



ISSN 1229-8565 (print)

한국지역사회생활과학회지

Korean J Community Living Sci

<http://doi.org/10.7856/kjcls.2017.28.3.365>

ISSN 2287-5190 (on-line)

28(3): 365~375, 2017

28(3): 365~375, 2017

전자섬유의 피부 밀착의복 적용을 위한 인체 부위별 피부 최대변형률

정 다 희¹⁾ · 김 소 연¹⁾ · 손 아 림¹⁾ · 전 보 영¹⁾ · 김 선 영¹⁾ · 이 주 영^{1), 2)†}

서울대학교 의류학과¹⁾ · 서울대학교 생활과학연구소²⁾

Regional Skin Maximal Elongation Rate for Applying E-textiles to Tight-Fit Clothing

Dahee Jung¹⁾ · So-Yeon Kim¹⁾ · Arim Sohn¹⁾ · Bo-Young Jeon¹⁾ · Seon-Young Kim¹⁾ · Joo-Young Lee^{1), 2)†}

Dept. of Textiles, Merchandising and Fashion Design, Seoul National University, Seoul, Korea¹⁾

Research Institute of Human Ecology, Seoul National University, Seoul, Korea²⁾

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the maximal elongation rate and area expansion ratio of human skin in various postures. Five males and five females (male: 23 ± 2 yr in age, 177.9 ± 4.8 cm in height, 76.7 ± 8.8 kg in body weight, 24.2 ± 2.5 in BMI, $16.2 \pm 3.4\%$ in body fat; female: 22 ± 1 yr, 163.2 ± 3.6 cm, 51.4 ± 2.7 kg, 19.3 ± 1.6 , $27.4 \pm 6.7\%$ BF) participated in this study. Measurements were conducted using a pen and tape on the elbow, knee, wrist, shoulder, and neck. Subjects held postures so that each joint of the body regions was bent at its maximal level. The results were as follows: 1) The maximal elongation rate of skin showed a significant difference among the regions: $16.6 \pm 3.4\%$ for the wrist, $22.4 \pm 5.5\%$ for the neck (back), $37.6 \pm 11.3\%$ for the shoulder, $42.6 \pm 10.0\%$ for the knee, and $43.9 \pm 4.0\%$ for the elbow ($p < 0.05$). 2) The maximal expansion rate of the body surface area had the greatest values on the elbow ($93.7 \pm 6.4\%$) and knee ($74.8 \pm 10.8\%$). 3) No significant difference was found between males and females. In summary, maximal values of skin elongation and expansion rates in vivo were greater than in vitro values known from previous reports. These results can be applied to develop electronic fibers or textiles for wearable tight fit work clothing as well as fitness wear.

Key words: skin elongation rate, skin tension, surface area expansion rate, e-textiles, Langer's line

This research was supported by Nano-Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning [No.2016M3A7B4910]

Received: 16 June, 2017 Revised: 21 August, 2017 Accepted: 29 August, 2017

†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.

I. 서론

전자섬유(e-textiles)란 전기 또는 광 신호를 생산, 저장, 전달할 수 있는 섬유형태의 전기전자 소재를 일컫는 것으로, 최근 기능성 개인보호복에 대한 관심과 스포츠레저 의류산업의 급격한 성장으로 유연전자섬유(flexible e-textiles)를 적용한 인체 밀착형 스마트웨어에 대한 관심이 증가하고 있다. 유연전자섬유나 웨어러블 센서 등이 적용된 의류들은 추구하는 성능에 따라 몇 가지로 나누어지는데 대표적으로 심박수나 혈압과 같은 생체신호를 모니터링하는 의류, 인체를 보온하는 발열 의류, 외부 유해 환경을 모니터링하는 의류, 착용자의 위치를 추적하는 의류, 착용자의 자세나 동작을 감지하는 의류, 에너지를 수확하는 의류, 가시성을 높이기 위한 발광 의류 등으로 나눌 수 있다(Lee 2014). 이는 특히 군인이나 소방관 등 극한 환경에 노출된 작업자들의 안전과 작업효율 향상을 위한 기술로 확장 적용되어 개인보호복이 전자섬유적용의류 성능평가를 위한 기반으로 활용되고 있다.

전자섬유기술을 적용할 수 있는 다양한 스마트웨어들 중 피부밀착 정도가 중요한 요소로 여겨지는 분야는 착용자의 생물학적 정보를 모니터링하는 의류이다. 손목이나 가슴, 목 피부에서의 심박수를 센싱하거나, 땀, 근전도, 피부 혈류변화 등을 모니터링하는 센서는 피부와의 밀착이 필수적이다. 예를 들어, 심박수 신호 센싱의류의 경우 피부와 전극이 직접 접촉된 경우에만 심장활동 신호가 획득되기 때문에 접촉식 센싱방식에 기반을 둔 전극방식이 사용되고 있다. 비접촉식 센싱 방식에 기반한 직물전극의 경우 모니터링 중 신호 획득 중단이나 잡음 등으로 인해 실용화 단계로 나아가기엔 아직은 해결해야 할 시안들이 존재한다(Lee 2014). 최근 아디다스나 Hexoskin사에서 개발되어 판매되고 있는 심박수 센싱기능셔츠의 경우에도 가슴 부위 피부 밀착이 필수적이다. 전자섬유는 카본블랙을 혼입하거나 CNT 코팅, 알루미늄 코팅, 구리와이어 코팅 등에 의해 제조될 수 있는데(Park 2014), 이를 기반으로 생체반응 센싱이나 신호전달 등을 위한 텍스타일

센서가 제작된다. 나아가, 전자섬유는 경사나 위사 방향 등으로 직조되어 텍스타일 회로를 구성하게 되는데, 이 회로가 의복에 삽입되는 경우 경위사 방향의 신축성 정도가 중요해진다. 현재 시판 중인 운동복이나 수영복과 같이 피부에 밀착되는 의복들은 신축성 있는 소재(예: 스판덱스)로 제작되는데, 개발 중인 전자섬유들을 피부 밀착 의복에 적용하기 위해서는 전자섬유의 가용 신장률 범위가 중요한 관건이 될 수 있다.

전자섬유의 개발 단계에서 가용 신장률의 범위를 정하기 위해서는 먼저 인체 피부신장률을 파악할 필요가 있다. 피부의 신장 정도는 인체의 자세와 동작에 의해 부위별로 달라지므로 센서가 부착되는 인체 부위의 동작 특성에 따른 피부신장률이 조사될 필요가 있다. 유연한 전자섬유는 생체반응 모니터링 센싱 뿐만 아니라 데이터 신호 전달이나 저장에도 사용된다. 즉, 가슴이나 손목, 발목, 목과 같은 부위에서의 생체반응 모니터링뿐만 아니라 이러한 생체정보들을 전달하는 회로로서 전신 어느 부위에건 확장 배치될 수 있다. 따라서 다양한 자세와 동작에서 가능한 인체 부위별 최대신장률의 범위를 조사하여, 이 범위를 만족하는 가용신장률을 갖는 전자섬유 개발을 제안하는 것이 타당할 것이다. 또한 체형과 피하지방 분포에는 기본적인 성차가 존재하기 때문에(Kim et al. 2013), 다양한 동작 시 피부의 변화율이 있어서도 성차가 존재하는 지 함께 파악될 필요가 있다.

이처럼 생체반응 모니터링 등을 목적으로 개발되는 유연 전자섬유의 인체착용성을 확보하기 위해서는 피부 밀착 시 인체 부위별, 성별 피부의 최대신장률에 대한 조사가 선행되어야 한다. 특히 다양한 자세나 동작에서의 피부 최대신장률과 체표면적 증가는 전자섬유 및 직물회로 연구자들에게 유용한 정보가 될 수 있다. 인체 피부에는 피부 콜라겐 섬유의 자연스런 방향에 의해 만들어진, 피부 아래 근섬유의 방향과도 평행한, 랑거선(Langer's line)이라는 게 존재하는데, 이는 다양한 자세나 동작에서 근육의 움직임에 따른 피부신장률을 이해하는 데 중요한 피부의 조직학적 선으로 해석된다. 이러한 랑거선에 대한 이

해를 바탕으로 스트레치성 밀착의복의 패턴을 분석한 연구(Jeoung 2006)나 운동신경이 분포하는 피부 분절을 기반으로 제작된 밀착의복 연구(Kim & Hong 2012)도 보고된다. 인체 부위별 피부신장률이나 인체 변형을 다룬 선행연구들을 살펴보면, 무릎 아래 다리 안쪽 부위와 무릎의 중앙을 지나는 부위의 피부 분절 변화량은 크지 않으며(Kim & Hong 2012), 의복압이 높은 어깨 부위 원단의 축소율은 30~40%가 적정하다고 보고된다(Jeoung 2008). MRI 의료영상 정보를 활용하여 침대에 누운 자세에서 인체 국소부위 형상변형을 조사한 연구(Ko et al. 2010)에 따르면, 피하지방이 많은 부위에서의 형상 변형률이 상대적으로 크다. Seo et al.(2009)는 모션 캡처장치를 이용해 인체 하지 동작에 따른 무릎 부위 피부 변형을 측정하는 방법을 제안한 바 있으며, 최근, Kim et al.(2015)은 몸통의 피부 변화량 분석을 통해 3D 컴프레션 상의 설계를 수행하였다.

이상과 같이 스마트웨어 적용을 목적으로 유연 전자섬유를 개발하는 경우 뿐만 아니라, 의료용으로 사용되는 피부대용물질 개발에도 피부의 최대신장률에 대한 정확한 정보는 필수적이다. 현재까지 몇몇 연구들이 수행되었음에도 불구하고, 다양한 자세에서 인체 부위별 최대값, 즉 길이 방향으로의 최대신장률과 체

표면적의 최대증가율을 보고한 국내 연구는 거의 없으며 성별에 따른 차이 유무를 다룬 연구도 거의 없다. 이에 본 연구는 다양한 자세에서 부위별 피부의 최대신장률과 면적증가율 측정을 목적으로 하였으며, 특히 인체에서 최대 굴곡 관절 부위인 팔꿈치와 무릎, 허리, 뒷목을 선정하여 이 부위들에서의 최대 피부신장률을 비교하였고, 성별에 따른 차이 유무도 추가적으로 분석하였다.

II. 연구 방법

1. 피험자 특성, 측정부위 및 측정점 선정

본 연구에는 한국인 평균 체형 범위에 속하는 20대 남성 5명과 여성 5명, 총 10명이 실험에 참여하였다 (남성: 나이 23 ± 2 세, 키 177.9 ± 4.8 cm, 체중 76.7 ± 8.8 kg, BMI 24.2 ± 2.5 , 체지방률 $16.2 \pm 3.4\%$ BF; 여성: 나이 22 ± 1 세, 키 163.2 ± 3.6 cm, 체중 51.4 ± 2.7 kg, BMI 19.3 ± 1.6 , 체지방률 $27.4 \pm 6.7\%$ BF). 측정 부위는 총 다섯 부위로, 인체 운동학적 관점에서 몸의 움직임 중 관절의 가동 범위가 가장 넓은 부위인 팔꿈치, 무릎, 양 견관절(등), 목관절, 손목 관절 부위가 선정되었으며, 각 부위의 피부 최대 신장 자세에서 피부 변화율이 측정되었다. 본 연구에서 가슴이나 배

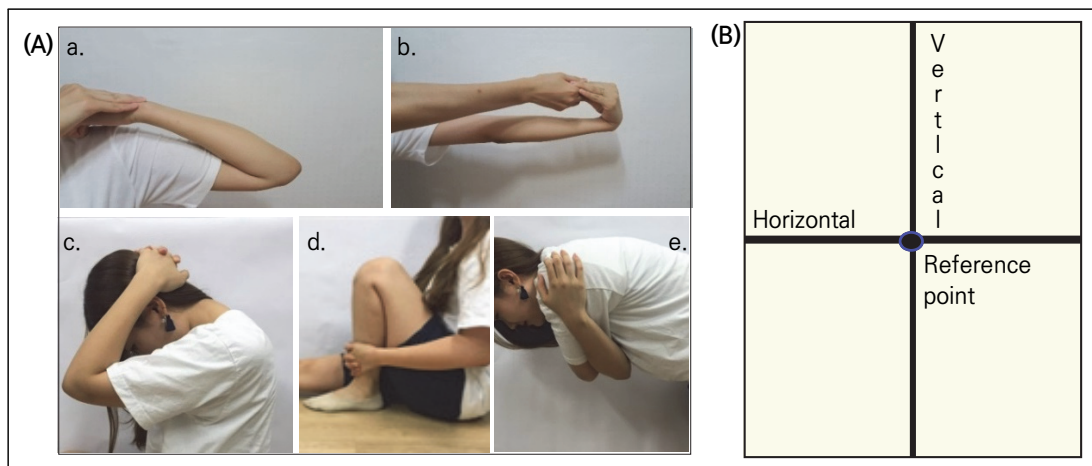


Fig. 1. Body postures while measuring skin elongation (A): a. elbow, b. wrist, c. neck, d. knee, and e. shoulder, and the reference rectangle of measurement (B)

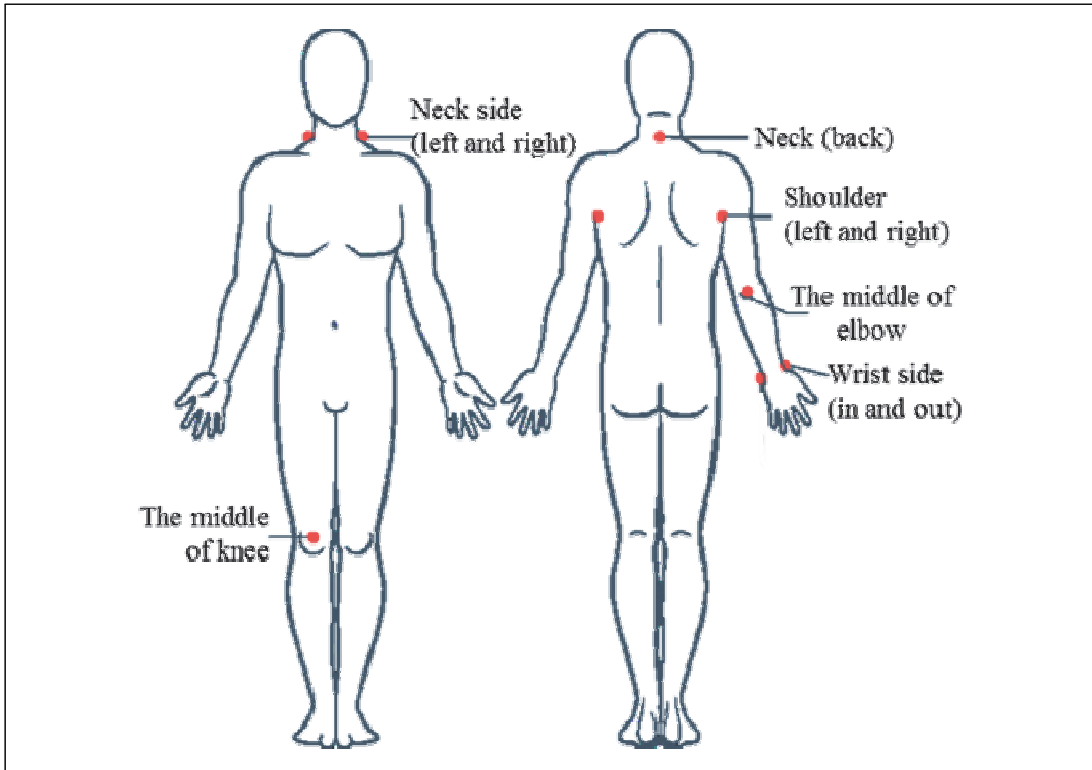


Fig. 2. Body regional reference points for measuring skin elongation on the five regions of the body [the wrist (in and out), neck (side and back), elbow, knee, and shoulder (left and right)]

부위의 피부신장률 측정이 배제된 이유는 이러한 몸통 부위들은 관절 움직임에 의해 최대 신장이 기대되는 부위가 아니기 때문이었다. 본 연구에서 선택된 다섯 부위 관절 중 다각도의 관절 움직임 방향을 가지는 손목과 목 관절 부위는 각각 두 자세(손목을 앞으로 굽히기, 손목을 뒤로 젖히기; 목을 옆으로 눕히기, 목을 앞으로 굽히기)에서 그 변화율이 조사되어 총 일곱 자세(총 다섯 부위)에서의 변화율이 측정되었다(Fig. 1A). 각 부위별 측정점은 사이즈 코리아에서 제공하는 표준 인체측정 기준점을 참고하여 정해졌으며(Fig. 2), 각 측정점에서의 측정 기준점은 Fig. 1B에 나타난 바와 같이 수평선과 수직선이 교차되는 중심 위치에 해당하였다. 본 연구는 피험자들에게 실험 참여 전 충분한 설명을 제공한 후 IRB에 의한 자발적 참여 동의서를 받았다.

2. 측정방법

측정 시 모든 피험자는 동작을 방해하지 않는 넉넉한 사이즈의 동일한 실험용 반소매 티셔츠와 반바지를 착용하였다(Fig. 1A). 피부변형량을 측정하는 일반적인 방법으로는 크로스커트법, 날인법, 미연신사법 등이 사용되어 왔으나 본 연구에서 이러한 방법들 대신 피부에 직접 기준선을 그어 측정한 이유는 착용의복에 의한 잠재적 오차를 제거하고 피부의 직접적 변형량을 추정하기 위함이다. 본 연구에서는 펜을 이용하여 인체 각 부위별 관절의 정중앙 측정점을 기준으로 가로선과 세로선의 기준값으로 이루어진 직사각형을 직접 피부 표면에 그렸으며 각 부위별 직사각형의 면적은 25~323 cm²로 정해졌다(Table 1). 인체 부위별 직사각형의 크기들은 직사각형의 직선 변형없이 최대로 그릴 수 있는 범위에서 선정되었다. 줄자를 이용하여 인간공학적 정 자세에서 각 부위별 가로와 세로 길이를 측정하였으며,

이를 이용하여 직사각형의 면적을 계산하였다. 이어 각 부위별 피부가 최대로 늘어날 수 있는 최대 신장 자세를 취하여(Fig. 1A), 변화된 수직방향(지면과 수직인 방향)의 길이를 측정하여 길이 방향의 신장률을 계산하였다. 부위별 관절 가동 자세는 모두 랑계선을 따라 피부 신장을 최대화 할 수 있는 방향으로 설정되었으며, 최대 신장을 유도하기 위해 부위별 관절을 최대 가동할 수 있는 자세를 취하게 하였다. 즉, 피험자들에게 스스로의 최대 관절 가동 범위를 충분히 연습하게 한 후 본 측정이 실시되었다. 인체 각 부위별 관절을 최대한 구부린 혹은 뒤로 젖히거나 옆으로 누인 자세에서 변형된 직사각형의 가로와 세로 길이를 재측정하여 다음의 식을 이용해 피부 변형률, 즉 길이 방향의 피부 신장률과 체표면적 변화율을 계산하였다(Eq. 1).

$$\text{피부변형률} = [(A-a)/a] \times 100 \quad \text{--- (Eq. 1)}$$

a: 정자세의 수직 길이 및 면적

A: 최대한 구부린 자세의 수직 길이 및 면적

어깨 부위 변화를 측정 시 견관절과 양겨드랑 접힘 점을 이은 기준선이 사용되었는데, 피험자별 양겨드랑 접힘점의 길이차로 인해 기준 직사각형 선정에 어려움이 발생하여 어깨부위에서의 면적 증가율은 분석에서

제외하였다(Table 1). 모든 동작 및 자세는 피험자별 3회 이상 반복 연습을 통해 충분히 익숙해진 상태에서 측정되었다.

3. 분석 방법

모든 결과는 평균과 표준편차(SD)로 나타내었고, 기본적인 통계처리는 SPSS 22.0를 이용하였다. 피부 최대 길이신장률과 체표면적 변화율의 부위별 인체 부위별 차이는 일원배치분산분석(ANOVA)를 사용하여 검정하였으며, 유의한 차이가 있는 항목에 대해 Turkey의 Post hoc test를 수행하였다. 성차를 검증하기 위해 t 검정이 실시되었다. 피부 길이 방향 최대신장률과 면적 최대변화율 간 상관관계를 파악하기 위해 일곱 자세 중 견관절을 제외한 총 여섯 자세(손목 안쪽 굽힘, 손목 바깥 젖힘, 목 옆 눕힘, 목 앞으로 굽힘, 무릎 굽힘, 팔꿈치 굽힘)에 대해 Pearson의 상관분석이 이용되었다. 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 로 정하였다.

III. 결과

1. 피부의 부위별 최대신장률

인체 부위별 피부 최대신장률은 팔꿈치가 $43.8 \pm 4.0\%$ (mean \pm SD)로 가장 컸으며, 이어 무릎 $42.6 \pm$

Table 1. Regional measurement points and reference lengths on the skin

Measurement point		Reference length(cm)		Surface area(cm ²)
Wrist	Side (in and out)	Horizontal	2.5	25
		Vertical	10.1	
Neck	Side (left and right)	Horizontal	5.1	39
		Vertical	7.6	
	Back	Horizontal	5.1	71
		Vertical	14.0	
Knee	Middle	Horizontal	12.7	323
		Vertical	25.4	
Elbow	Middle	Horizontal	10.2	155
		Vertical	15.2	
Shoulder	Rear of folded point (left and right)	Horizontal	Individual value	
		Vertical	-	

Note: the reference points and lengths were applied to all subjects.

10.0%과 견갑골 $37.6 \pm 11.3\%$ 순이었다. 이 세 부위는 손목 안($16.6 \pm 3.4\%$)과 손목 바깥($15.5 \pm 4.7\%$), 목 옆($17.2 \pm 8.6\%$)과 목 뒤($22.4 \pm 5.5\%$) 방향 최대 신장률 값에 비해 유의하게 큰 값을 보였다($p < 0.01$) (Fig. 3A). 인체 부위별 피부 최대신장률에서 유의한 성차는 발견되지 않았다(Fig. 3B).

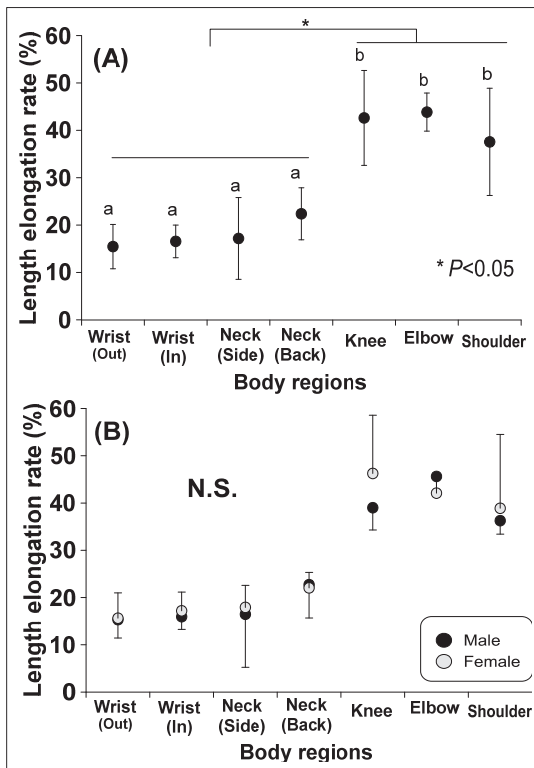


Fig. 3. Body regional differences (A) and sex differences (B) in maximum skin elongation rate(a and b: group differences by Tukey's Post hoc test; N.S.: not significant) (N=5 for male and N=5 for female; Data were expressed as mean ± SD)

2. 체표면적의 최대증가율

인체 부위별 체표면적 최대증가율을 수직 길이 변화량과 수평 길이 변화량을 이용하여 계산한 결과 부위별 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$) (Fig. 4A). 부위별 면적증가율이 가장 큰 부위는 팔꿈치로 $93.7 \pm 6.4\%$

였으며, 다음으로 무릎이 $74.8 \pm 10.8\%$ 로 두 번째로 큰 면적 증가율을 보였다. 면적증가율이 가장 적은 부위는 목 옆으로 $2.2 \pm 13.5\%$ 였다. 손목 바깥($15.1 \pm 4.9\%$), 손목 안($20.2 \pm 7.0\%$) 그리고 목 뒤($22.8 \pm 8.3\%$)는 통계적으로 동일한 그룹으로 묶였다. 다섯 부위 중 목 옆과 무릎은 표준편차가 10% 이상으로 피험자별 큰 차이를 나타내었다. 성별에 따른 면적증가율의 차이를 분석해 본 결과 다섯 부위 모두에서 유의한 성차는 발견되지 않았다(Fig. 4B).

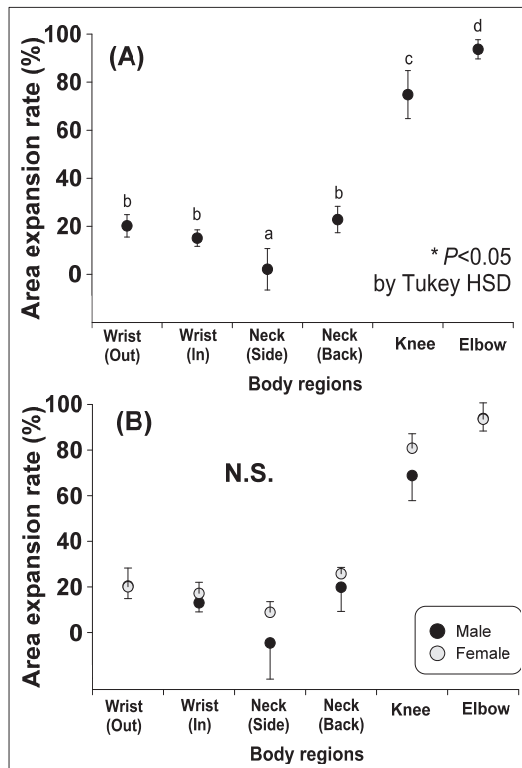


Fig. 4. Body regional differences (A) and sex differences (B) in maximum body surface area expansion rate(a and b: Group differences by Tukey's Post hoc test; N.S.: not significant) (N=5 for male and N=5 for female; Data were expressed as mean ± SD)

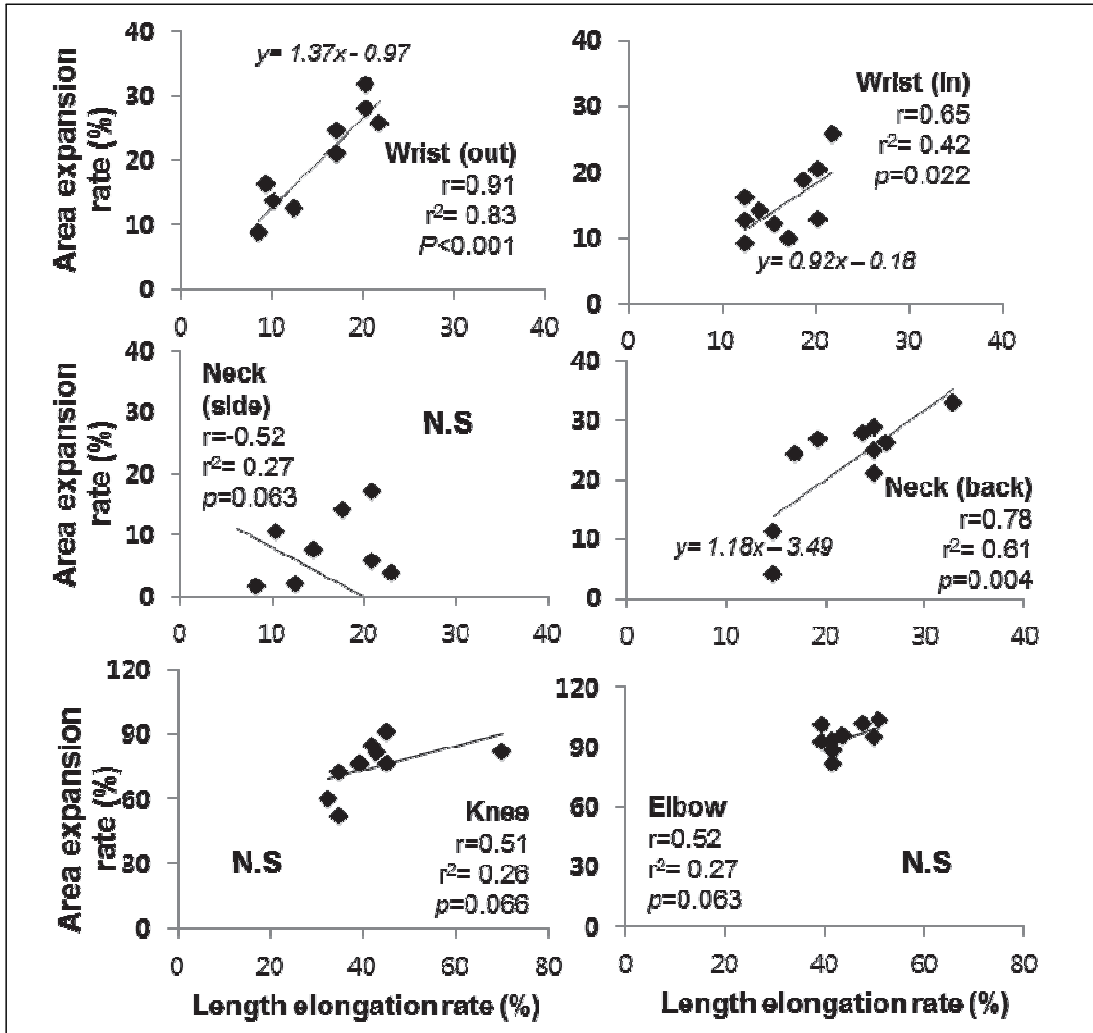


Fig. 5. Relationships between skin elongation and surface area expansion rate on the wrist, neck, knee, and elbow (N.S: not significant; N=5 for male and N=5 for female)

3. 피부 최대신장률과 체표면적 변화율 간 상관관계

부위별 피부 최대신장률과 체표면적 변화율 간 상관관계를 분석한 결과, 손목(안쪽 방향 굽힘), 손목(바깥 방향 굽힘) 및 목(앞으로 굽힘)에서 유의한 양의 상관관계가 발견된 반면(p<0.05), 목(옆으로 굽힘)과 무릎, 팔꿈치에서는 유의한 상관이 발견되지 않았다(Fig. 5). 손목(바깥 방향 굽힘)과 목(앞으로 굽힘)의 경우 상관계수는 각각 0.91과 0.78로 매우 높은 상관도를 보여주었다.

IV. 고찰

1. 인체 부위별 피부 최대신장률

피부 최대신장률을 보인 부위는 팔꿈치(평균 ± SD: 43.8 ± 4.0%)와 무릎(42.6 ± 10.0%) 피부로 모두 평균 40% 이상의 신장률을 보였으며, 본 연구에서 선정된 다섯 부위 중 가장 적은 신장률을 보인 손목도 안쪽 굽힘 자세와 뒤로 젖힌 자세에서의 유의차 없이 평균 15% 이상의 피부신장률을 보여 주었다. 무릎과 팔꿈치는 인체 관절 중 가장 큰 가동범위를 가지고 있기

때문에 가장 큰 신장률을 보인 것은 충분히 예상 가능한 결과였으나 본 연구를 통해 이러한 최대신장률의 값을 정량화하였다는 점에서 의의가 크다. 특히 무릎의 경우 표준편차가 10%로 크고, 70%의 신장률을 보인 피험자도 있었으므로, 유연 전자섬유개발 시 안정적인 적용을 위해 약 1.7배 이상의 신장률이 요구되어야 할 것이다.

약 2mm의 두께인 피부의 물리적 특성은 표피보다는 진피에 좌우되는데 이의 주요 구성 물질은 콜라겐과 엘라스틴으로, 콜라겐은 피부 신장(extension) 특성을 결정하는 반면 엘라스틴은 피부 변형(deformation)에 관계된다(Yang et al. 2015). 본 연구에서 얻어진 피부 신장률의 부위별 차이를 이해하기 위해 피부에 고유하게 존재하는 랑거선(Langer's line)을 언급할 필요가 있다. 랑거선이란 최대 신장을 가지는 방향에 맞춰 피부면의 방향을 정의하기 위해 사용되는 용어로, Seo et al.(2013)은 3D 스캔법을 이용하여 피부 랑거선에 기초한 피부 신장 추정법을 제시하였으며, Gallagher et al.(2012)는 등 부위 절개 피부를 이용한 인장강도 시험 결과 인간의 피부 특성은 랑거선의 방향에 높게 관여된다고 결론지었다. 본 연구에서 선정한 부위별 관절 가동 자세는 모두 랑거선을 따라 피부 신장을 최대화 할 수 있는 방향으로 설정되었기 때문에 각 자세에서의 최대신장률을 추출해낸 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서 피부 최대신장률은 팔꿈치와 무릎에서 평균 43~44%였으나, 피부가 파열되기까지 최대신장률은 35~115%까지 넓은 범위로 보고된다(Edwards & Marks 1995). 또한 피부신장률은 환경 습도나 온도에 의해서도 영향을 받는다고 보고된다. 환경 습도가 높을수록 피부신장률도 급격히 증가하여 습도가 32%RH일 경우 최대신장률이 30%였던 반면, 습도 76%RH에서는 최대 60%의 신장률을, 최대 수화 환경인 98%RH 습도에서는 최대 150% 정도의 신장률이 발견되었다(Wildnauer et al. 1971). 이 선행연구에서 피부신장률이 약 120% 이상이 되면 원상으로 회복이 불가능한 상태로 간주되었다. 기온도 영향을 미쳐 20℃에서 30℃로 증가하면 피부의 수분량이 50% 증가

하여 신장률이 증가한다(Papir et al. 1975). 이러한 온도와 습도의 영향은 피부의 섬유상 단백질(fibrous protein keratin)과 큰 관련이 있다고 설명된다(Papir et al. 1975). 본 연구 결과는 온열적으로 쾌적한 환경은 습도에서 측정되었으나, 인체가 덥고 습한 환경에 노출되는 경우, 혹은 피부 밀착 스마트 작업복 착용에 의해 과도한 땀이 유발되어 피부수분도가 증가하는 경우 부위별 피부의 최대신장률이 증가할 수 있음을 시사하므로, 추후 고온다습 환경에서의 피부신장률에 대해 측정해 볼 필요가 있다.

피부신장률을 보고한 대부분의 선행 결과들은 살아 있는 사람을 대상으로 측정한 연구가 아니라 피부를 떼어 낸 후 in vitro 상태에서 중량 부하에 따른 피부(stratum corneum)의 신장률을 측정한 연구들이다(Edwards & Marks 1995; Gallagher et al. 2012). In vitro 실험들의 경우 일반적인 피부의 신장률을 20% 수준으로 간주하고 이를 벗어나면 원상태로의 회복이 어렵다고 여겨지고 있으나, 본 연구 결과에 따르면 팔꿈치와 무릎 피부의 최대신장률은 평균 40% 이상이었으며 개별적으로 70%의 신장률을 보인 경우도 있었으므로, in vitro 측정값들은 실제 피부신장률을 과소추정 할 수 있음을 기억하고 주의깊게 적용해야 할 것이다.

2. 체표면적 최대증가율

체표면적의 증가율도 피부의 신장률과 유사한 경향을 보였으나, 부위별로 보다 세분화된 차이를 보여 팔꿈치에서 가장 큰 면적 증가율($93.7 \pm 6.4\%$)을 보였다. 즉 면적으로 볼 때 팔꿈치를 최대로 구부린 경우 길이에 비해 약 두 배 정도의 체표면적 증가가 발견된다. 무릎의 면적 증가율도 약 75%로 큰 값을 보여 주었다. 반면 목을 옆으로 눕힌 경우 면적증가율은 평균 2.2%로 팔꿈치나 무릎에 비해 매우 적은 수준의 증가율을 보여 주었는데, 이는 목을 옆으로 눕히는 경우 수평 방향의 길이 변화가 미미했기 때문이다. 피부 면적 증가에 대한 선행연구들 대부분 피부재생 등의 목적으로 사용되는 피부조직확장술(tissue expansion

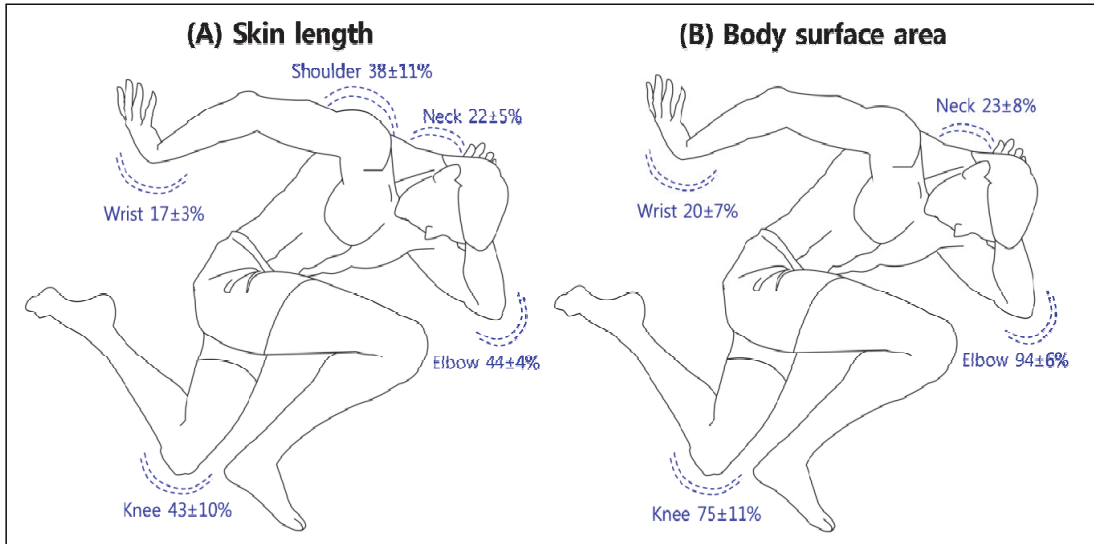


Fig. 6. Illustrations of skin elongation (A) and surface area expansion rates (B) on the wrist, shoulder, neck, elbow, and knee.

technique)에 대한 보고들로 본 연구와 같이 유연전자소재를 활용하게 될 스마트의복 개발 목적으로 수행된 연구들은 찾아보기 어려우며, 특히 피부의 신장률에 대한 연구에 비해 체표면적의 변화율에 대한 보고는 상대적으로 적다. 앞서 기술한 바와 같이 본 연구는 부위별 피부의 최대신장률과 체표면적 최대 변화율을 정량화하였다는 데 의의가 크며, 유연전자섬유 적용 스마트웨어 개발자나 인공피부와 피부재생을 다루는 연구자들의 정보접근성 확장을 위해 Fig. 6을 제시한다. Fig. 6은 본 연구에서 얻어진 결과를 부위별로 파악하기 용이하게 단순화한 그림으로 피부의 신장률과 체표면적의 증가율에 대한 정보를 담고 있다.

3. 피부신장률과 체표면적 증가율 간의 상관

부위별 피부의 최대신장률과 체표면적의 최대증가율 간 상관관계 분석을 통해 흥미로운 결과를 얻을 수 있었다. 피부 최대신장률과 체표면적 증가율에서 가장 큰 변화율을 보였던 무릎과 팔꿈치 부위의 경우 모두 두 항목 간 유의한 상관관계가 발견되지 않았으나, 상대적으로 적은 변화율을 보였던 손목과 목 부위에서는 신장률과 면적 증가율 간 유의한 상관관계가 발견되었

다. 즉, 길이와 면적 간 상관은 변화율이 큰 부위보다 변화율이 적은 부위에서 발견되었다. 이처럼 변화율이 적은 부위에서 길이와 면적 간 유의한 상관성이 발견된 이유는 특정 자세로 인해 이러한 부위들의 피부가 늘어난 경우 양방향 신장이 아니라 주로 단일 방향으로만 신장이 일어나기 때문이다. 예를 들어, 목을 옆으로 눕히는 경우 피부는 길이 방향으로 신장하는 반면 수평 방향으로의 신장은 거의 발생하지 않는다. 그러나 무릎이나 팔꿈치의 경우 수평과 수직 방향 신장이 모두 일어난다. 손목과 목 부위는 웨어러블 스마트 시계나 헤드셋 등에서 볼 수 있듯이 웨어러블 전자기기의 주요 착용 부위이며, 아래의 식을 사용하여 피부의 길이 신장률(X)로 면적 증가율(Y)을 추정해 볼 수 있다: [목] $Y=1.18X-3.49$; [손목_안] $Y=0.92X-0.18$; [손목_바깥] $Y=1.37X-0.97$.

4. 피부신장률과 면적 증가율에서의 성차

본 연구는 남성 다섯 명과 여성 다섯 명을 대상으로 하였고 피부신장률과 체표면적 증가율 모두에서 성차를 발견할 수는 없었다. 따라서 본 연구에서 얻어진 결과들은 한국인 평균체형을 갖는 20대 남녀에게 통합

하여 적용가능하다. 일반적인 체형요소들은 동일 연령대일 경우 남성이 여성보다 더 길고(길이), 더 두꺼우며(두께), 더 넓고(면적), 남자는 허리둘레로 여자는 가슴둘레로 체질량지수(BMI)를 가장 잘 예측할 수 있다고 보고된다(Kim et al. 2013). 이처럼 정지 자세 상태에서의 체형요소들(길이, 둘레, 면적)과 체질량 요소(부피와 중량)에 뚜렷한 성차가 존재하지만, 본 연구 결과 동적 상태에서 피부의 신장률에 성차는 존재하지 않았다. 즉, 체형요소의 절대값에서는 성차가 있으나 이의 변화율, 즉 비율에서의 성차는 발견되지 않았다. 이는 본 연구에서 선정된 부위가 일반적으로 성차가 발견되는 허리나 가슴, 엉덩이 부위가 아니라, 성차가 상대적으로 적은 손목, 목, 팔꿈치, 무릎 부위라는 점으로 설명가능하며, 동시에 본 연구에서 보고하는 피부신장률이나 체표면적 증가율은 절대값이 아닌 변화율이기 때문에 절대값에서의 성차가 반영되지 않는 것이라 사료된다. 특히 본 연구에 참여한 피험자 모두 체지방율에서 정상 범위에 속하였기 때문에 체지방율에서의 성차에 따른 관절 가동범위 차이도 분석할 수 없었다. 본 연구결과는 20대 남녀를 비교한 결과이며, 고령이 될수록 피부가 얇아지고 피부신장률이 떨어지며(Pawlaczyk et al. 2013) 피부의 인장강도는 약해지고(Edwards & Marks 1995) 체지방율은 증가하므로(Kim et al. 2013), 피부신장률의 성차에 대한 논의는 연령대와 체지방율 범위를 확대하여 추가 분석해볼 필요가 있다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 다양한 자세와 동작을 취할 시 인체 부위별 피부의 최대신장률과 체표면적의 증가율에 대한 정량적인 자료를 얻고자 수행되었다. 그 결과 손목과 목 부위 피부는 평균 15% 이상, 상지와 하지의 대표 관절 부위인 팔꿈치와 무릎 부위 피부는 평균 40% 이상 신장됨을 확인하였다. 체표면적 변화율 역시 팔꿈치에서 평균 94%, 무릎에서 평균 74%증가를 보여, in vitro 상태에서 측정하여 보고된 기존 선행연구들의

값들보다 월등히 큰 변화 범위를 보여 주었다. 본 연구 결과 피부신장률과 체표면적 증가율 모두에서 유의한 성차는 발견되지 않았으나 이는 추후 다양한 체지방율 범위에 분포하는 남녀 피험자를 대상으로 추가 비교분석해 볼 필요가 있다. 또한 고온다습 혹은 저온건조 환경에서의 피부신장률을 분석하여 환경온습도의 영향을 파악하는 것도 후속 연구로서 의미가 있을 것이다. 관절 가동범위가 가장 큰 인체 부위를 선정하여 얻어진 본 연구 결과는 유연 전자섬유나 직물 형태의 플렉서블 센서 개발자들에게, 나아가 의료용 목적으로 인공피부를 개발하거나 피부재생 연구자들에게 유용한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 실험에 참여해 준 피험자 분들과 연구수행에 기술적, 행정적 도움을 준 이서진, 하정미에게 감사를 전합니다. 본 연구는 2016년도 미래창조과학부의 한국연구재단-나노·소재기술개발사업(No. 2016M3A7B4910)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Annaihdh A N, Ottenio M, Bruyère K, Destrade M, Gilchrist MD(2010) Mechanical properties of excised human skin, 6th World Congress of Biomechanics, 1000-1003 (doi: 10.1007/978-3-642-14515-5_255)
- Edwards C, Marks R(1995) Evaluation of biomechanical properties of human skin, Clin Dermatol 13, 375-380
- Gallagher AJ, Annaihdh AN, Bruyere K, Ittenio M, Xie H, Gilchrist MD(2012) Dynamic tensile properties of human skin, IRCBI Conference, IRC-12-59, 494-502
- Jeoung YH(2006) 2D pattern development of tight-fitting bodysuit from 3D body scan data for comfortable pressure sensation, J Korean Assoc Human Ecol 15(3), 481-490
- Jeoung YH, Hong KH(2015) Subjective wearing assessment and clothing pressure depending on the pattern reduction rate of developed cycle pants using the 3D human scan data. J Korean Assoc Human Ecol 24(2), 255-266
- Jeoung YH(2008) Fundamental relationship between reduction rates of stretch fabrics and clothing pressure. J Korean Assoc Human Ecol 17(5), 963-973
- Kim S, Choi J, Park C, Choi K, Cho B(2013) Body mass

- index and body shape. *Korean J Obes* 22(3), 155-160
- Kim SY, Hong KH(2012) Engineering design process of tight-fit sportswear using 3D information of dermatomes and skin deformation in dynamic posture. *J Korean Assoc Human Ecol* 21(3), 551-565
- Kim NY, Wu YJ, Hong KH(2015) Design of 3D compression upper wear based on skin deformation during arm abduction. *J Korean Assoc Human Ecol* 24(5), 687-700
- Ko CW, Chun KJ, Kim ST, Cho DY, Han MH(2010) Suggestion for quantitative method of morphological deformation factor in construction of skin surface of human modeling, and its application. *Proceedings of KSPE 2010 Spring Conference*, 995-996
- Lee JH(2014) Presence and future of the smart fashion. *Fashion Inform Technol* 11, 2-10
- Lee JY(2005) A study on the body surface area of Korean adults. Unpublished doctoral dissertation, Seoul National University
- Lee JY, Choi JW(2005) Comparison between alginate method and 3D whole body scanning in measuring body surface area. *J Korean Soc Cloth Text* 29(11), 1507-1519
- Papir YS, Hsu KH, Wildnauer RH(1975) The mechanical properties of stratum corneum. I. The effect of water and ambient temperature on the tensile properties of newborn rat stratum corneum. *Biochimica Biophysica Acta* 399(1), 170-180
- Park HW(2014) R&D Trend for E-textile. *Fashion Inform Technol* 11, 2-10
- Park JH(1992) A study on the movement adaptation of panty stocking. Unpublished master's thesis, Ewha Womans University
- Pawlaczyk M, Lelonkiewicz M, Wieczorowski M(2013) Age-dependent biomechanical properties of the skin. *Postep Der Alergol* 5, 302-306
- Seo H, Kim SJ, Jeoung SH, Kwon JK, Hong K(2009) Measurements and methods of changes in skin tensiles by dynamic body postures. *Proceedings of ESK 2009 Spring*, 111-114
- Seo H, Kim SJ, Cordier F, Choi J, Hong K(2013) Estimating dynamic skin tension lines in vivo using 3D scan. *Computer-Aided Design* 45, 551-555
- Sung HK, Lee SD(1992) *Physiology*(6th ed.). Seoul: Medicalmunhwa Publishing
- Wildnauer RH, Bothwell JW, Douglass AB(1971) Stratum corneum biomechanical properties. I. Influence of relative humidity on normal and extracted human stratum corneum. *J Investig Dermatol* 56(1), 72-78
- Yang W, Sherman VR, Gludovatz B, Schaible E, Stewart P, Ritchie RO, Meyers MA(2014) On the tear resistance of skin. *Nature Communications* 6(6649), 1-10