커지면 세척성도 증가하였다. 25°C에서의 세척성을 비교하면 물, AE, LAS 수용액에서 초음파 세탁 세척성이 가장 컸다. Detergent A* 수용액에서 룬더오미터에서의 세탁보다 초음파 세탁의 세척성이 더 컸다. 40°C일 때, 초음파 세탁은 담금 세탁보다는 세척성이 우수하고 룬더오미터의 세척성과는 비슷하였다. 60°C에서의 초음파 세탁은 물, AE, LAS 수용액에서 룬더오미터에서의 세척성이 비슷하였고 detergent A* 수용액에서 룬더오미터에서보다 세척성이 낮았다. 25°C 세탁에서 초음파 세탁이 룬더오미터에서보다 세척성이 컸는데, 40°C 이상의 세탁에서 룬더오미터보다 초음파 세탁의 세척성이 더 크거나 비슷하였다. 온도가 증가하면 섬유와 오구의 결합력이 약해지고 세제와 오구의 분자운동이 활발해져 세척성이 증가하는 것이 일반적이지만 초음파 세탁은 세액의 온도가 증가하면 용존가스가 증가하고 캐비테이션 버블 안으로 용존가스가 들어가 폭발시 충격이 줄어들어 캐비테이션의 강도도 줄어들기 때문에 온도를 증가시켜도 세척성이 크게 증가하지는 않는다(Niemczewski, 2014). 그래서 초음파 세탁은 40°C에서의 세척성이 25°C보다는 더 컸지만 60°C 세탁과는 세척성 차이가 크지 않았다. 25°C에서의 초음파 세탁의 세척성과 40°C에서의 룬더오미터에서의 세탁의 세척성은 비슷하였다. 저온 세탁은 세척성이 낮다고 알려져 있는데 저온세탁에 초음파 에너지를 도입한다면 에너지 효율면에서 훌륭한 세탁 대안이 될 것이다.

3.2. 시간의 영향

세탁 시간에 따른 세탁 방법별 성능을 비교해보고자 세탁 시

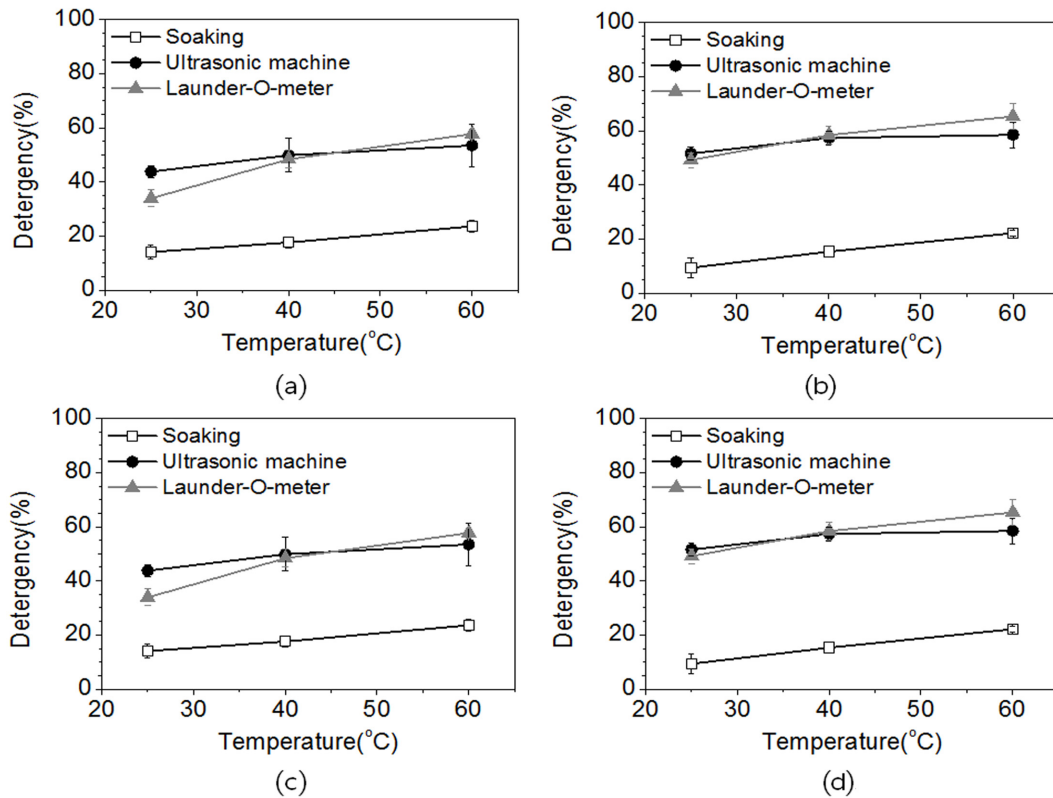


Fig. 1. Effect of temperature on the detergency depending on the washing method(20min); (a)Water, (b)0.1% AE, (c)0.3% LAS, (d) 0.1% Detergent A*.

간 10분, 20분, 40분에서 오염포를 세탁한 다음 세척성을 비교하였고 그 결과는 Fig. 2에 제시하였다.

담금시 10분에서 20분까지 세탁시간을 늘리면 세척성이 커졌으나 40분 이후엔 세척성이 오히려 감소하였다. 초음파 세탁 탠 물에서 20분 세탁의 세척성이 가장 크고 40분 세탁은 20분 세탁보다 세척성이 줄었다. AE, LAS, detergent A* 수용액에서 세탁시간을 10분에서 20분까지 늘리면 세척성은 커졌으나 40분까지 늘리면 되려 세척성이 줄었다. 룬더오미터 세탁은 물에서 20분 세탁의 세척성이 가장 컸고 40분세탁은 세척성이 감소하였다. AE 수용액에서 40분 세탁의 세척성이 가장 낮았고 LAS와 detergent A*수용액은 세탁시간이 늘어나면 세척성도 커졌으나 20분과 40분 세탁에서의 세척성 차이는 크지 않았다.

담금과 초음파 세탁시 20분 세탁보다 40분 세탁에서 시간 증대로 인한 세척 효과가 적은 이유를 확인하고자 오염포를 표준백면포와 함께 세탁하여 표준 백면포의 재오염성을 조사하였고 Fig. 3에 제시하였다.

그 결과, 처리 시간이 늘어날수록 재오염성도 증가하였다. 담금과 룬더오미터세탁에서도 재오염이 확인되었지만 초음파 세탁의 재오염이 가장 심각하였고 룬더오미터는 재오염이 가장 적었다. 이는 담금과 초음파 세탁과 달리 룬더오미터는 물살이 강해 세액과 오구의 계면에서 교반이 잘 일어나기 때문이다. 그래서 초음파 에너지 처리시 염색도 잘 되어 세척 외에 염색에도

종종 적용된다(McNeil & McCall, 2011; Vankar & Shanker, 2008). 마찬가지로 탈락한 오구가 직물에 잘 부착할 수 있다. 초음파 세탁은 오구가 재부착하기보다 탈락되어 제거되는 경우가 더 많지만 일정 시간이 지나면 오히려 부정적 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다. 시간별로 세탁 방법에 따른 세척성을 비교하면, 10분 세탁에서 물과 detergent A* 수용액에서 담금 세탁의 세척성이 가장 작았고 초음파와 룬더오미터 세탁의 세척성은 비슷하였다. AE, LAS 수용액에서 룬더오미터에서의 세탁의 세척성이 가장 컸다. 하지만 20분 이상의 세탁시 물, AE, LAS 수용액에서 초음파 세탁의 세척성이 가장 컸다. Detergent A* 수용액에서 10분 세탁과 유사하게 담금 세탁의 세척성이 가장 작았고 초음파와 룬더오미터세탁의 세척성은 유사하였다.

이 결과를 통해 초음파 세탁은 20분 이상의 세탁에서는 재오염 때문에 세척성이 떨어질 수 있으므로 초음파 세탁은 20분 행할 때 가장 효과적임을 확인할 수 있다.

3.3. 액비의 영향

담금세탁시 물, LAS, detergent A* 수용액에서 액비 증가로 인한 세척성 증대가 눈에 띄지 않았다. AE 수용액에서 액비 1:100의 세척성이 가장 높았으나 초음파 또는 룬더오미터에서의 세척성의 1/2 수준이었다. 초음파 세탁은 액비가 늘어날수록 세척성도 커졌으며 룬더오미터 세탁은 액비 1:50에서의 세

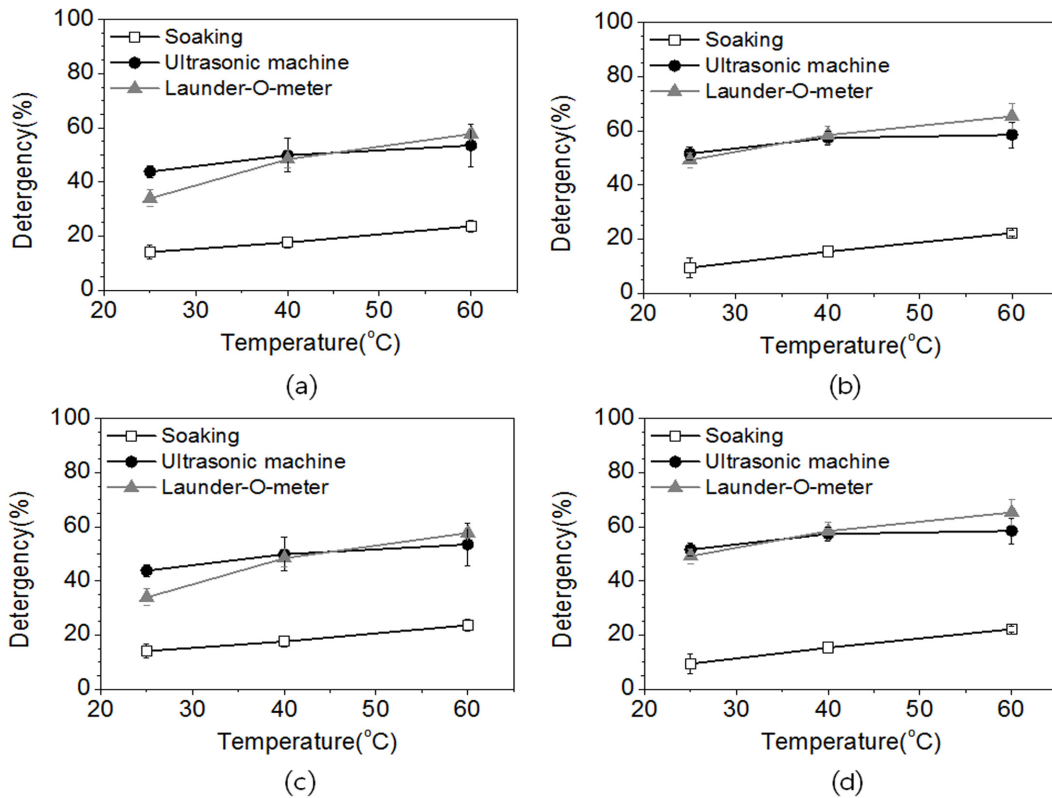


Fig. 2. Effect of time on the detergency depending on the washing method(25°C); (a)Water, (b)0.1% AE, (c)0.3% LAS, (d)0.1% Detergent A*.

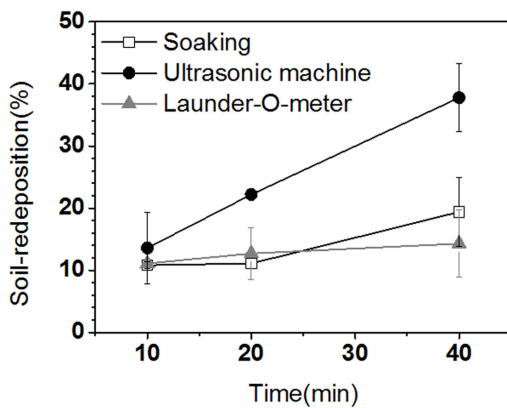


Fig. 3. Effect of time on the soil-redeposition depending on the washing method(water, 25°C).

척성이 가장 컸고 1:100에서 세척성이 되려 감소하였다. 액비별 세탁 방법에 따른 세척성을 비교하면, 액비 1:20일 경우 물, AE, detergent A* 수용액에서 담금 세탁의 세척성이 가장 작았고 초음파와 룬더오미터 세탁의 세척성은 비슷하였다. LAS 수용액에서 초음파 세탁의 세척성이 가장 컸다. 액비 1:50일 때 물과 detergent A* 수용액에서 룬더오미터세탁의 세척성이 가장 높았고 초음파 세탁은 그 다음이었다. AE, LAS 수용액에서 초음파와 룬더오미터세탁의 세척성은 비슷하

였다. 액비 1:100일 때 물, AE, LAS 수용액에서 초음파 세탁의 세척성이 가장 높았으며 detergent A* 수용액에서 초음파와 룬더오미터세탁의 세척성은 비슷하였다. 이를 바탕으로 초음파와 담금 세탁은 액비가 늘어나면 오구의 농도가 상대적으로 낮아져 재오염이 덜 일어나므로 세척성이 커지고 룬더오미터세탁의 경우 액비 1:100에서 세척성이 감소하는데 세탁량에 비해 세액이 많아 세탁물 사이의 마찰이 작아져 세탁효과가 감소한 것으로 보인다.

3.4. 세제농도의 영향

다양한 세제농도 범위에서 세탁 방법에 따른 세척성을 비교하고자 증류수, 0.1% 또는 0.3% 세제용액에서 지용성 오염포를 세탁하고 세척성을 비교하였고 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

AE 수용액에서, 담금과 초음파 세탁은 0.1% 세액에서 세척성이 가장 높았으며 0.3% 세액에서는 감소하였다. 룬더오미터 세탁은 세제 농도가 늘어날수록 세척성도 커졌으나 0.1%와 0.3% 세액의 세척성은 비슷하였다. LAS 수용액에서, 세제 농도가 늘어날수록 세척성도 커졌으나 초음파와 룬더오미터세탁에서의 세척성은 비슷하였다. Detergent A* 수용액에서, 세제 농도가 늘어날수록 세척성이 커졌지만 초음파와 룬더오미터세탁의 세척성은 비슷하였다.

다양한 농도의 세액에서 세탁 방법에 따른 세척성을 비교하

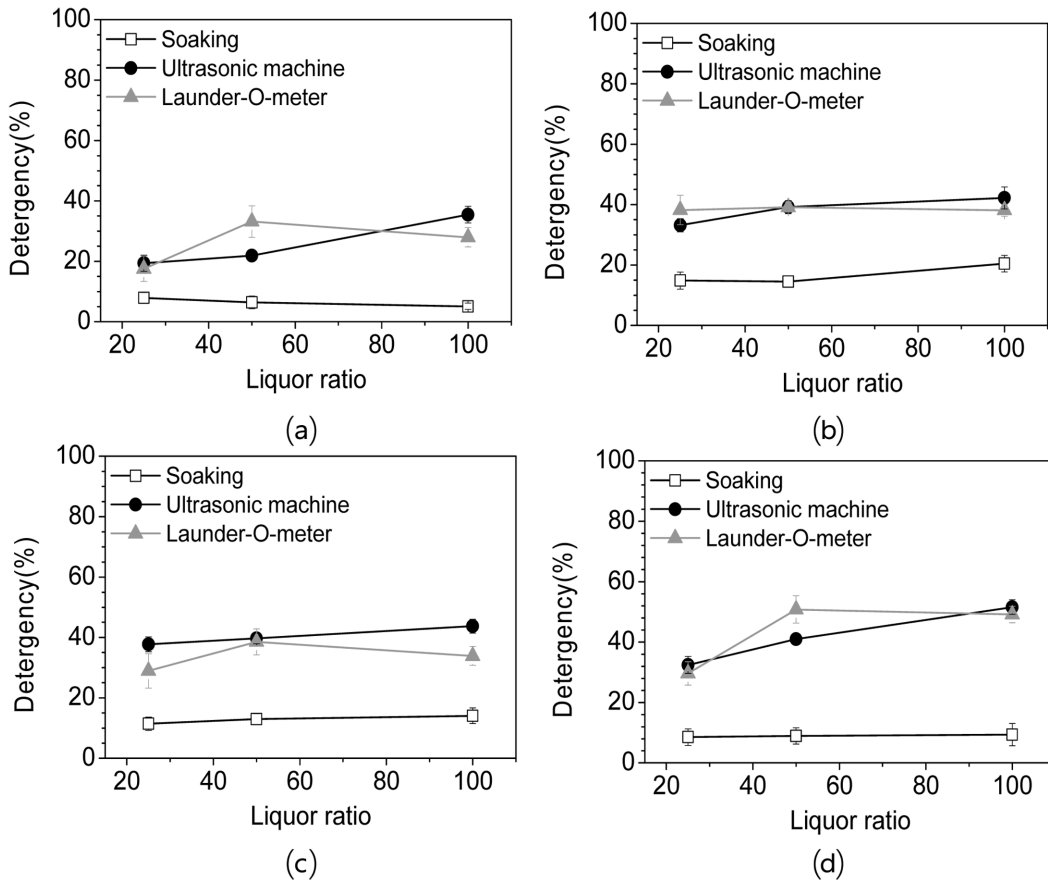


Fig. 4. Effect of liquor ratio on the detergency depending on the washing method(25°C, 20min); (a)Water, (b)0.1% AE, (c)0.3% LAS, (d)0.1% Detergent A*.

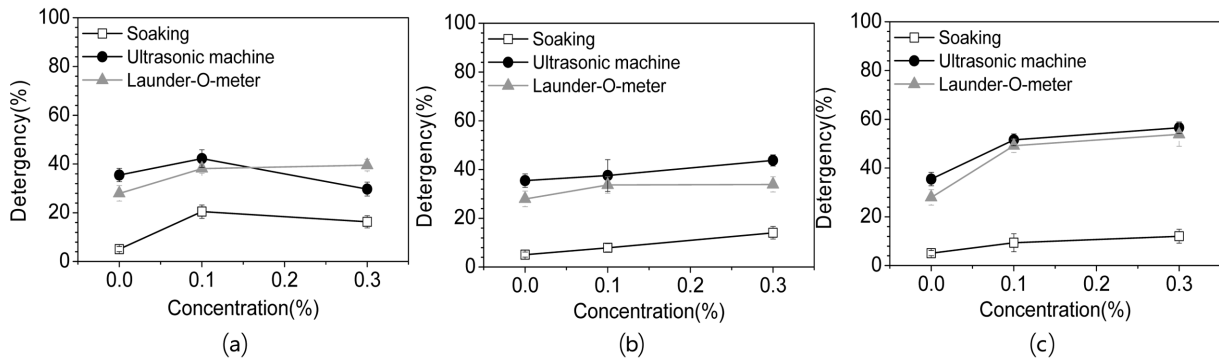


Fig. 5. Effect of detergent concentration(%) on the detergency depending on the washing method(25°C, 20min); (a)AE, (b)LAS, (c)Detergent A*.

면, 증류수에서 초음파 세탁의 세척성이 가장 우수하였고 담금 세탁의 세척성은 초음파 세탁의 1/7에 불과하였다. 0.1% 세액에서 AE 수용액에서 초음파 세탁의 세척성이 가장 높았다. LAS와 detergent A* 수용액에서 초음파와 룬더오미터세탁에서의 세척성은 비슷하였다. 세액농도 0.3% 적용시 AE 수용액은 룬더오미터세탁 세척성이 가장 컸고 LAS 수용액에서 초음파 세탁 세척성이 가장 컸다. 하지만 detergent A* 수용액에서 초

음파와 룬더오미터세탁은 세척성이 비슷하였다. 이를 통해 낮은 농도의 세액에서 세탁시 초음파 세탁은 룬더오미터세탁보다 세척성이 더 높다는 것을 알 수 있다.

3.5. 효소와 표백제의 영향

세탁 방법에 따른 효소와 표백제 추가로 인한 세척효과가 다를 것으로 추측된다. 이를 확인하고자 세액에 효소나 표백제를

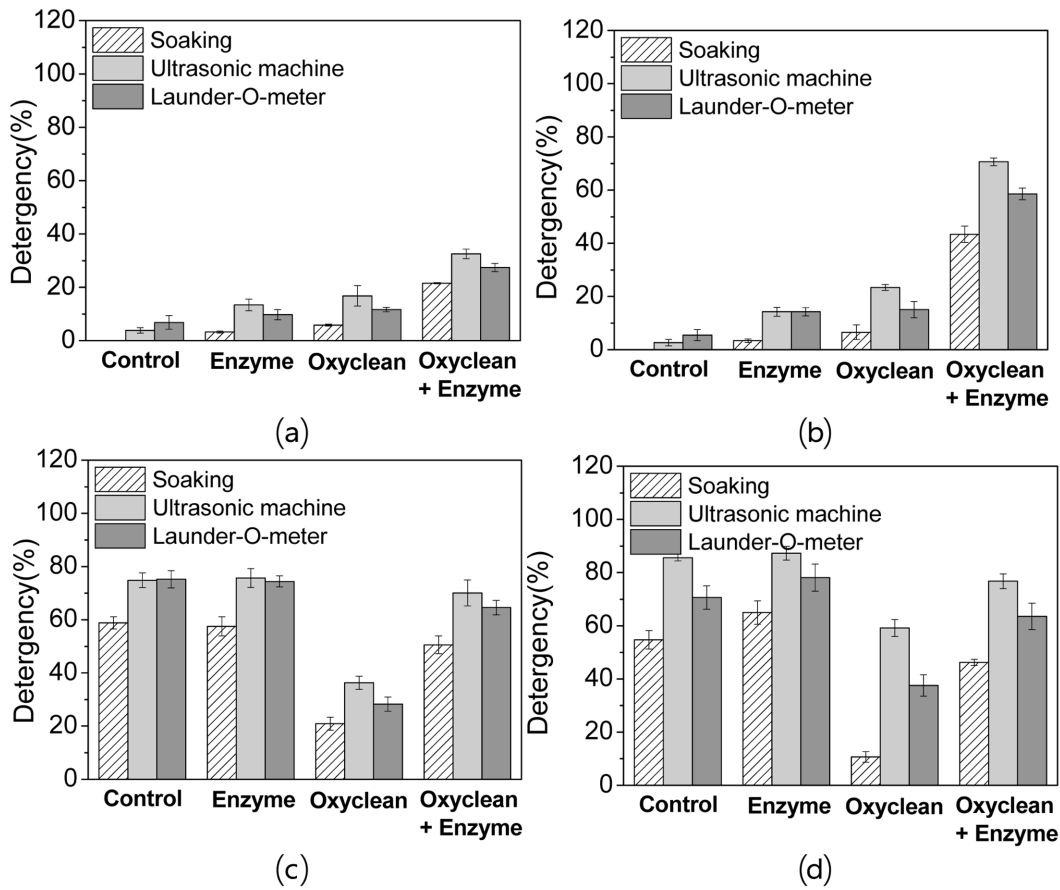


Fig. 6. Effect of bleaching agent and enzyme on the detergency at 25°C depending on the washing method(20min); (a)Water, (b)0.1% AE, (c)0.3% LAS, (d)0.1% Detergent A*.

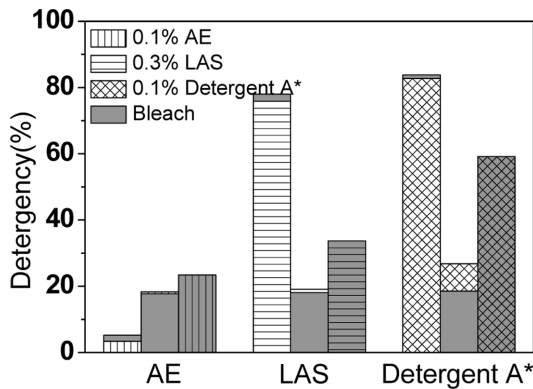


Fig. 7. Effect of the applying time of oxygen bleach on the detergency at 25°C.

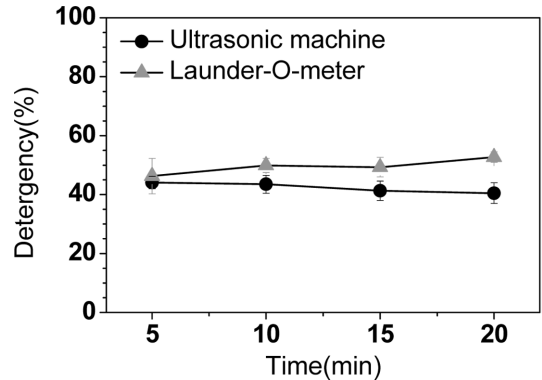


Fig. 8. Effect of time on the detergency depending on the washing method of sebum soiled wool fabrics.

더하여 단백질 오염포를 세탁하고 그 세척성을 확인하였다. 25°C에서 세탁하였고 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

물에서 세탁하면, 초음파세탁보다 룬더오미터에서의 세척성이 더 높았다. 그런데 효소 또는 표백제를 더하면 초음파 세탁 세척성이 크게 증대하여 룬더오미터세탁보다 세척성이 더 컸다.

AE 수용액에서 세탁하면 초음파보다 룬더오미터의 세척성이 더 높았지만 효소나 표백제를 첨가하면 초음파 세탁 세척성이 크게 키졌고 룬더오미터에서보다 세척성이 우수하였다. 물리력은 초음파보다 룬더오미터에서가 더 컸지만 초음파 에너지 도입시 생성된 캐비테이션 버블의 진동이 효과적으로 효소나 표

백제의 화학적 작용을 키우는 역할을 한 것으로 보인다. LAS 수용액에서 초음파와 룬더오미터 세탁의 세척성이 비슷하고 여기에 효소나 표백제를 더하면 초음파 세탁의 세척성이 룬더오미터보다 더 우수하였다. Detergent A* 수용액은 모든 조건에서 초음파 세탁의 세척성이 룬더오미터세탁보다 컸다. 하지만 LAS와 detergent A* 수용액에서 세액에 표백제를 추가하면 세척성이 낮아졌다. AE 수용액에서 세탁하면, 세액, 효소 수용액, 표백제 수용액, 효소와 표백제 수용액 순으로 세척성이 점점 증가하였다. 하지만 LAS와 detergent A* 수용액에서 순수한 세액에서보다 효소를 첨가한 수용액에서의 세척성이 더 컸지만 표백제를 더하면 세척성이 낮아졌다. 효소와 표백제를 함께 더하면 다시 증가하였다. 보통 blood 오염은 표백제로 제거해야 한다고 알려져 있는데 이에 상반되는 결과이다. 물과 AE 수용액에서만 표백제로 얻어진 세척성 하락이 적은 이유는 물과 AE 수용액에서의 세척성이 표백제만의 세척성보다 적기 때문이다. LAS와 detergent A* 수용액에 표백제를 더하면 세척성이 줄어든 이유를 알아보기 위하여 blood 오염포를 세제로 먼저 세탁하고 뒤에 표백제로 세탁한 경우와 표백제로 먼저 세탁하고 뒤에 세제로 세탁한 경우의 세척성을 각각 구하였고 세제와 표백제를 같이 사용한 세탁의 세척성과 비교하여 Fig. 7에 제시하였다. 초음파 세기 5.1 mV, 세탁 온도 25°C, 세탁시간 20분, 액비는 1:100으로 조절하였다. AE 수용액으로 먼저 세탁하고 뒤에 표백제로 세탁한 세척성은 5.2%이었고 세제와 표백제를 같이 첨가한 세척성은 23.4%로 크게 낮아졌다. 표백제로 먼저 세탁하고 뒤에 AE 수용액으로 세탁하면 18.3%로 세척성이 적었다. 23.4%의 세척성은 AE 수용액만의 세척성과 표백제만의 세척성을 더한 값과 비슷하다. LAS 수용액으로 먼저 세탁하고 뒤에 표백제로 세탁하면, 세척성이 78.0%로 높았는데 세제와 표백제를 같이 첨가하면 33.7%로 세척성이 크게 낮아졌다. 표백제로 먼저 세탁하면 세척성이 19.0%로 더 낮아졌다. Detergent A* 수용액으로 먼저 세탁하면 세척성이 83.8%이지만 세제와 표백제를 같이 사용하면 세척성이 59.2%로 낮아졌고 표백제로 먼저 세탁하면 세척성이 26.8%로 더 낮아졌다. 효과적으로 혈액 오구를 제거하려면 음이온계면활성제를 포함한 세제로 먼저 세탁하고 뒤에 표백제로 따로 세탁하는 것이 바람직하다.

실험에 사용한 산소계표백제의 과탄산나트륨은 물과 만나 과산화수소를 만드는데 이 과산화수소가 가수분해되어 만들어진 활성산소가 산화작용을 일으켜서 오구의 색소를 표백하거나 단백질을 분해해 세탁물을 하얗게 만든다. 만일 표백제가 표백제로서 역할을 충분히 한다면 세탁 후 세액 안의 과산화수소가 많이 소진되었을 것이다. 세탁 방법에 따른 표백제의 표백작용을 비교하고자 0.1% 표백제 수용액에 blood 오염포를 넣고 25°C에서 담금, 초음파, 룬더오미터로 20분간 세탁하였고 세탁도중 소진된 과산화수소의 양을 계산하였다.

세탁 전 표백제 수용액의 과산화수소 양은 0.24 g/L이고, 담금 세탁시 소진된 과산화수소 양은 0.06 g/L이고 룬더오미터 세

탁시 소진된 과산화수소의 양은 0.11 g/L이고 초음파 세탁시 소모된 과산화수소 양은 0.13 g/L로 담금과 룬더오미터 세탁했을 때보다 초음파세탁에서 더 많은 과산화수소가 사용되었다. 이를 통해, 초음파 세탁은 룬더오미터세탁보다 효소와 표백제의 활성을 높이므로 세척성은 더 높았지만 혈액 오구를 효과적으로 제거하려면 먼저 세제로 세탁하고 나서 표백제로 세탁하는 것이 바람직하다.

3.6. 유화력 평가

세탁은 세제의 화학적인 작용을 통해 섬유와 오구, 또는 오구끼리의 부착력을 줄이고 부드러운 오구를 물리적 제거하는 원리로 이뤄지는데 세제의 활성도가 높아지면 세척성도 증가한다. 세탁 방법에 따라 세액의 성질을 비교하고자 세액에 기름을 더해 초음파나 룬더오미터로 처리한 후 유화력을 비교하였다. 세액에 유동파라핀오일을 더하여 초음파나 룬더오미터로 25°C에서 20분간 처리하였다. 처리한 세액 20 ml 메스실린더에 옮겨 담았고 24시간 후의 유화층의 높이를 측정하여 유화력을 계산하였다.

초음파 세기는 5.1 mV, 룬더오미터 회전수는 42 rpm이었고 보관온도는 25°C이었다. 물에서 초음파 또는 룬더오미터로 처리한 세액은 물과 기름으로 온전히 분리되어 유화층이 관찰되지 않았다. AE, LAS, detergent A* 수용액에서 룬더오미터로 처리한 세액의 유화층은 0.5 ml 이하이고 유화력은 2.5%이었다. 초음파 처리한 세액에서 유화층이 온전히 남아 있었고 유화력은 100%이었다.

물속에서 기름이 작은 입자로 분산되면 계면면적이 크게 증가하고 계면 자유에너지 또한 커져 열역학적으로 불안정한 상태가 되는데 이때 계면면적을 줄이기 위해 물과 기름으로 다시 분리된다. 하지만 계면활성제 수용액은 계면장력이 작아 유화로 인해 계면면적이 늘어나도 계면 자유에너지의 증가 폭이 작아 유화상태를 안정하게 유지할 수 있다. 동일한 온도, 시간, 세액의 농도 조건에서 룬더오미터와 초음파 로 각각 처리하여도 룬더오미터처리한 세액의 유화층이 오래 유지되지 못한 것은 계면활성제와 물, 유동 파라핀오일이 충분히 섞이지 않아 계면 자유에너지의 증대가 더 커 열역학적으로 불안정하기 때문이다. 룬더오미터처리하는 세척동 회전시 수류나 쇠구슬과의 충돌로, 초음파처리하는 캐비테이션 버블 또는 마이크로스트리밍으로 만들어진 미세한 진동이 파라핀오일과 계면활성제를 섞는데 초음파 에너지가 파라핀오일을 세액 안에 더 잘 분산시켰기 때문에 룬더오미터에서보다 안정적인 유화를 유지한 것으로 보인다.

3.7. 모직물에서의 초음파 효과

모직물은 물세탁시 변형과 손상이 심해 가정에서 세탁하기 까다로운데 초음파 세탁이 효과적인 대안이 될 수 있는지 확인하고자 지용성 양모 오염포를 초음파 세탁과 룬더오미터 세척성을 비교하였고 Fig. 8에 나타내었다. 모직물의 경우 30°C 물에서 중성세제로 손세탁을 권장하는 경우가 많으므로 세탁온도

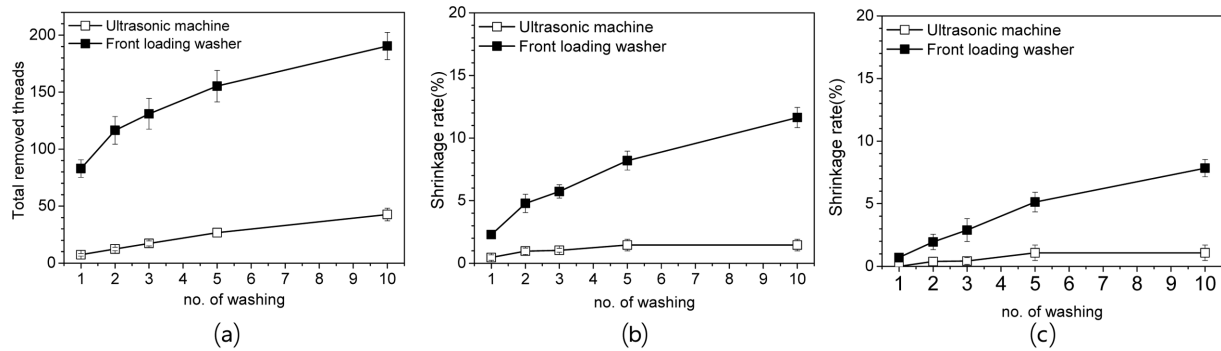


Fig. 9. (a)Total removed threads from Fraying-specimens as the laundry cycle increased up to 10 times, Shrinkage rate of the shrinkage test specimens as the laundry cycle increased up to 10 times; (b)Warp direction, (c)Weft direction.

Table 2. Photographs of Mechanical-Action test cloth, micrographs of stainless steel blended fabrics and SEM images of sebum soiled wool fabrics

Method Fabrics	Untreated	Ultrasound washer	Front-loading washer
Wfk 11801			
Wfk 60012			

는 30°C, 액비는 1 : 100, 세제농도는 권장농도의 중성세제로 5분~20분간 세탁하여 세척성을 계산하였고 그 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 초음파 세기는 5.1 mV이었으며 룬더오미터는 42 rpm 조건에서는 손상이 심해 측색이 불가능하였으므로 21 rpm조건으로 세탁하였다. 초음파 세탁은 5분 세척시 세척성은 44.1%로 46.3%인 룬더오미터 세탁과 세척성이 비슷하였으나 시간이 증가할수록 세척성은 감소하였으며 20분 세탁시 세척성은 40.5%이었다. 룬더오미터 세탁시 시간이 증가할수록 세척성이 증가하였으며 20분 세탁시 52.7%이었다. 초음파 세탁의 경우 면직물과 마찬가지로 수류의 이동이 일어나지 않기 때문에 세액과 오구의 교반이 일어나지 않아 재오염이 심해지기 때문인 것으로 보이며 모직물을 초음파 세탁한다면 5분 이내로 짧게 처리해야 할 것이다.

3.8. 직물변형비교

세탁방법에 따른 손상과 변형을 비교하고자 울풀림 시험포, 수축성 시험포, 기계력 시험포와 스텐리스스틸혼방직물을 초음파 또는 드럼 세탁기 울섬세코스 10회까지 반복 세탁하였고 1회, 2회, 3회, 5회, 10회 세탁의 결과를 각각 비교하였다.

울풀림 시험포를 10회까지 반복 세탁하여 경사와 위사방향의 제거된 실 수를 합한 결과를 Fig. 9(a) 그래프로 나타냈다. 초음파 세탁시 1회 세탁에서 7울의 실이 제거되었고, 매 세탁마다 3~6울의 실이 추가로 제거되었는데 이 정도의 울풀림은 시험포를 세액에 담고 꺼내기만 하여도 발생하는 수준으로 초음파세탁으로 인한 울풀림은 거의 없다고 봐도 좋을 것이다. 10회 세탁 후 모두 44울의 실이 원단에서 제거되었다. 드럼 세탁기로 세탁한 시료는 1회 세탁에서 83울의 실이 제거되었으며 10회 세탁 끝나고는 190울의 실이 원단에서 풀렸다.

수축성 시험포를 10회까지 반복 세탁하고 경사와 위사 방향의 수축율을 각각 구한 결과는 Fig. 9(b), 9(c)와 같다. 초음파 세탁시 경사 방향의 수축율은 1회 0.5%, 2회 1.0%, 10회 1.5%이고 드럼 세탁기 세탁시 시료의 경사 방향 수축율은 1회에서 2.3%, 2회에서 4.8%, 10회에서 11.6%로 초음파 세탁한 시료와 비교해 7배 이상 수축된 것을 확인하였다. 초음파 세탁한 시료 위사방향 수축율은 10회 세탁에서 1.1%의 수축율을 보였고 드럼세탁기 세탁한 시료는 7.8%로 나타나 초음파 세탁한 시료보다 7배가량 수축하였다. 시험포는 양모소재 직물로, 양모섬유에는 스케일이 있어 마찰하면 축융되는데 초음파로 세탁한 시료보다 드럼세탁기 세탁한 시료에서 더 많은 수축이 일어난 것은 드럼세탁기 세탁이 직물에 더 많은 변형을 일으켰고 드럼세탁기 세탁이 초음파 세탁보다 수축으로 더 많은 문제를 만들 것을 의미한다.

기계력 시험포는 10회까지 반복 세탁하였고 지용성 양모 오염포는 1회 세탁하여 그 결과를 Table 2에 제시하였다. 기계력 시험포의 경우 초음파 세탁한 시료는 10회 세탁한 시료에서도 시료의 울이 거의 풀리지 않았지만 드럼세탁기 세탁한 시료는 10회 세탁에서 눈에 띄게 손상된 것을 알 수 있다. 지용성 양모 오염포 역시 초음파 세탁한 시료는 손상이 거의 없으나 룬더오미터 세탁한 시료는 섬유가 많이 틀어진 것을 관찰할 수 있었다.

위의 결과를 통해 드럼세탁기 세탁과 비교하여 초음파 세탁은 세척물에 가해지는 기계력이 적고 직물 변형을 적게 만드는 것을 알 수 있다. 미래에 초음파 세탁이 종래의 세탁방법을 대체한다면 세척물을 손상 또는 변형시키는 문제는 거의 없을 것으로 생각된다.

4. 결 론

미래의 의류는 종래보다 새로운 소재, 다양한 소재로 제작될 것이고 현재 대중화되고 있는 스마트 의류는 전자소자가 내장되어 있어 원단에 손상을 주지 않으며 효과적으로 오구를 제거할 세탁방법이 필요하다. 이에 본 연구는 초음파 에너지를 새로운 세탁방법으로 직물 세탁에 도입하고자 하였다.

세탁 방법에 따른 세척성 차이를 초음파 세탁과 같은 조건에서 기계력을 가하지 않고 비커에 오염포를 담그는 세탁과 룬더오미터 세탁을 진행하여 세척성으로 각각 비교하였다. 지용성 먼 오염포는 증류수, 비이온 또는 음이온계면활성제와 약알카리성 세제로, 지용성 양모 오염포는 중성 세제로 세탁하였다. 이 외에 표백제나 효소를 따로 추가하여 비교하였다. 초음파 세탁이 세액 성질에 미치는 영향을 비교하고자 세액에 파라핀을 더하여 초음파 또는 룬더오미터 처리하고 세액의 유효력을 측정하여 비교하였다. 직물의 손상도를 비교하고자 올풀림 시험포, 수축성 시험포, 기계력 시험포 그리고 스마트 의류의 대안으로 스텐리스스틸혼방직물로 초음파 또는 드럼 세탁기 세탁하여 직물 변형을 비교하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 초음파 세탁은 가정세탁의 표준인 룬더오미터세탁의 세척성과 비교하여도 세척성이 낮지 않았다. 세탁온도 40°C나 60°C보다 25°C일 때, 세탁시간은 40분보다 20분일 때, 세탁 액비는 1:50보다 1:20이거나 1:100일 때, 세제 농도가 0.3%보다 0.1%일 때 초음파 세탁의 세척성이 룬더오미터세탁보다 더 우수하였다. 파라핀 오일을 더한 세액에서 초음파나 룬더오미터 처리 시 룬더오미터로 처리한 세액보다 초음파로 처리한 세액이 파라핀 오일을 더 잘 유효시키고 분산시켰다.

둘째, 효소나 표백제를 세제에 추가 세탁시 룬더오미터세탁과 비교해 초음파 세탁의 세척성이 더 우수하였다. 특히 세제로 먼저 세탁하고 표백제를 사용하면 세척성이 크게 증가하였다.

셋째, 양모직물의 경우 초음파로 5분만 세척하여도 효과적으로 오구를 제거하였으며 손상이 거의 없었으나 룬더오미터세탁시 42 rpm은 세척성 측정이 힘들 정도로 손상이 심하였으며 21 rpm에서의 손상도 크게 나타났다.

넷째, 초음파 세탁한 시료는 드럼세탁기 세탁한 시료와 비교하여 시험포 울도 적게 탈락되고 수축도 덜 일어나며 원단의 풀어짐도 적었다. 드럼 세탁기 세탁한 시료에 비교해 초음파 세탁한 시료는 직물의 손상과 변형이 거의 나타나지 않았다.

이상의 결론으로부터 초음파 세탁을 일반 가정 세탁과 비교하면 세탁온도가 낮거나 세탁시간이 짧아도 오구를 효과적으로 제거하였다. 또한 표백제와 효소로 인한 세척성 증대도 초음파 세탁에서 가정 세탁보다 더 잘 나타났으며 또한 세액의 유효와 분산 더 잘 관찰되었다. 직물의 손상과 변형 역시 가정 세탁에 비해 초음파 세탁에서 적게 나타났다. 초음파 세탁은 세탁 중 직물을 접거나 구기하지 않아도 오구를 효과적으로 제거하므로 세탁 과정에 초음파 에너지를 도입하는 것은 미래의 의류관리에 있어 간소함과 편리함을 추구하는 경향이 커지고 있으며 전자회로가 내재된 스마트 의류의 상용화가 예상되는 현재 종래의 세탁방법에 대한 새로운 대체제가 될 것이다.

References

- Azar, L. (2009). Cavitation in ultrasonic cleaning and cell disruption. *Controlled Environments*, February, 14-17. Retrieved March 24, 2023, from <http://www.absotecthailand.com/docs/Cavitation.pdf>
- Blackstone-ney ultrasonics. (2009). Fundamentals of ultrasonic & megasonic cleaning. *PROCESS CLEANING Magazine.*, 1-6. Retrieved March 24, 2023, from <https://www.ctgclean.com/files/wp-content/uploads/Fundamentals-of-Ultrasonics.pdf>
- Canoglu, S., Gultekin, B. C., & Yukseloğlu, S. M. (2004). Effect of ultrasonic energy in washing of medical surgery gowns. *Ultrasonics*, 42(1), 113-119. doi:10.1016/j.ultras.2004.02.012
- Cutler, W. G., & Davis, R. C. (1987). *Detergency - Theory and test methods*. New York: Marcell dekker.
- Gotoh, K., & Harayama, K. (2013). Application of ultrasound to textiles washing in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(2), 747-753. doi:10.1016/j.jultsonch.2012.10.001
- Gotoh, K., Harayama, K., & Handa, K. (2015a). Combination effect of ultra sound and shake as a mechanical action for textile cleaning.

- Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 412-421. doi:10.1016/j.ultsonch.2014.05.005
- Gotoh, K., Nakatani, H., & Tsujisaka, T. (2015b). Delicate laundering of textiles with application of 38 kHz ultrasonic waves. *Textile Research Journal*, 85(15), 1565-1578. doi:10.1177/0040517515569523
- Heo, Y. D., Sung, J. Y., Joung, Y. J., Kim, D. K. & Kim, T. Y. (2013). Changes in the properties of cotton cellulose by hydrogen peroxide bleaching. *Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry*, 45(3), 56-68. doi:10.7584/ktappi.2013.45.3.059
- Hurren, C., Cookson, P., & Wang, X. (2008). The effects of ultrasonic agitation in laundering on the properties of wool fabrics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(6), 1069-1074. doi:10.1016/j.ultsonch.2008.04.002
- Kanegsberg, B., & Kanegsberg, E. (2011). *Handbook for critical cleaning - Cleaning agents and systems*. Boca Raton: CRC press
- Kim, S. R. (2002). *The science of Detergent and Laundry*. Paju; Gyomoonsa
- Ma, M., You, L., Chen, L., & Zhou, W. (2014). Effects of ultrasonic laundering on the properties of silk fabrics. *Textile Research Journal*, 84(20), 2166-2174. doi:10.1177/0040517514537370
- Mason, T. J. (1997). Ultrasound in synthetic organic chemistry. *Chemical Society Reviews*, 26(6), 443-451. doi:10.1039/CS9972600443
- McNeil, S. J., & McCall, R. A. (2011). Ultrasound for wool dyeing and finishing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(1), 401-406. doi:10.1016/j.ultsonch.2010.07.007
- Moholkar, V. S., & Warmoeskerken, M. M. C. G. (2004). Investigations in mass transfer enhancement in textiles with ultrasound. *Chemical Engineering Science*, 59(2), 299-311. doi:10.1016/j.ces.2003.09.018
- 'Sonochemistry - Ultrasound in organic chemistry'. (n. d.). *Biosynth Chemistry & Biolog.* Retrieved March 24, 2023, from <http://www.organic-chemistry.org/topics/sonochemistry.shtm>
- Niemczewski, B. (2014). Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(1), 354-359. doi:10.1016/j.ultsonch.2013.07.003
- Park, S. J. (2019, November 25), Trends in the development and commercialization of smart clothing at home and abroad. *KDB Development Bank Economic Research Laboratory*. Retrieved March 24, 2023, from <https://eiec.kdi.re.kr/policy/domesticView.do?ac=0000151200>
- Piao, S. J., & Park, M. J. (2013). Comparison of detergency effectiveness by the type of household washer, detergent and soil - Focused on detergency, rinsing, fabric damage and tanglement. *The Research Journal of the Costume Culture*, 21(6), 950-960. doi:10.7741/rjcc.2013.21.6.950
- Seo, J. W. (2017, March 26). The advent of woven fabric with thread-shaped electronic devices. *Daily Economy*. Retrieved March 24, 2023, from <http://news.mk.co.kr/newsRead.php?&year=2017&no=204124>
- Warmoeskerken, M. M. C. G., Van der Vlist, P., Moholkar, V. S., & Nierstrasz, V. A. (2002). Laundry process intensification by ultrasound. *Colloids and Surfaces A - Physicochemical and Engineering Aspects*, 210(2), 277-285. doi:10.1016/S0927-7757(02)00372-2
- Vankar, P. S., & Shanker, R. (2008). Ecofriendly ultrasonic natural dyeing of cotton fabric with enzyme pretreatments. *Desalination*, 230(1-3), 62-69. doi:10.1016/j.desal.2007.11.016

(Received April 05, 2023; 1st Revised April 21, 2023;
2nd Revised May 01, 2023; Accepted May 10, 2023)