



ISSN 1229-8565 (print) ISSN 2287-5190 (on-line)
한국지역사회생활과학회지 35(3): 391~404, 2024
Korean J Community Living Sci 35(3): 391~404, 2024
<http://doi.org/10.7856/kjcls.2024.35.3.391>

능동 및 수동적 가온 환경에서 피부 능동한선 분포 분석을 위한 요오드 종이 평가법 개선: 전분 종이 선택 및 측정 가이드라인

마리아 스텐키나 · 이 주 영^{†(1),2),3)}

서울대학교 의류학과 박사과정 · 서울대학교 의류학과 교수¹⁾ · 서울대학교 생활과학연구소 겸임연구원²⁾
· 차세대융합기술연구원 그래핀융합기술연구센터 부센터장³⁾

Guideline for Selecting Starch Paper for the Iodine-Paper Technique to Assess Active Sweat Glands on the Skin in Active or Passive Heating Environments

Maria Stenkina · Joo-Young Lee^{†(1),2),3)}

PhD Candidate, Department of Fashion and Textiles, Seoul National University

Professor, Department of Fashion and Textiles, Seoul National University¹⁾

Adjunct Research Fellow, Research Institute for Human Ecology, Seoul National University²⁾

Vice-director, Graphene Research Center for Convergence Technology, Advanced Institute of
Convergence Technology³⁾

ABSTRACT

The paper provides recommendations and a practical approach for selecting starch papers for the iodine-paper technique, a method used to measure the number of active sweat glands in the skin in active or passive heating environments. Twelve types of papers were selected for the present study. All the papers were dehumidified and saturated with iodine 6–30 h. A subject participated in the heat stress test (20-min exercise) and active sweat glands were measured on the hand and finger. Papers numbered 1, 2, 4, and 5 showed the best results, which varied according to the saturation time with iodine (6 h for sample 4, 24 h for sample 5, and 30 h for samples 1 and 2). The minimum absorbed time for all samples was 6 h. The surface properties of the paper were crucial for clear imprinting. Active sweat glands were observed on smoother paper without visible surface fibers and bumps, which hindered the accurate counting of sweat glands. The imprint quality did not depend on the paper thickness, weight, density, or hydrophilic properties. On the other hand, the changes in iodine saturation time and storage conditions affected the imprint quality. In addition, when measuring the sweat gland imprint, they were more distinct during the daytime (morning and afternoon) and fibers should be selected. In addition, one skilled experimenter should conduct the

Received: 27 July, 2024 Revised: 12 August, 2024 Accepted: 30 August, 2024

[†]Corresponding Author: Joo-Young Lee Tel: +82-2-880-8746 E-mail: leex3140@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

than in the evening. In conclusion, white starch papers with smooth surfaces with no bumps measuring procedure to avoid deviations in pressure at an identical time.

Key words: iodine-paper technique, active sweat glands, local sweating, non-invasive indicator

I. 서론

발한(sweating)은 모든 동물 중 포유류에만 존재하는 체온조절 기전이다. 대부분의 포유류는 일부 특정 부위에서만 발한을 발생시키는 것에 비해 인간은 전신에서 땀을 흘린다. 피부에 존재하는 한선(땀샘, sweat gland)은 1833년 Purkinje에 의해 최초 발견되었고(Kuno 1956; Folk & Semken 1991), 그 역할에 따라 에크린선(eccrine glands)과 아포크린선(apocrine glands)으로 구분된다(Kuno 1956; Collins 1989). 에크린선은 전신에 골고루 위치하면서 고온 환경에 노출되거나 운동으로 인해 체온이 일정 수준 이상 상승하게 되면 땀을 발생시켜 피부의 온도를 낮추는 역할을 한다. 반면, 아포크린선은 주로 손바닥이나 발바닥 등에 위치하며 정신적 스트레스 시 땀을 발생시키는 역할을 한다(Gagnon & Crandall 2018; Jung et al. 2018; Baker 2019). 겨드랑이는 에크린선과 아포크린선이 혼재하여 정신적 발한과 체온조절성 발한이 모두 발생하는 부위로 알려져 있다(Kuno 1956).

인간의 피부에는 약 2백만 개의 한선이 형성되어 있다고 알려져 있으나, 피부에 존재하는 모든 한선에서 땀이 나는 것은 아니다. 한선이 실제 땀을 배출하는지의 유무에 따라 능동한선(Active sweat glands)과 불능한선(Inactive sweat glands)으로 나뉜다. Kuno(1956)에 따르면, 에크린선은 태어난 이후에도 그 기능 발달이 지속되며 약 2.5세 즈음에 발한 기능이 완료된다. 발한 기능이 완성되어

실제 땀을 내는 한선을 능동한선이라 부르고, 해부학적으로 피부에 존재하기는 하나 땀을 내지 않는 한선을 불능한선이라 부른다. Kuno(1956)는 피험자 A의 아래팔에서 측정된 능동한선수와 불능한선수의 비율이 8:7이었던 반면, 피험자 B의 경우 5:1이었다고 보고하면서 피부에 존재하는 능동한선과 불능한선 수의 비율은 개인차를 보인다고 하였다. Taylor & Machado-Moreira(2013)에 따르면, 능동한선은 실제 피부에 존재하는 해부학적 한선들의 약 5~10%에 불과하다. 개인별 차이뿐만 아니라 인체 부위별로도 큰 차이를 보여, 손등이나 종아리 부위에 비해 이마, 발바닥, 손바닥에서 더 높은 밀도의 능동한선이 발견된다(Kuno 1956). 능동한선의 밀도(activated sweat gland density, ASGD)가 높을수록 발한 능력이 우수하다고 여겨지기 때문에 능동한선 개수의 정확한 측정은 열스트레스에 대한 체온조절 연구에서 매우 중요하다. 임신 중 배아 상태에서 한선의 해부학적 구조가 많이 형성될수록 실제 능동한선의 수도 많아질 가능성이 있으나, 이보다 중요한 요인은 출생 직후만 2.5세 이전 능동화의 여부이며, 한선의 능동화 여부에 따라 개인별, 인체 부위별 특성이 결정된다고 여겨진다(Taylor & Machado-Moreira 2013).

발한 반응이 체온조절에서 중요한 효과기 반응임에도 불구하고 능동한선의 수를 직접 측정하여 보고한 선행 연구들은 그리 많지 않은데 그 이유는 측정 방법의 한계 때문이다. 전술한 바와 같이 발한은 인간의 고유한 특성이기 때문에 쥐나 토끼와 같은 실험동물을 통해 기초 데이터를 얻을

수 없고, 인체 실험(human subject trial)을 통해서만 발한 특성을 관찰할 수 있다. 피부 능동한선 분포 혹은 개수를 관찰하는 대표적 방법으로 전분 요오드법(starch-iodine method) 또는 요오드 종이법(iodine-paper technique)이 있는데, 이중 요오드 종이법이 전분 요오드법에 비해 보다 보편적으로 사용된다(Gagnon et al. 2012). 요오드 종이법이란 요오드를 미리 흡착시킨 전분 종이를 땀이 나는 피부면에 대어, 종이 표면 색상이 보라색으로 바뀌는 점들을 능동한선으로 간주하고 그 분포 혹은 개수를 분석하는 방법이다(Randall 1946). 요오드 종이법은 요오드 혹은 전분을 피험자의 피부에 직접 바르지 않는다는 점에서 간편하다. 하지만, 사용된 종이의 특성 및 측정자(실험자)가 측정의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있으므로, 신뢰도를 높일 수 있는 전분 종이 선택 기준 및 표준 시험법을 마련한 필요가 있다.

현재 요오드 종이법에 사용될 수 있는 전분 종이 선택에 대한 기준은 없다. 본래 ‘종이(paper)’는 고대 이집트 파피루스(papyrus)로 만든 기록 매체에서 유래된 단어로, 당시 파피루스라는 식물의 속 줄기를 얇게 찢은 후 건조해 만들었다. 현대 사회에서 사용되고 있는 종이는 식물에서 뽑아 낸 셀룰로오스를 거른 후 건조하는 과정을 거치는 고대 중국 제지법을 기반으로 한다. 현대의 제지 과정에서는 목재 펄프에서 얻어진 셀룰로오스 원료에 안료, 바인더, 첨가제 등이 물과 함께 혼합되는데, 바인더의 한 성분으로서 전분이 투입된다. 바인더는 안료와 안료, 안료와 섬유를 결합하는 역할을 한다. 시판되는 종이는 그 종류에 따라 전분 함유량에 차이를 보이며, 어느 정도의 전분 농도를 가진 종이가 요오드 종이법에 최적인지는 보고된 바 없다.

피부 능동한선의 특성을 보고한 초기 문헌의 경

우(Randall 1946), 피부에 요오드를 직접 도포한 후 부드러운 표면을 지닌 13번 바우처 본드(Voucher Bond) 종이를 사용하여 능동한선을 관찰한 반면, Davis et al.(2005)은 요오드를 미리 흡수시킨 린넨 종이를 사용하여 요오드를 피험자의 피부에 직접 도포하지는 않았다. Gagnon et al.(2012)과 Peel et al.(2022)은 48시간 동안 요오드를 흡수시킨 100% 면 종이(cotton paper, Southworth Cie, Agawam, MA, USA)를 사용하였고, Schwarck et al.(2019)도 48시간 동안 요오드를 미리 흡수시킨 100% 면 종이(cotton paper, 120 g/m²; JD18C Southworth, Neenah Paper Inc., Neenah, USA)를 사용하였다. 이처럼 Randall (1946)의 연구 이후 약 80년이 지났음에도 피부 능동한선 측정법에 큰 진전이 없을 뿐만 아니라 사용된 종이에 대한 사용 지침도 확립되어 있지 않다는 점은 매우 흥미롭다. 전분 종이의 면적당 중량이나 종이에 포함된 전분 농도, 흡수된 요오드의 양, 종이의 표면 특성 등이 능동한선 분포 분석이나 개수 측정에 유의미한 요인일 것이라 예상되나 이에 대한 연구는 거의 발견되지 않는다. 이에 본 연구는 현재 시판 중인 다양한 전분 종이를 대상으로 능동한선 형상 각인의 정확도를 비교 분석한 후, 요오드 종이법에 가장 적합한 전분 종이 조건을 제안하고, 측정 프로세스에 대한 지침 제안을 목표로 하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 요오드 흡수 시간, 측정 시간대, 종이의 표면 특성에 따른 차이를 비교 분석하였다. 이를 위해 국내외에서 구입 가능한 총 11종의 백색 전분 종이를 선택하였다. 총 11종의 종이 중 1종(N1과 N2)에 대해서만 두 가지 사이즈(2 × 4 cm와 4 × 4 cm)로 시료를 준비하였고, 나머지 10종은 2 × 4 cm의 사이즈로 준비하여 총 12종

의 시료가 준비되었다(Table 1). 즉, 시료 중 N1과 N2는 크기는 다르지만 동일한 전분 종이이다(4 × 4 cm는 손바닥 측정용, 2 × 4 cm는 손가락 측정용). N1(N2와 동일) 종이는 본 실험자들의 연구실에서 능동한선 측정을 위해 오랫동안 사용해 오던 종이이며, 이외 국내외에서 판매되는 실험용 여과지, 한지, 미술 용지 등을 시료로 선정하였다. 다양한 색상으로 판매되는 경우 기본 백색의 종이를 선정하였다. 시료 준비 과정에서 충분한 건조를 거쳤으며, 건조 전후 종이의 중량은 전자저울(Analytical Balance Sartorius ENRIS 224i-1S, Japan)로 측정하였고, 종이의 두께는 두께 측정기(Dial Thickness Gauge Mitutoyo No. 730, Japan)를 이용하여 측정하였다. 전분 종이의 표면 특성은 실체 현미경(Vision Inspection System STV-ICS Pro LED, I-CAMSCOPE, Korea; [1.6×C, 18.5×C, NC])을 이용하여 분석되었다.

준비된 시료를 총 48시간 동안 제습제가 포함

된 전용 용기 내에 보관하여 종이 자체에 함유된 수분을 제거하였고(제거된 수분량 0.03 ± 0.01 mg; Fig. 1a), 48시간 직후 유리 데시케이터(glass desiccators set 210 × 320 mm with P/orcelain Plate, Soda-Lime Glass, SciLab Korea)의 수평 플레이트 위에 건조된 시료(12종 × 5매 = 60매)를 올려놓았다. 유리 데시케이터의 맨 아래 바닥에 고체 요오드(Duksan chemicals, Korea; 26 g)를 놓은 후 뚜껑을 잘 밀봉하여, 최대 30시간 동안 고체 요오드로부터 증발된 기체 요오드가 플레이트 위에 위치한 건조 시료에 충분히 흡수되도록 하였다(Fig. 1b). 실험자 안전을 위해, 데시케이터는 전용 흡 벤트 내에 위치시켰으며(Fig. 1c), 실험자는 요오드 흡수지 제작 시 보호 장갑과 마스크 등 개인보호구를 착용하였다. 요오드 흡수 시간에 따른 영향을 분석하기 위해 요오드 흡수 6 시간, 12 시간, 18 시간, 24 시간, 30 시간 조건을 비교하였다(Fig. 2). 흡수 시간에 따른 종이 표면의 색상 변화는 이미지를 기반으로 주관적 정성

Table 1. Physical characteristics of the paper samples used in the present study

| # | Name | Surface area (mm ²)* | Thickness (mm) | Sample mass (mg/piece) | Undried -dried mass (mg) | Density (mg/mm ³) | Volume (mm ³) | SA/Mass (mm ² /mg) | Produced by |
|-----|----------------------------------------------|----------------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|
| N1 | Southworth Business | 1,600 | 0.18 | 0.15 | 0.0343 | 0.00054 | 288 | 10,667 | USA |
| N2 | 100% cotton paper | 800 | 0.18 | 0.08 | 0.0201 | 0.00057 | 144 | 10,000 | USA |
| N3 | KFP student filter paper | 800 | 0.22 | 0.07 | 0.0319 | 0.00040 | 176 | 11,429 | Korea |
| N4 | Sketch book | 800 | 0.21 | 0.09 | 0.0361 | 0.00055 | 168 | 8,889 | Japan |
| N5 | Line Cover | 800 | 0.21 | 0.10 | 0.0239 | 0.00060 | 168 | 8,000 | Japan |
| N6 | Hanji (한지) | 800 | 0.16 | 0.03 | 0.0043 | 0.00023 | 128 | 26,667 | Korea |
| N7 | Arnold Grummer Reusable Couch Blotter Sheets | 800 | 0.63 | 0.20 | 0.0227 | 0.00040 | 504 | 4,000 | USA |
| N8 | Blotter paper | 800 | 0.40 | 0.08 | 0.0221 | 0.00025 | 320 | 10,000 | China |
| N9 | J1 (Art drawing paper) | 800 | 0.13 | 0.04 | 0.006 | 0.00038 | 104 | 20,000 | Japan |
| N10 | J2 (Art drawing paper) | 800 | 0.36 | 0.11 | 0.0148 | 0.00038 | 288 | 7,273 | Japan |
| N11 | J3 (Art drawing paper) | 800 | 0.34 | 0.10 | 0.0153 | 0.00037 | 272 | 8,000 | Japan |
| N12 | Absorbent paper | 800 | 0.74 | 0.25 | 0.0433 | 0.00042 | 592 | 3,200 | Japan |

*Sample size: 2×4 or 4×4 cm

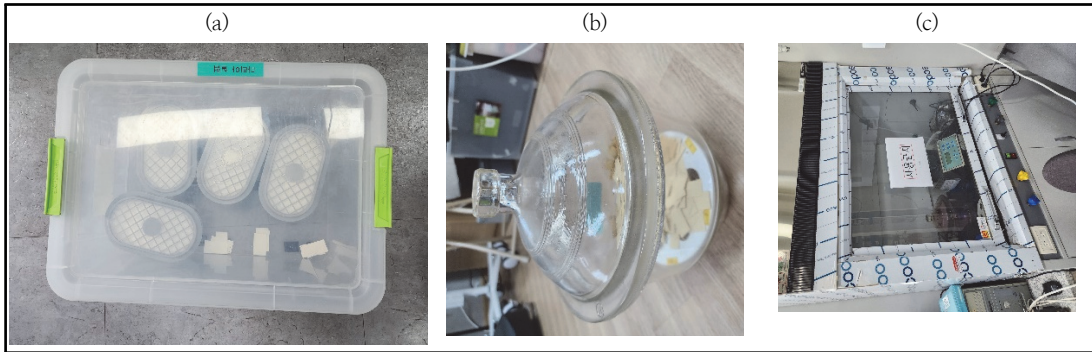


Fig. 1. Dehumidification in a plastic-sealed container (a), saturation with iodine and storage in a glass desiccator (b), and saturation with iodine in a glass desiccator and fume cupboard (c).

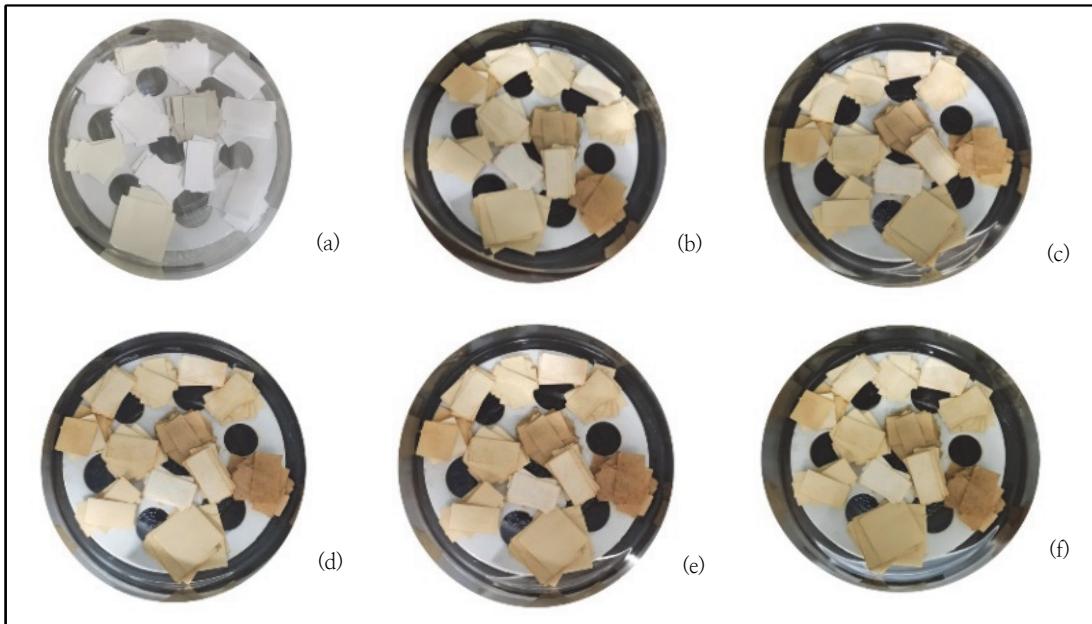


Fig. 2. Paper saturation with solid iodine inside a glass desiccator according to time : 0 h (a), 6 h (b), 12 h (c), 18 h (d), 24 h (e), and 30 h (f).

평가를 시행하였으며, 별도의 정량적 칼라 분석은 실시하지 않았다.

피부 발한 시 능동한선을 관찰하기 위해, 1인의 피험자(여성, 29 세, 키 170 cm, 체중 55 kg)가 참여하였다. 발汗을 유발하기 위해 피험자는 반팔 티셔츠와 긴 바지를 착용한 상태에서 기온 25°C, 습도 50% RH로 유지된 인공기후실에 들어가 20

분 간 트레드밀을 이용하여 4 ~ 6 km/h의 속도로 운동을 수행하였다. 본 연구에서는 손바닥 혹은 손가락 피부면에서의 발汗을 측정하고자 하였기 때문에 고강도의 운동보다 저 ~ 중등 강도의 운동을 적용하였다. 20분 운동 직후 피험자는 의자에 앉아 준비된 테이블 위에 오른손을 올려놓았다. 능동한선은 오른손의 손바닥 및 엄지 손가락의 바닥

면에서 측정되었다. 요오드를 흡수시켜 미리 준비된 각 종이를 목각 도장 형태의 밀 사각 단면에 부착시킨 후 피부면에 3초 동안 가볍게 누르도록 하였다. 피부로부터 능동한선으로 판단되는 점들로 색상이 진해진 전분 종이는 바로 스캔되어 이미지 파일로 저장되었다. 해당 이미지들을 확대한 후 보라색으로 보이는 점들을 “ImageJ” 소프트웨어를 사용하여 능동한선을 계수하였다(Fig. 3). 능동한선 계수 시 종이 자체의 검정 점들이나, 종이 단면의 굴곡은 능동한선에 포함되지 않았으며, 여러 개의 점들이 합쳐져 경계가 명확하지 않은 경우도 계수하지 않았다. 능동한선 계수 면적은 손가락 바닥 곡면을 고려하여 가운데 편평한 부분으로 간주되는 0.5×0.5 cm로 정하였다. 발한 측정은 주로 오전 11시 ~ 낮 2시 사이에 이루어졌으며, 추가로 측정 시간대에 따른 차이를 보기 위해 이른 아침 (7~8시)과 저녁 (19~20시)에도 실시되었다. 피험자는 총 5회 운동 실험에 참여하였으며(3회는 11종의 종이 사용 능동한선 측정, 2회는 종이 한 종류를 대상으로 측정시간대에 따른 차이 분석), 모든 운동 실험은 다른 날에 수행되었다. 실험의 모든 과정은 실험 참여 전 피험자에게 충분히 고

지되었고, 피험자로부터 자발적 참여 동의서를 받은 후 진행되었다. 본 인체 실험은 서울대학교 생명윤리위원회의 사전 승인을 받았다(IRB No. 2307/004-015).

III. 결과

1. 전분 종이들의 표면 특성

본 연구에서 선택한 총 11종의 종이 표면 특성을 실제 현미경으로 분석한 결과, 다음 세 가지 종류로 분류되었다: 1) 표면이 매끄러운 유형, 2) 표면에 셀룰로오스 섬유가 보이는 유형, 3) 표면에 굴곡이 있는 유형. 표면이 매끄러운 유형은 N1(N2), N4, N5, 표면에 셀룰로오스 섬유가 보이는 유형은 N6, N8, N9, 표면 굴곡이 보이는 유형은 N10과 N11이었다(Fig. 4). 전분 종이 중 N3, N7, N12 종이는 표면에 굴곡은 없으나 유형 1)과 유형 2)의 중간에 해당하였다.

2. 요오드 흡수 시간에 따른 종이의 색상 변화

여섯 시간 간격의 요오드 흡수 시간(6, 12, 18, 24, 30 시간)에 따른 전분 종이의 표면 색상 변화

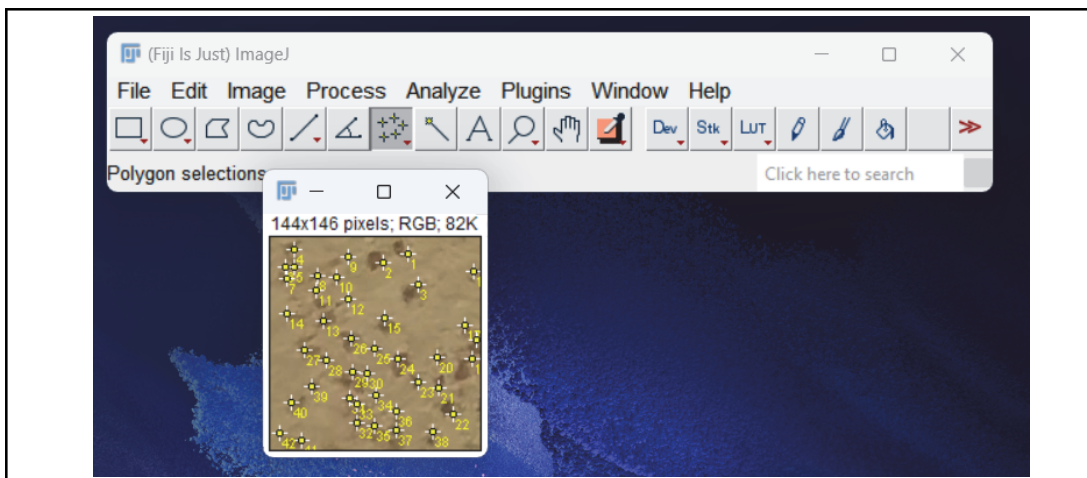


Fig. 3. “ImageJ” software for counting the number of dots (representing sweat glands).

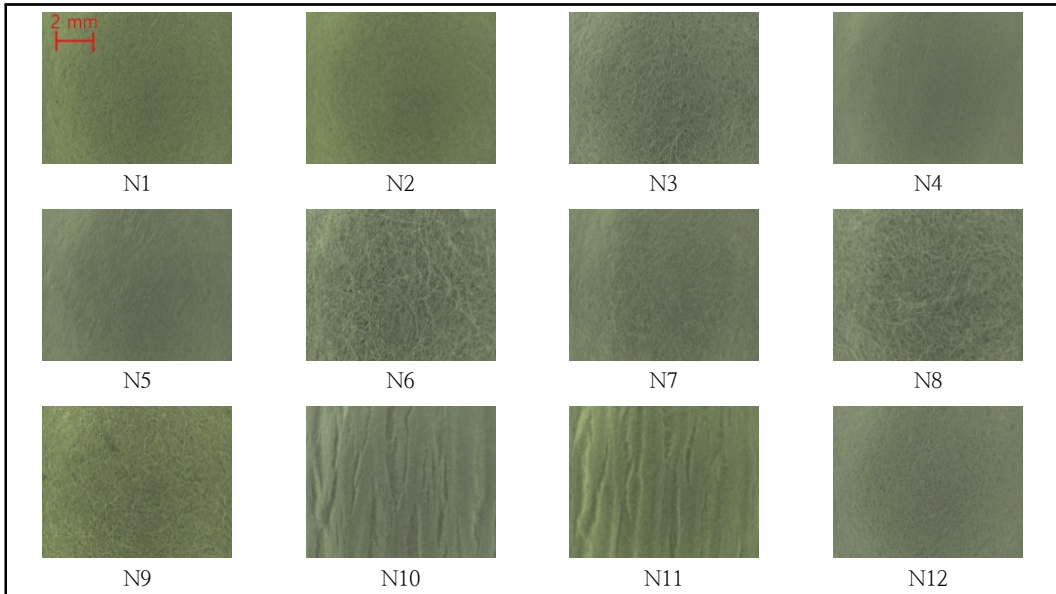


Fig. 4. Optical microscopy images of starch papers used in the present study (Papers N1 and N2 are identical to each other).

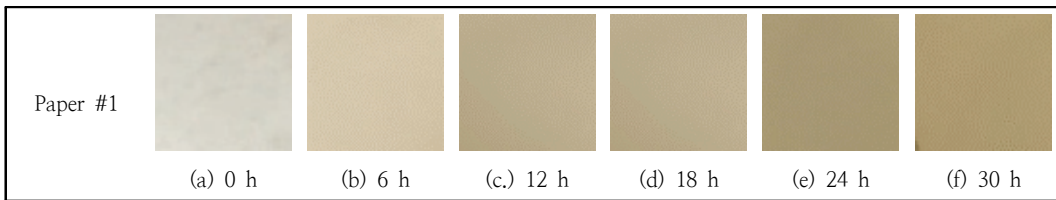


Fig. 5. Changes in the surface color of Paper #1 according to the iodine-absorbed time : 6 h (a), 12 h (b), 18 h (c), 24 h (d), and 30 h (e).

를 정성적으로 비교해 본 결과, 11종의 전분 종이 모두 요오드 흡수 시간이 길수록 더 강한 색상으로 변하는 경향이 나타났으나 종이 종류에 따라 색상 변화 정도(채도 변화)는 달랐다. 11종의 종이 시료들 중 기준 발한 측정 종이로 사용되어 온 N1 종이를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 종류의 종이에서 시간에 따라 일정 농도씩 균일하게 진해진 것은 아니었다(갑자기 진해졌다가 색상 변화가 없거나 그 반대의 경우도 존재함). 대체로 요오드 흡수 6 ~ 12시간 동안 현격한 색상 변화를 보였으며, 이후 18 ~ 30시간까지 어느 정도의 색상 변화는

일어났으나 변화의 정도는 미미했다.

3. 종이 종류에 따른 능동한선 형상 각인

총 11종의 전분 종이 중 N1(N2), N4, N5 종이에 능동한선의 형상이 가장 명확하게 각인되었다(Fig. 6). 단, 동일 종이라고 해도 요오드 흡수 시간에 영향을 받았는데, N1(N2) 종이의 경우 30 시간 흡수된 조건에서, N4 종이는 6 시간 흡수된 조건에서, N5 시료는 24 시간 흡수된 조건에서 능동한선의 형상이 가장 명확히 각인되었다(Fig. 6). 가장 강한 색상 변화를 보인 N6 종이나 표면

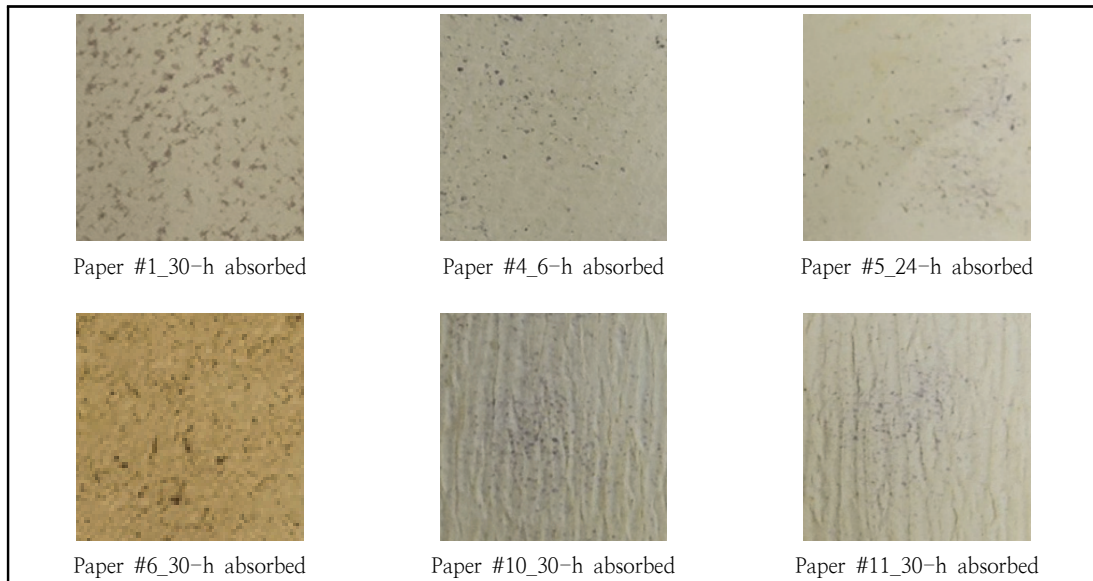


Fig. 6. Active sweat glands, which were imprinted on various papers from the right thumb after 20-min exercise (subject: 29-year-old female) (0.5 × 0.5 cm in size)

에 굴곡이 있는 N10, N11 종이의 경우 요오드 흡수 시간에 상관없이 능동한선의 형상은 불분명했다(Fig. 6).

4. 종이 종류에 따른 능동한선의 개수

ImageJ 소프트웨어를 이용해 계수된 능동한선의 수는 전분 종이별로 차이를 보였다. N3, N6, N7, N8, N9, N12 종이를 사용하였을 때 능동한선은 ImageJ 소프트웨어를 이용한 계수가 부적합

하였다. 계수가 부적합하다고 판단된 이유는 종이에 능동한선이 거의 찍히지 않았기 때문으로, 종이 자체에 함유된 전분 함량 미달 또는 표면의 셀룰로오스 섬유들 때문인 것으로 판단된다. 종이 표면에 굴곡이 있는 경우(N11, N12), 이미지 프로그램은 표면의 굴곡들도 음영으로 인식하여 능동한선으로 함께 계수하는 경향이 발견되었다. 요오드 흡수 6시간 기준 종이들로 측정된 엄지 손가락 바닥면 능동한선의 수는 평균 123 ± 34 개/0.25

Table 2. Active sweat gland density from the right thumb after 20-min exercise using iodine-papers

| | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 | N11 | N12 |
|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|-------|----------------------------------------------|---------------|----|----|-----|-----------------|-----|
| | Southworth Business 100% cotton paper | KFP student filter paper | Sketch book | Line Cover | Hanji | Arnold Grummer Reusable Couch Blotter Sheets | Blotter paper | J1 | J2 | J3 | Absorbent paper | |
| Iodine- absorbed hour | 6 | 6 | - | 6 | 6 | - | - | - | - | 6 | 6 | - |
| ASGD (glands/0.25 cm ²) | 116 | 104 | - | 112 | 84 | - | - | - | - | 164 | 152 | - |
| ASGD (glands/cm ²) | 464 | 416 | - | 448 | 336 | - | - | - | - | 656 | 608 | |

cm² 로 종이 종류 간 큰 편차가 발견되었다 (Table 2). 측정된 능동한선의 수를 단위 면적 (cm²)으로 환산하면 엄지 손가락 바닥면의 능동한선 개수는 평균 493 ± 135 개/cm²였다. 능동한선이 계수된 6종의 종이에 대해, 종이의 두께, 단위 중량, 밀도, 제습률과 전분 종이에 찍힌 능동한선 갯수 간 유의한 상관은 발견되지 않았다.

5. 능동한선 측정 시간대에 따른 능동한선 수의 차이

시간대에 따른 능동한선의 형상 차이를 비교해 보기 위해 N1 종이(6시간 요오드 흡수)를 사용하여 오전 7시 30분, 오후 13시 30분, 저녁 19시 30분 운동 후 측정된 능동한선을 분석하였다. 아침보다는 점심 시간대에 더 명확한 형상이 측정되었으며, 밤에는 능동한선이 거의 측정되지 않았다 (Fig. 7).

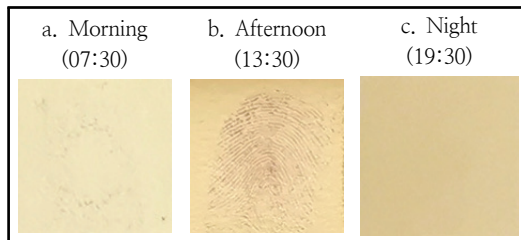


Fig. 7. Active sweat glands on the thumb measured in the morning (a), afternoon (b), and night (c) (a subject: 29-year-old female).

IV. 고찰

1. 어떠한 전분 종이들을 선정해야 하는가

요오드 종이법을 바탕으로 능동한선 수 측정을 위한 전분 종이를 선택할 때 고려해야 할 첫 번째 요소는 종이의 표면 특성이다. 본 연구 결과에 따르면 표면에 섬유질이 보이거나 굴곡이 있는 종이

보다 매끄러운 표면을 지닌 종이가 권장된다. Randall et al.(1946)은 부드러운 표면(smooth surface)을 가진 13번 바우처 본드(Voucher Bond) 종이를 사용하였다는 정보만 제공하였는데, 선행 연구 대부분 어떠한 종이를 사용하였는지에 대한 정보는 매우 제한적으로 제공되었다. 표면에 섬유질이 존재하는 경우 능동한선에서 배출된 땀이 잘 찍히지 않았으며, 표면 굴곡이 있는 경우 땀으로 인해 갈색된 점들이 종이 표면 굴곡의 음영과 섞여 이미지 프로그램으로 개별 땀샘 식별이 방해되었다. 또한, 원 종이 표면에 미세한 검은색 점들이 있는 경우에도 능동한선과 구별이 어려운 경우들이 발생하였다. 원 종이의 색상도 중요한 고려 요인으로, 가능한 백색을 선정하여야 요오드 흡수 후 지나친 갈변 현상을 방지할 수 있다. 요오드 흡수 후 지나친 갈변을 보인 종이는 땀에 의해 변경된 점들이 명확하게 구별되지 않는다.

본 연구에서 선정된 종이의 두께는 0.16 ~ 0.74 mm였으며 능동한선의 형상이 상대적으로 명확하게 각인된 N1, N4, N5 용지의 두께는 0.18 ~ 0.21 mm였다. 이는 일반 사무용품으로 사용되는 A4용지(평균 80 ~ 120 g 모조지, 두께 0.095 ~ 0.14 mm)보다 약 1.5 ~ 2.2 배 두꺼운 종이이다. 종이가 너무 얇을 경우 땀에 의해 찢어질 가능성이 있으며, 종이가 너무 두꺼우면 곡면인 인체 피부에 밀착되지 않아 능동한선 측정 실험에 적합하지 않다.

본 연구에서 정량화하지 못한 종이의 특성은 종이에 함유된 전분의 함유량이다. 현대 제지회사에서 만들어지는 종이는 크게 조림 단계, 펄프 단계, 제지 단계, 도공 단계를 거친다. 조림을 거쳐 만들어진 목재칩을 고온과 고압으로 삶은 후 섬유소와 유기물을 분리하는 공정을 펄프 단계라고 한다. 이렇게 분리된 펄프에 물과 각종 첨가물을 섞어 배

합하게 되는데, 전분은 이 단계에서 첨가된다. 이렇게 만들어진 배합 원료를 분사한 후 건조하면 1차 종이의 형태가 이루어지며 이 단계에서의 종이를 비도공지(표면 코팅을 하지 않은 종이)라고 한다. 비도공지는 필요에 따라 표면 코팅을 하게 되는데 이 단계에서 전분이 추가 코팅되어, 종이 표면의 평활도와 광택, 흡수성 등이 개선된다. 즉, 전분은 제지 단계에서 1차 첨가되며, 마지막 도공 단계에서 종이 표면에 추가 코팅될 수 있다. 본 연구에서 총 11종의 다양한 종이를 선정하였으나, 종이 자체에 함유된 전분의 양은 측정하지 못하였다. 전분의 함량이 높을수록 능동한선의 형상이 명확하게 각인될 것이라 예상해 볼 수도 있으나, 반대로 과도한 전분으로 인해 종이 표면에 각인된 능동한선의 경계가 불분명하게 퍼질 가능성도 있다. 추후 전분의 함유량에 따른 능동한선 형상 특성을 비교 분석할 필요가 있다.

2. 요오드를 얼마나 흡수시켜야 하는가

본 연구에서는 고체 요오드(시판 중량 26 g)가 기체로 승화하는 성질을 이용하여 전분 종이에 요오드를 흡수시켰다. 본 연구 결과, 흡수된 요오드의 양(흡수 시간)이 능동한선의 형상 각인에 중요한 요인이며, 종이의 종류에 따라 최적 흡수 시간이 다르며, 최소 6시간 ~ 30시간까지 다양했다. 다만, 특정 종이의 경우 너무 오랜 시간 (~ 30 시간) 요오드에 노출시키면 표면 색상이 강한 갈색으로 변하게 되는데, 이 경우 종이에 찍힌 능동한선이 잘 구별되지 않으므로 색상의 변화를 보고 최적 노출 시간을 결정해야 할 것이다. Relf et al. (2019)은 백색 전분 종이에 0.4 g의 요오드를 흡수시킨 경우 능동한선의 형상이 잘 구분되었다고 보고하였으나, 흡수 시간이나 전분 종이의 중량에 대한 정보는 제공하지 않았다. 본 연구에서는 26

g의 고체 요오드를 사용하였으며, 밀폐 용기 내부 플레이트에 위에 총 60장(12종 × 5매)의 전분 종이를 올려놓았기 때문에 종이 한 장당 평균 0.43 g의 요오드가 적용된 것으로 추정할 수 있다. 요오드 종이법으로 능동한선의 분포 혹은 개수를 측정하고자 하는 연구자들은 전분 종이(2 × 4 cm) 1매 당 고체 요오드 약 0.4 ~ 0.5g이 적용되었다는 본 연구 결과를 참고하여 요오드의 양과 요오드 흡수 시간을 예측할 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 몇몇 선행 연구에서는 전분 종이를 연속 48시간 동안 고체 요오드에 노출시켰으나, 사용된 고체 요오드의 양 및 종이의 종류에 따라 흡수도가 다르기 때문에, 종이 표면의 색상 변화를 시간에 따라 관찰할 것을 권장한다. 나아가, 요오드 흡수 전단계에서 종이의 사전 컨디셔닝 절차도 정해져야 한다. 본 연구에서는 요오드 흡수 이전 48시간 동안 제습제를 이용하여 전분 종이에 함유된 기본 수분을 제거하였다(제거된 수분량 평균 0.03 ± 0.01 mg).

3. 동일 피부면에서 연속 측정 시 편차

손가락의 능동한선수를 보고한 두 개의 선행 연구 결과를 살펴보면 손가락 끝마디 바닥 부분의 능동한선수는 350 ± 5 glands/cm²로 손가락 끝마디 등 쪽 부분의 능동한선수(126 ± 75 glands/cm²)보다 많다(Taylor & Machado-Moreira 2013). 여기서 제시된 표준편차는 피험자들 간의 편차로, 동일 부위에서 반복 측정된 값들 간, 혹은 동일 부위에서 다른 종이를 사용한 경우 얻어진 값 간의 편차가 보고된 사례는 거의 없다. 그 이유 중 하나는 동일 부위에서 시간 차이를 두고 반복 측정하더라도, 땀이 발생하는 능동한선이 매번 동일한 것은 아니기 때문이다. 동일한 한선들이 항상 동일한 수준으로 열리는 것은 아니며, 능동한선일

지라도 발한 피로로 인해 땀이 발생하지 않는 시점도 존재한다. 본 연구에서 N2, N4, N5 종이를 사용하여 손가락 바닥면에서 측정된 능동한선 수는 각 416, 448, 336 glands/cm²로 큰 편차를 보였는데, 이 편차는 종이 특성에서의 차이뿐만 아니라 측정 시점의 차이도 반영한다고 보아야 한다. 따라서, 능동한선은 단일 시점에서의 1회 측정보다 시간에 따른 변화를 연속해서 측정하는 것이 바람직하다. 또한 반복 측정 시 존재하는 편차를 고려하여 동일 시점에서도 2회 이상 반복하여 측정 후 그 평균값을 대푯값으로 사용할 것을 권장한다.

4. 하루 중 어느 시간대에 측정해야 하는가

능동한선 형상의 명확도를 높이는데 중요한 또 다른 인자는 능동한선을 측정하는 시간대이다. 본 연구에서는 시간대에 따른 차이를 비교하기 위해 오전, 낮, 저녁 시간대에 능동한선 발현 정도를 관찰하였는데, 오전과 낮 시간대에 나타난 능동한선의 형상이 저녁에 측정된 능동한선의 형상에 비해 보다 명확하고 더 많았다. 이는 인체 고유한 일주기 리듬의 영향으로 해석할 수 있다(Aoki et al. 1995). 일반적으로 동일한 열스트레스임에도 불구하고, 오전에 더 빨리 땀이 발생하며, 발한이 시작되는 직장온도도 더 낮은 것으로 알려져 있다(Inoue & Kondo 2013). 본 연구에서도 저녁보다 아침 혹은 낮 시간대에 측정된 능동한선의 수가 더 많고 형상이 명확하였는데 그 이유는 오후에 비해 오전/낮 시간대에 능동한선이 더 빨리, 더 많이 동원되었기 때문인 것으로 추정된다. 따라서, 능동한선 분포 관찰이나 계수는 하루 중 동일 시간대에 이루어져야 하며, 저녁 시간대보다는 오전 시간대에서의 측정을 권장한다.

5. 측정의 신뢰도에 영향을 미치는 다른 요인들은 무엇인가

피부의 땀샘은 전신에 동일한 밀도로 존재하지 않는다. 또한 손가락 피부라고 해도 손가락의 어느 면을 선택하는지에 따라 능동한선의 수가 현격히 달라질 수 있다. 이러한 이유로 인해 Weiner & Lourie(1969)는 최소 90 cm² 보다 넓은 면적에서 능동한선이 계수되어야 한다고 주장했다. 하지만, 손가락이나 발가락 등과 같이 좁고 긴 구조일 경우 이 면적을 적용할 수는 없다. 대부분의 선행 연구들은 1 cm²의 넓이에서 측정된 능동한선수를 보고하는데, 이는 대체로 더 큰 면적(2 × 2 cm 또는 1×1 inch)의 정사각형 전분 종이를 사용하여 능동한선을 각인한 뒤, 종이의 정중앙 1 × 1 cm의 면적 내 능동한선을 계수하는 것이다. 사용한 종이에서 계수할 면적을 선정할 때 항상 동일한 부분을 선택하는 것도 중요하다. 본 연구에서는 여성 피험자 엄지손가락 바닥면 넓이를 고려하여 0.5 × 0.5 cm의 면적 내 능동한선 수를 계수하였다. 또한 전분 종이를 땀이 나고 있는 피부 위에 놓을 때 접촉 시간과 종이를 누르는 압력도 측정의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있다(Park et al. 2020). 너무 오랜 시간 종이를 대고 있거나 너무 강한 압력으로 종이를 누르게 되면 땀이 번지게 되어 여러 개의 능동한선들이 합쳐지는 현상이 발생한다. 한 사람의 숙련된 실험자에 의해 동일한 압력으로 동일한 시간 동안 측정이 이루어져야 한다. 본 실험에서는 모든 전분 종이 시료에 대해 동일한 1인의 실험자가 3초간 측정하였다.

6. 연구의 제한점 및 후속 연구

전술한 바와 같이 본 연구에서는 사용된 종이에 함유된 전분의 양을 정량화하지 못했다. 국내 시판되는 대부분의 종이는 전분을 함유하고 있으나 그 양이 알려져 있지는 않다. 후속 연구에서는 일반 A4 용지의 약 1.5 ~ 2.2배 두께이면서 표면 굴곡이 없고 섬유소가 보이지 않는 매끄러운 백색 종이를 선택하되, 해당 종이 표면에 전분의 양을 단계별로 추가하여 능동한선의 형상 발현을 비교해 볼 필요가 있다. 둘째, 본 연구에는 한 명의 여성 피험자만이 참여하였기 때문에 연구 결과를 보편적으로 적용할 수 없다. 본 연구는 일차적으로 선택된 다양한 종이들의 특징을 분별해 내는 것이 목적이었으며, 추후 통계적으로 유의미한 수의 피험자를 모집하여 다양한 환경 혹은 운동 조건의 영향, 부위별 차이 등을 검증해 볼 수 있다. 또한 본 연구에서는 한 명이 총 5회의 운동을 수행하였기 때문에 발한 반응에 적응이 이루어졌을 가능성도 완전히 배제할 수는 없다. 그러나, 단기 열적응은 전신에 땀이 날 정도로 고온에서 고강도의 운동을 연속 7일 이상 수행하는 경우 발현된다고 알려져 있기 때문에(Periard et al. 2015; Daanen et al. 2018), 기온 25°C, 습도 50% RH인 환경에서 20분 간 중등 정도의 운동을 단속 5일 간 수행한 본 실험을 통해 열적응이 발현되었을 것이라 보기는 어렵다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 지난 세기 동안 피부면의 능동한선수 측정에 사용되어 온 요오드 종이법의 정확도를 검증하기 위해, 시판되는 다양한 전분 종이들을 수집한 후, 요오드 흡수 시간(흡수량) 및 종이의 표면 특성, 측정 시간대에 따른 능동한선 형상을 비교 분석하였다. 종이 종류에 따라 최적 형상이

발현되는 요오드 흡수 시간에서 차이를 보였으며, 최소 6시간에서 최대 30시간 사이에서 최적 시간이 결정되었다. 종이 표면에 섬유질이 존재하지 않으며, 표면 굴곡 없이 매끈한 종이에서 능동한선의 형상이 보다 명확히 각인되었다. 전분 종이의 두께나, 중량, 밀도, 제습률이 능동한선 형상에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었으나 너무 얇거나 너무 두꺼운 종이보다는 약 0.2 mm 두께의 종이가 권장되었다. 본 연구에 사용된 11종의 종이 중 N1(N2와 동일한 종이), N4, N5 종이가 피부 능동한선수 측정을 위해 추천되었다. 측정되는 피부 면적이 넓을수록 측정의 신뢰도를 높일 수 있으나, 손가락이나 발가락과 같이 좁고 긴 형태의 피부 형태로 인해 넓은 면적에서의 측정이 불가능한 경우, 동일 부위에서 여러 번 반복 측정하여 결과의 신뢰도를 높일 필요가 있다. 오후나 저녁 시간대보다는 아침이나 낮 시간대에 더 많은 능동한선이 더 명확하게 관찰되었으므로, 동일 시간대 측정도 중요하다. 결론적으로 고온 환경에 노출되거나 운동 시 능동한선을 통한 발한 분포를 관찰하고자 요오드 종이법을 선택하는 경우, 종이 표면에 가시적인 섬유질이 존재하지 않고, 굴곡이 없이 매끈하며, 미세한 검은색 점들 없이, 균일한 백색면을 지닌 전분 종이를 권장한다. 실험자는 요오드 흡수 시간에 따른 표면 색상 변화를 사전 비교하여 최적 흡수 시간을 도출할 필요가 있으며, 실험자 간 편차를 줄이기 위해 숙련된 1인의 실험자가, 동일한 접촉 시간 및 누름 압력을 적용하여 측정의 신뢰도를 향상할 필요가 있다. 마지막으로, 지난 세기 동안 현저한 발전을 보인 첨단 과학기술에 비해 피부 능동한선 측정법은 큰 진전 없이 초기 측정법이 그대로 적용되고 있다는 점도 기억할 필요가 있다. 본 연구에서 얻어진 결과들을 바탕으로 보다 편리하고 빠르며 신뢰할만한 새로운

측정법 개발이 이루어질 수 있게 되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 기초연구실사업으로부터 지원받아 수행되었습니다(2022R1A4A5034046).

References

- Aoki K, Shiojiri T, Shibasaki M, Takano S, Kondo N, Iwata A(1995) The effect of diurnal variation on the regional differences in sweating and skin blood flow during exercise. *European J Appl Physiol Occup Physiol* 71, 276-280. doi:10.1007/BF00854991
- Baker LB(2019) Physiology of sweat gland function: the roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature* 6(3), 211-259. doi:10.1080/23328940.2019.1632145
- Collins K(1989) Sweat glands: eccrine and apocrine. *Pharmacology of the Skin I*, 193-212. doi:10.1007/978-3-642-73797-8_11
- Daanen H, Racinais S, Périard JD(2018) Heat Acclimation Decay and Re-Induction: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 48, 409-430
- Davis SL, Wilson TE, Vener JM, Crandall CG, Petajan JH, White AT(2005) Pilocarpine-induced sweat gland function in individuals with multiple sclerosis. *J Appl Physiol* 98(5), 1740-1744. doi:10.1152/jappphysiol.00860.2004
- Folk GE, Semken A(1991) The evolution of sweat glands. *Int J Biometeorol* 35, 180-186. doi:10.1007/BF01049065
- Gagnon D, Crandall CG(2018) Sweating as a heat loss thermoeffector. *Handbook Clin Neurol* 156, 211-232. doi:10.1016/B978-0-444-63912-7.00013-8
- Gagnon D, Ganio MS, Lucas RA, Pearson J, Crandall CG, Kenny GP(2012) Modified iodine-paper technique for the standardized determination of sweat gland activation. *J Appl Physiol* 112(8), 1419-1425. doi:10.1152/jappphysiol.01508.2011
- Hashimoto K, Hori K, Aso M(1986) Sweat glands. *Biology Integument* 2, 339-356. doi:10.1007/978-3-662-00989-5_19
- Jung D, Kim YB, Lee JB, Muhamed AMC, Lee JY (2018) Sweating distribution and active sweat glands on the scalp of young males in hot-dry and hot-humid environments. *Eur J Appl Physiol* 118, 2655-2667. doi:10.1007/s00421-018-3988-7
- Kuno Y(1956) Human perspiration. *Amer Lect Ser*, 285
- Lee JB, Bae JS, Matsumoto T, Yang HM, Min YK(2009) Tropical Malaysians and temperate Koreans exhibit significant differences in sweating sensitivity in response to iontophoretically administered acetylcholine. *Int J Biometeorol* 53, 149-157. doi:10.1007/s00484-008-0197-9
- Lipponen J, Astola J(2004) Novel method for quantitative starch penetration analysis through iodine staining and image analysis of cross-sections of uncoated fine paper. *Nordic Pulp Paper Res J* 19(3), 300-308. doi:10.3183/npprj-2004-19-03-p300-308
- Meade RD, Louie JC, Poirier MP, McGinn R, Fujii N, Kenny GP(2016) Exploring the mechanisms underpinning sweating: the development of a specialized ventilated capsule for use with intradermal microdialysis. *Physiol Rep* 4(6), e12738. doi:10.14814/phy2.12738
- Park TH, Lee JB, Lee HJ, Yun B(2020) Sex-related differences in sudomotor function in healthy early twenties focused on activated sweat gland density. *J Physiol Investigation* 63(1), 1-6. doi:10.1152/jappphysiol.00266.2021
- Peel JS, McNarry MA, Heffernan SM, Nevola VR, Kilduff LP, Waldron M(2022) Measurement of thermal sweating at rest and steady-state exercise in healthy adults: inter-day reliability and relationships with components of partitioned calorimetry. *Plos One* 17(12), e0278652. doi:10.1371/journal.pone.0278652
- Périard JD, Racinais S, Sawka MN(2015) Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports. *Scand J Med Sci Sports* 25 (S1), 20-38
- Randall WC(1946) Quantitation and regional distribution of sweat glands in man. *J Clin Invest* 25(5), 761-767. doi:10.1172/JCI101760
- Relf R, Willmott A, Flint MS, Beale L, Maxwell N (2019) Reliability of a wearable sweat rate

- monitor and routine sweat analysis techniques under heat stress in females. *J Therm Biol* 79, 209-217. doi:10.1016/j.jtherbio.2018.12.019
- Sato K, Kang W, Saga K, Sato K(1989) Biology of sweat glands and their disorders. II. Disorders of sweat gland function. *J Am Acad Dermatol* 20(5), 713-726. doi:10.1016/S0190-9622(89)70081-5
- Schwarck JB, Burdon CA, Taylor EA, Peoples GE, Machado-Moreira CA, Taylor NA(2019) Thermogenic and psychogenic sweating in humans: identifying eccrine glandular recruitment patterns from glabrous and non-glabrous skin surfaces. *J Therm Biol* 82, 242-251. doi:10.1016/j.jtherbio.2019.04.017
- Taylor NA, Machado-Moreira CA(2013) Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans. *Extreme Pysiol Med* 2, 4. doi:10.1186/2046-7648-2-4
- Weiner JS, Lourie JA(1969) *Human Biology: A Guide to Field Methods*. Oxford: International Biological Programme Handbook no. 9, Blackwell Scientific Publications