

시판 스포츠 컴프레션 웨어의 의복압이 혈류 및 주관적 감성에 미치는 영향

김남임¹⁾ · 이효정[†]

¹⁾충남대학교 생활과학연구소
공주대학교 의류상품학과

Influence of Clothing Pressure on Blood Flow and Subjective Sensibility of Commercial Sports Compression Wear

Nam Yim Kim¹⁾ and Hyojeong Lee[†]

¹⁾Research Institute of Human Ecology, Chungnam National University, Daejeon, Korea
Dept. of Fashion Design & Merchandising, Kongju National University; Gongju, Korea

Abstract: Compression wear provides clothing pressure and affects how blood flows. Facilitating a blood flow is one of the most important functions of compression wear. The wearer's sensibility should be considered when designing compression wear. This study instructed participants to put on 5 types of sport compression wear with different pressure levels (CP-1 to CP-5), measured clothing pressure, blood flow level, blood flow rate, and surface temperature, and examined the pressure level that influenced blood flow through a subjective sensibility assessment. An experiment measured the clothing pressure of compression wear available in the market and found that the pressure ranged 0.6-1.1 kPa for the ankle, 0.7-2.3 kPa for the calf, and 0.9-1.9 kPa for the thigh. Meanwhile, blood flow levels and rates significantly increased when participants wore CP-1, which had the highest clothing pressure level, and CP-2 and CP-4 with middle-level pressure. After exercise, CP-2's surface temperature was the highest and revealed that wearing CP-2 facilitated blood flow. CP-2 was evaluated as most positive in the sensibility assessment and showed a clothing pressure of 0.67-1.82 kPa; its pressure for the calf did not surpass 2.0 kPa. Considering positive physical effect of compression wear on blood flow and subjective psychological effect on participants, CP-2 (0.67-1.82 kPa) would have the most suitable clothing pressure level among other types of the wear in this study.

Key words: clothing pressure (의복압), sports compression wear (스포츠 컴프레션 웨어), blood flow (혈류량), blood velocity (혈류속도), surface temperature (표면온도), subjective sensibility test (감성평가)

1. 서 론

생활수준 향상과 기대수명이 증가하면서 건강한 생활을 영위하기 위하여 스포츠를 즐기는 사람들이 증가하고 있다. 이런 사회현상과 더불어 스포츠 의류 업체에서는 신체를 보호하고 운동성능을 높이는 데 효과적인 기능성 스포츠 웨어, 보호대 등 장비 개발에 박차를 가하고 있다. 최근에는 인체를 가압하는 컴프레션 웨어에 대한 착용효과가 널리 알려지면서 착용인구가 증가함으로써, 컴프레션 의복의 운동 효과 또는 생리적 효과와 관련된 연구가 꾸준히 발표되고 있다. 실제로 격렬한 스포츠 활

동 후에는 근육통, 부종, 피로로 인해 신체적·정신적 스트레스로 어려움을 겪고 있다. 이러한 증상은 다음에 이어질 스포츠 활동(경기력)에 결정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 운동 상해를 입을 수 있어 운동 선수들은 스포츠 마사지 요법, 목욕 요법, 수면 등 다양한 방법으로 피로회복과 컨디션 유지를 위해 노력하고 있다. 최근에는 컴프레션 웨어가 피로에 유용함이 알려지면서 스포츠 분야에서 회복기에 이러한 웨어를 착용이 증가하고 있고, 이에 대한 효과를 검증한 연구가 보고되고 있다(Gill et al., 2006; Jakeman et al., 2010; Kraemer et al., 2001). 이렇듯 컴프레션 웨어가 피로와 관련해서 유의미함에도 불구하고 이러한 효과를 자아내는 특별한 기전에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않았다. 다만 지금까지 알려진 바에 의하면 의복에 의한 인체 외압 시 혈관의 단면적 감소로 정맥혈류 증가, 대사물질 제거, 근육 산소화 같은 생리적 변화에 기인하는 것으로 알려져 있다(Bringard et al., 2006; Mayrovitz & Sims, 2003; Stanton et al., 1949; Troynikov et al., 2010).

컴프레션 의복은 얼마만큼 가압을 적용했는지에 따라 혈류

†Corresponding author; Hyojeong Lee
Tel. +82-41-850-0292, Fax. +82-41-850-8301
E-mail: hyojeong@kongju.ac.kr

© 2019 (by) the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 긍정 또는 부정적 효과를 초래할 수 있다. 의복압 정보를 제시하고 혈류역학적 관점에서 정량적으로 검증한 기존 연구를 살펴보면, 정맥질환 환자를 대상으로 무릎길이이고 발목 2.4~2.8kPa 수준인 제품과 외관이 유사한 제품(0kPa)을 착용했을 때에 통증, 증상개선, 다른 병리적 이상 증세에 대해 평가하고, 컴프레션 제품은 모든 평가항목에서 유의미하다고 보고했다(Kakkos et al., 2018). 그런가 하면 발목 2.4±0.3kPa, 종아리 3.6±0.4kPa 정도의 의복압은 루즈 핏 컨트롤보다 정맥 박출량을 유의미하게 증가시키는데 관여하는 것으로 보고하였다(Mosti & Partsch, 2014). 위의 두 사례에서 발목의 의복압 2.4~2.8kPa은 혈류 개선에 유용한 수준임을 보여주고 있다. 반면, 컴프레션 웨어 착용에 대해 부정적 결과가 나타난 연구도 보고되었다. Styf(1990)에 의하면 1.8~5.3kPa 수준으로 하지를 가압하면 근육으로의 혈류가 감소하고 혈행을 방해하는 것으로 나타났다. 또한 Ali et al.(2010)은 가압수준이 낮은 제품(발목 2.0kPa, 무릎 1.6kPa)과 높은 수준 제품(발목 1.3kPa, 무릎 3.1kPa)을 착용하고 트레드밀 운동 전과 후에 산소 섭취, 심박률, 혈중 젖산농도, 크레아틴 키나아제 같은 생리적 변인에 대해 평가하고 모든 변인에서 의복 간 차이가 없다고 했다. 다만 눈에 띄는 것은 운동 시에 착용감이 낮은 수준의 의복압 제품이 더 좋다고 보고했다. 이와 같이 의복압이 혈류에 미치는 영향은 컴프레션 웨어의 주요한 기능성을 나타내는 하나의 지표라고 할 수 있다. 그러나 이상의 선행연구들은 대체로 가압이 없는 루즈 핏 제품을 실험 대조군으로 선정하고 혈류를 평가하였기 때문에 의복압 수준에 따른 차이를 정의하기에는 한계가 있다.

한편으로 혈류의 측정을 직접적으로 실시하는 방법 외에, 혈류변화 관찰을 위해 피부온 또는 표면온도 측정을 시행하고 있다. Kim and Hong(2014)은 인체에 밀착력이 높은 의복을 착용하면 피부온이 의복에 전도되어, 열화상 카메라 촬영 데이터

에서 표면온도가 높게 나타난다고 하였다. 이와 관련되어 가압 수준이 다른 4종 스포츠용 컴프레션 웨어를 착용하고 운동 후 피부온이 증가되는 제품은 근육통 개선에 효과가 있었다고 하였다(Duffield & Portus, 2007). 일반적으로 피부온은 신체 운동 중에 또는 운동 후에 증가하고(Formenti et al., 2017; Hadžić et al., 2019; Quesada et al., 2014), 피부온이 높다는 것은 혈액 순환이 원활하게 이루어졌음을 의미한다(Kim & Hong, 2016; Park & Choi, 2010). 이상의 선행연구를 종합해 보면, 컴프레션 웨어를 착용하고 운동을 하면 혈류의 순환을 촉진시켜 피부온 상승을 초래한다고 할 수 있다. 이에 열화상 카메라를 활용한 표면온도 측정은 컴프레션 웨어 착용 시 혈류의 변화를 확인할 수 있는 또 하나의 정량적인 지표로 활용할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 시판 스포츠 컴프레션 웨어의 의복압을 독립변인으로 하고 그에 따른 혈류의 변화를 직·간접적으로 평가함으로써, 의복압 수준이 혈류에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 이와 함께 주관적 감성 평가를 실시함으로써 의복압, 혈류, 주관적 감성에 대하여 종합적으로 고찰하고자 한다. 이로써 혈류에 유익한 스포츠 컴프레션 웨어의 의복압 수준을 정의하고 스포츠 컴프레션 웨어 개발에 기여하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 피험자 선정

본 연구를 위한 피험자는 Size Korea(KATS, 2015)의 20대 남성 평균 치수의 ±1 표준편차에 해당하는 10명을 선정하였으며, 피험자의 인체치수 측정값은 Table 1과 같다. 피험자들은 실험에 참여하기 전 사전모임을 통해 연구의 목적 및 실험 측정 항목에 대하여 충분한 설명을 들었으며, 연구에 자발적으로 참여 의사를 밝혔다.

Table 1. Characteristics of subjects for the study

Subjects		Height (cm)	Weight (kg)	Waist C. (cm)	Hip C. (cm)	Thigh C. (cm)	Knee C. (cm)	Ankle C. (cm)
Subject 1		174	81.5	85	98	57	41	23
Subject 2		175	76.5	83	96	56	38	23
Subject 3		176	79.5	84	97	55	39	22
Subject 4		173	72.5	82	95	56	39	21
Subject 5		175	76.8	83	94	53	38	22
Subject 6		174	74.6	82	96	54	37	23
Subject 7		173	74.3	82	95	53	38	23
Subject 8		174	73.4	81	95	54	39	22
Subject 9		175	75.2	82	96	55	38	23
Subject 10		174	75.3	83	95	55	37	22
Subjects in this study	<i>M</i> (<i>SD</i>)	174.3 (.90)	76.0 (2.61)	82.3 (0.97)	95.7 (1.10)	54.8 (1.25)	38.4 (1.11)	22.4 (0.66)
Size Korea Average man in their 20s	<i>M</i> (<i>SD</i>)	174.2 (5.9)	71.2 (12.5)	79.8 (9.7)	95.4 (7.7)	57.0 (5.7)	37.1 (2.7)	25.6 (1.7)

C.: Circumference

2.2. 실험복

본 연구의 실험복으로 사용하기 위해 스포츠용 컴프레션 의복을 판매하는 글로벌 브랜드(Skima, Skins, Adidas, Nike, Prospects)에서 허리부터 발목까지 커버하는 형태의 긴바지를 5벌 구매하였다. 구매한 의복의 치수는 모두 100호로, 컴프레션 의복에 대한 상세한 정보는 Table 2에 나타났다. 각 실험복의 섬유 조성률은 제품에 부착된 취급주의 레이블에 의해 정보를 획득하였고, 소재의 두께는 두께 측정기(Thickness gauge Mitutoyo, Japan)로 측정하였다. 피험자는 5종의 실험복 컴프레션 하의와 면 100% 크루넥 맨투맨 루즈 핏 티셔츠(Loose fit T-shirts)를 착용하고 실험에 임하였다. 또한 혈류측정을 위한 컨트롤 변인으로 면 100%로 제작된 인체에 밀착되지 않는 루즈 핏의 트레이닝 팬츠를 착용하였다.

2.3. 착용평가 프로토콜

실험복 착용 순서에 따른 순서효과를 배제하기 위해, 실험복의 지급은 라틴 스쿼어법으로 진행하였다. 피험자는 실험실에도착하여 15분의 안정을 취하며 실험 프로토콜에 대한 설명을 듣고 실험에 임하였다. 실험은 혈류측정, 의복압 측정, 주관적 착용감 평가, 표면온도 측정 순서로 진행하였다(Fig. 1).

2.4. 의복압 측정

컴프레션 하의의 의복압 측정은 공기주입식 센서(AMI 3037-2, AMI Techno, co, Ltd, Japan)를 이용하였다. 의복압 측정위치는 Fig. 2와 같이 외측 발목(P1), 후면 종아리(P2), 전면 허벅지(P3)의 세 지점에서 1분간 측정하였다. 의복압 측정은 서 있는 자세(정자세)와 무릎을 90°로 굽히고 의자에 앉은 자세에서 각각 1회씩 총 2회 측정하였다. 의복압 데이터의 분석은 측정값의 앞-뒤 10초 이내의 데이터는 노이즈(Noise)로 처리하고, 40초에 대한 데이터에 대해 평균값을 계산해 분석하였다.

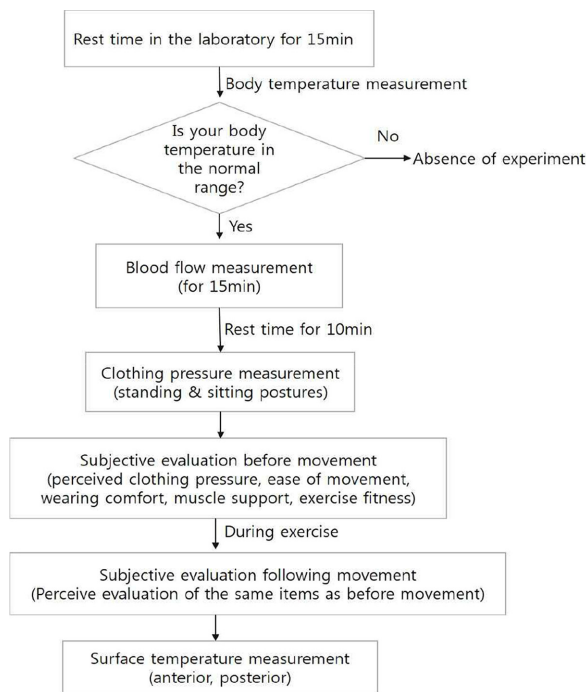


Fig. 1. Experimental protocol.

2.5. 혈류측정

컴프레션 웨어 착용에 따른 혈류의 변화를 분석하기 위하여 혈류량, 혈류속도, 표면온도 측정을 실시하였다. 혈류량과 혈류속도는 정량적이고 직접적으로 혈류의 경향을 확인할 수 있는 변인이며, 표면온도의 측정은 간접적으로 혈류의 변화 경향을 확인할 수 있는 변인이다.

2.5.1. 혈류량과 혈류속도

혈류측정 전에 체온계(IRT 4520, Mexico)를 사용하여 귀내

Table 2. Five commercial compression pants used in the study

	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
Images					
Contents	Polyester Polyurethane Nylon Cotton Others (missing content rate)	Nylon Microfiber 76% Spandex 24%	Nylon 75% Polyurethane 25%	Polyester 74% Spandex 26%	Polyester 80% Polyurethane 20%
Thickness of ground fabric (mm)	0.41	0.86	0.54	0.62	0.51
Brand	100M (Skima)	A400 (Skins)	Techfit (Adidas)	DRI-FIT (Nike)	Smart fit (Prospects)
Design characteristics	Local 2-layer	-	Taping	Taping	Heterogeneous fabrics

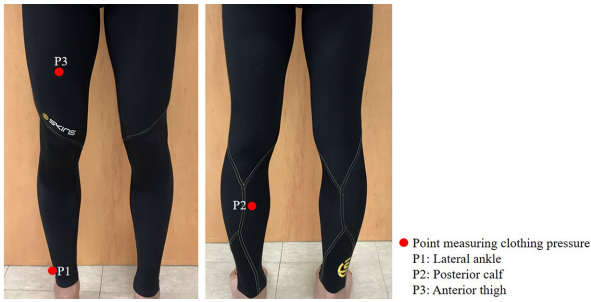


Fig. 2. Location measuring clothing pressure at three spots in lower body.

은 측정을 통해 체온이 정상 범위에 있는지 확인하였다. 혈류 측정 시 센서는 오른쪽 세 번째 손가락 안쪽 끝에 부착하고 의자에 편안하게 앉은 자세에서 15분간 측정하였다. 측정장비(FLO-C1 OMEGAWAVE, INC., Japan)는 레이저 도플러 혈류측정법(Laser doppler-Flowmetry) 방식이고 혈류량(Blood flow), 혈류속도(Blood velocity) 분석이 가능한 장비이다. 데이터 수집은 수집기(HP Agilent 34970A)를 통해 컴퓨터에 저장되었고, 혈류량과 혈류속도의 데이터를 각각 획득하였다. 수집된 각 데이터에서 시작과 끝의 각 1분씩은 노이즈로 처리하고 13분간 측정된 값의 평균을 구해 통계분석에 사용하였다.

2.5.2. 표면온도 측정

본 연구에서는 5종 컴프레션 웨어를 착용했을 때 나타나는 체온이 의복으로 전도된 표면온도를 측정하고 이를 혈류 데이터와 함께 고찰하기 위하여, 열화상 카메라(FLIR E 53 24, Sweden)로 운동 평가 동작(‘무릎 완전히 구부려 앉았다 일어나기(5회 실시)’, ‘좌/우 무릎 번갈아 가슴까지 올리며 뛰기(10회 실시)’, ‘발목 돌리기(안쪽/바깥쪽 각 5회) 직후에 하의 착용 전면과 후면에서 각각 촬영하였다. 표면온도의 분석은 Fig. 3과 같이, 의복압 측정 위치가 포함된 발목 영역, 종아리 영역, 허벅지 영역으로 지정했으며 써모그램 분석 소프트웨어(FLIR



Fig. 3. Location of analysing surface temperature while wearing compression wear.

Tools+(ver. 6.4), Sweden)를 사용해 지정된 영역 내의 표면온도 평균값을 도출해 통계 분석하였다.

2.6. 주관적 감성 평가

주관적 착용감 평가는 2회 차로 진행하였다. 1차는 실험복을 착용 후 10분간 안정을 취한 후에 평가하였으며, 2차는 운동 동작(‘무릎 완전히 구부려 앉았다 일어나기(5회 실시)’, ‘좌/우 무릎 번갈아 가슴까지 올리며 뛰기(10회 실시)’, ‘발목 돌리기(안쪽/바깥쪽 각 5회) 수행 중에 평가하였다. 컴프레션 웨어만의 차별화된 착용 감성을 나타낼 수 있는 파라미터로 주관적 압박감, 착용 쾌적감, 근육 지지감, 운동 적합성에 대해 평가하였고, 질문은 ‘압박감이 적정한가?’, ‘동작이 용이한가?’, ‘착용 쾌적성이 적정한가?’, ‘근육을 지지감이 적정한가?’, ‘운동에 적합한가?’의 6가지 문항에 대해 7점 리커트 척도(1점: 매우 나쁨(매우 비선호), 4점: 보통, 7점: 매우 좋음(매우 선호))로 평가하도록 하였다.

2.7. 자료 분석

실험결과 자료는 통계분석 프로그램 SPSS 24.0(IBM Soft, USA)을 사용하여 분석하였다. 의복압 측정 자세(정자세, 앉은 자세)에 따라 통계적으로 차이를 확인하기 위해 대응 t-test(Paired t-test)를 진행하였다. 혈류측정, 주관적 착용감 평가 및 표면온도 결과는 각 변인에 대해 반복측정 분산분석(Repeated measured ANOVA)과 사후분석(Duncan test)을 실시하였다. 또한 혈류 변인 간의 관계를 알아보기 위해 피어슨 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시했으며, 유의 수준 $p < .05$ 수준에서 검정하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 의복압

5종 실험복의 의복압 측정 결과는 Table 3과 같다. 대부분의 실험복이 종아리, 허벅지, 발목 순으로 의복압이 높게 나타났다. 또한 전반적인 의복압 범위로 살펴보면, CP-1의 의복압이 1.14~2.32kPa로 가장 높았으며, CP4와 CP3은 0.57~2.29kPa로 유사한 수준, CP-2는 0.67~1.82kPa, CP-5는 0.00~0.92kPa로 가장 낮게 나타났다. 정자세와 앉은 자세의 차이를 확인하고자 진행한 대응 t-test 결과를 살펴보면, CP-1은 모든 측정 위치에서 유의한 차이를 보였고 CP-2, 3, 5는 종아리, 허벅지에서 유의미한 차이를 나타냈다. 반면, CP-4는 종아리를 제외하고 발목과 허벅지에서 통계적 유의차가 있는 것으로 확인되었다. 측정 자세에 따른 의복압 변화를 구체적으로 살펴보면, 발목에서 정자세와 앉은 자세의 의복압 차이는 통계적 유의차가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 종아리에서는 CP-2, CP-3, CP-5는 앉은 자세가 정자세보다 약 0.15~0.4kPa 증가하는 경향을 보였다. 또한 허벅지의 의복압도 대부분의 실험복에서 앉은 자세가 정자세보다 0.1~0.2kPa 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 인체가

Table 3. Paired *t*-test of clothing pressure between sitting on the chair and static posture when wearing five types of compression wears

Experimental clothing	Area	Static posture(A) <i>M</i> (<i>SD</i>)	Sitting posture(B) <i>M</i> (<i>SD</i>)	Paired <i>t</i> -test		
				<i>M</i> (B-A)	<i>t</i>	<i>p</i>
CP-1	Ankle	1.14(.31)	1.16(.29)	0.02	3.187	.009**
	Calf	2.32(.45)	2.17(.54)	-0.15	-9.918	.000***
	Thigh	1.89(.24)	1.97(.31)	0.08	4.032	.002**
CP-2	Ankle	0.67(.21)	0.63(.18)	-0.04	-1.859	.090
	Calf	1.82(.27)	2.27(.21)	-0.28	-17.220	.000***
	Thigh	1.21(.18)	1.38(.24)	0.17	6.581	.000***
CP-3	Ankle	0.73(.09)	0.71(.15)	-0.02	-0.713	.491
	Calf	2.18(.24)	2.27(.21)	-1.08	-14.888	.000***
	Thigh	1.02(.13)	1.11(.17)	0.09	7.955	.000***
CP-4	Ankle	0.57(.04)	0.49(.07)	-0.08	-6.233	.000***
	Calf	2.29(.21)	2.28(.18)	-0.01	-1.000	.339
	Thigh	0.97(.19)	1.20(.11)	0.23	5.682	.000***
CP-5	Ankle	0.00(.00)	0.00(.00)			
	Calf	0.73(.06)	0.87(.09)	0.14	5.029	.000***
	Thigh	0.92(.15)	0.81(.19)	-0.10	-3.705	.003**

p*<.01, *p*<.000

정자세에서 앉은 자세로 동작하면 종아리와 허벅지는 근육이 수축되면서 부피가 팽창하기 때문에 대체로 의복압이 증가한 것으로 보이며, 발목의 경우 자세의 변화에도 인체의 부피변화가 크지 않은 부위이기 때문에 특별한 증감 경향이 나타나지 않은 것으로 보인다. 다만 앉은 자세에서 CP-1은 종아리의 의복압 0.15kPa 감소, CP-5는 허벅지 의복압 0.11kPa 감소하였는데, 이는 두 의복 모두 비교적 얇은 소재로 구성되었으며, 본 연구의 실험복이 시판제품을 활용하였기 때문에 종아리, 무릎, 허벅지 등의 압박감을 강화시키는 디자인 변인을 통제하지 못한 것으로부터 기인한 변수로 사료된다.

3.2. 혈류

예비평가에서 컴프레션 웨어가 아닌 루즈 핏 하의 착용 시의 혈류의 경향과 5종 컴프레션 웨어를 착용 시의 혈류의 경향을 확인해 본 결과, 루즈 핏 하의를 착용했을 때 혈류량 측정값 24.48(*SD*=3.16)ml/s, 혈류속도 측정값 1.82(*SD*=0.26)mm/s로 본 연구의 실험복 중 의복압이 가장 낮은 CP-5와 사후검증(Duncan test)에서 동일한 그룹으로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 CP-5를 컨트롤 상태와 동일한 것으로 간주하고 5종 컴프레션 제품에 대해 혈류변화를 분석하였다.

3.2.1. 혈류량

5종 컴프레션 웨어를 착용했을 때 혈류량 변화는 Table 4와 같다. CP-5를 착용했을 때 25.35ml/s로 가장 낮은 측정치를 보였고, CP-3은 25.58ml/s이고 사후검증에서 ab 그룹으로 확인되었다. 이로써 5종 컴프레션 웨어 착용 시 상대적으로 CP-5보다 의복압이 높은 CP-1, CP-2, CP-4가 혈류량을 증가시키는데 기여하는 것으로 확인되었다.

Table 4. Change of blood flow when wearing 5 types of compression wears

	Blood flow(ml/s)		
	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>F</i>	<i>p</i>
CP-1	30.92(4.63) ^b	3.361	.017*
CP-2	30.74(4.71) ^b		
CP-3	28.58(3.46) ^{ab}		
CP-4	30.15(4.48) ^b		
CP-5	25.35(2.68) ^a		

**p*<.05, Duncan's multiple range test: a<b

Table 5. Change of blood velocity when wearing 5 types of compression wears

	Blood velocity (mm/s)		
	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>F</i>	<i>p</i>
CP-1	2.01(0.33) ^b	3.125	.026*
CP-2	2.36(0.61) ^b		
CP-3	2.00(0.52) ^{ab}		
CP-4	2.10(0.30) ^b		
CP-5	1.99(0.18) ^a		

**p*<.05, Duncan's multiple range test: a<b

3.2.2. 혈류속도

혈류속도의 분석결과는 Table 5에 제시하였다. 가압수준이 다른 5종 컴프레션 웨어를 착용했을 때 혈류속도 변화는 혈류량과 동일한 경향성을 나타냈다. 가압수준이 가장 낮은 CP-5를 착용했을 때에 혈류속도는 25.35mm/s로 실험복 중에서 가장 낮은 측정치를 나타냈다. CP-3의 혈류속도는 28.58mm/s로 CP-5보다 평균값은 높았으나 사후검증에서 서브세트(ab)에 속하였

고 혈류량과 동일한 경향을 나타냈다. 그러나 CP-1, CP-2 그리고 CP-4를 착용했을 때 혈류속도는 유의미하게 증가하였으며, 이 실험복들은 혈액순환 개선에 도움이 되는 것으로 판단할 수 있다. 다만 CP-3은 CP-4와 의복압 수준이 유사함에도 불구하고 CP-5보다는 평균은 증가하였으나 유의한 수준은 아니었다.

이로써 혈류량과 혈류속도를 유의미하게 증가시키는 실험복은 CP-1, CP-2, CP-4로 나타났다. 이들의 의복압 범위를 살펴보면, 발목 0.6~1.1kPa, 종아리 1.8~2.3kPa, 허벅지 1.0~1.2kPa이다.

3.2.3. 표면온도

5종 컴프레션 웨어를 착용하고 주관적 착용감 평가 직후 표면온도를 측정된 결과는 Table 6과 같다. CP-2가 발목(32.6°C), 종아리(34.1°C), 허벅지(33.5°C) 부위에서 가장 높은 표면온도를 나타냈으며, CP-5는 가장 낮은 측정치를 보였다. 구체적으로 살펴보면, 발목은 CP-2가 32.6°C로 평균값이 높았으나 CP-1(32.1°C)과 동일 그룹으로 확인되었다. 그런가 하면 CP-5는 28.6°C로 가장 낮은 표면온도를 나타냈다. 종아리 부위에서는 평균값에서 CP-2(34.1°C), CP-1(33.9°C), CP-3(33.8°C) 순으로 표면온도가 높았으나 모두 동일그룹이었고, 가장 낮은 표면온도를 나타낸 CP-5(31.8°C)와는 CP-4(33.5°C)가 동일그룹인 것으로 확인되었다. 허벅지 부위에서는 CP-2(33.5°C)와 CP-4(32.5°C)로 동일그룹으로 5종 실험복 중에서 허벅지 부위에 높은 표면온도를 나타냈고 CP-5가 30.9°C로 가장 낮게 나타났다. 결과적으로, 표면온도는 실험복(CP-5)이 발목, 종아리 및 허벅지 부위에서 가장 낮게 측정되었다. 한편 의복압이 가장 높은 CP-1의 표면온도보다 오히려 의복압이 더 낮은 CP-2가 표면온도가 가장 높게 측정되었다. Fig. 4는 표면온도가 가장 높은 CP-2와 표면온도가 가장 낮은 CP-5를 가시적으로 나타낸 것이다. 의복압이 상대적으로 높은 CP-2가 CP-5보다 전반적으로 흰색과 붉은색의 영역이 많이 분포되어있는데, 이는 CP-2가 CP-5보다 앞서 설명한 부위 외에도 전반적인 하체의 표면 온도가 높다고 설명할 수 있다. 이러한 결과는 CP-2는 운동 후 혈류의 변화를 촉진시키는 것을 짐작하게 한다. 혈류량과 혈류속도에 긍정적인 영향을 주었던 3종의 실험복 가운데 운동 후에 가장 체온을 높여 혈류의 변화를 활성화시킨 의복은 CP-2이다. 이 실험복은 전체 평균은 1.2kPa로 종아리에서도 2.0kPa를 넘지 않아, 하체를 전체적으로 편안하게 지지해주는 수준의 압력을 지녔다.

본 연구에서는 혈류 평가를 위한 변인으로 혈류량, 혈류속도,

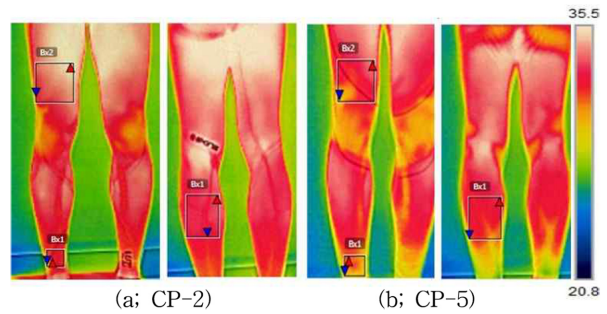


Fig. 4. Distribution of surface temperature in experimental wears.

표면온도를 평가하였다. 이러한 혈류에 관한 지표들 간의 상관관계와 의복압과 혈류 지표들 간의 상관관계를 분석한 결과는 Table 7과 같다. 먼저 표면온도와 혈류의 상관관계를 살펴보면, 허벅지 부위의 표면온도는 혈류량과 양의 상관관계로 허벅지, 종아리, 발목 부위의 모두 표면온도와 혈류량의 양의 상관관계로 확인되었다. 의복압과 혈류의 상관관계 분석결과, 혈류량은 의복압과 양의 상관관계가 있어, 의복압이 높을수록 혈류량이 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 혈류속도는 의복압 측정 자세별로 특정 부위에 따라 양의 상관관계가 있는 것으로 확인되었다. 정자세에서는 종아리만 양의 상관으로, 앉은 자세에서는 발목과 허벅지 의복압이 높을수록 혈류속도가 증가하는 것으로 확인되었다. 의복압과 운동 후 표면 온도 측정 결과 역시 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 부위에 따라 상이하게 나타났지만 대체로 의복압과 혈류 변화는 양의 상관관계가 성립되므로, 의복의 압력이 높아질수록 혈류량과 혈류속도가 증가하며, 선행연구에서 언급한 바와 같이 이러한 생리적 변화는 표면온도 또한 상승시킨다고 할 수 있다.

3.3. 주관적 감성 평가

컴프레션 웨어를 착용하고 운동 전과 운동 중에 느끼는 압박감의 정도(선호)를 알아보기 위해 설문조사를 진행하였고 통계적 차이를 확인하기 위해 paired t-test를 한 결과는 Table 8과 같다. 전체적으로 평균값으로 분석해보면, 운동 전 각 평가 부위에서 압박감의 정도(선호정도)는 다르게 나타났는데, 운동 전과 운동 중의 선호순위는 동일하였다. CP-2와 CP-4를 약 5점으로 좋게 평가하였으며, CP-1과 CP-3은 약 4점으로 보통으로 평가하였다. 실험복 중 의복압이 가장 낮은 CP-5는 약 2점

	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	F	p
Ankle	32.1 ^c (0.3)	32.6 ^c (0.2)	31.3 (0.3)	31.2 ^b (0.3)	28.6 ^a (0.4)	52.290	.000***
Calf	33.9 (0.4)	34.1 ^b (0.4)	33.8 ^b (0.4)	33.5 ^a (0.4)	31.8 ^a (0.5)	12.205	.000***
Thigh	32.3 ^{ab} (0.4)	33.5 ^b (0.3)	32.7 ^{ab} (0.3)	32.5 ^b (0.2)	30.9 ^a (0.3)	10.920	.000***

***p<.000, Duncan's multiple range test: a<b<c

Table 7. Analysis of correlation among objective measurement variables

		Correlation coefficient											
		Blood reaction		Surface temperature			Clothing pressure						
		Blood flow	Blood velocity	Ankle	Calf	Thigh	Static posture			Sitting posture			
							Ankle	Calf	Thigh	Ankle	Calf	Thigh	
Blood reaction	Blood flow												
	Blood velocity	-.010 (<i>p</i> =.944)											
Surface temperature	Ankle	.248 (<i>p</i> =.083)	.321* (<i>p</i> =.023)										
	Calf	.175 (<i>p</i> =.223)	.306* (<i>p</i> =.031)	.640** (<i>p</i> =.000)									
	Thigh	.284* (<i>p</i> =.045)	.213 (<i>p</i> =.138)	.744** (<i>p</i> =.000)	.673** (<i>p</i> =.000)								
Clothing pressure	Static posture	Ankle	.359* (<i>p</i> =.011)	.342* (<i>p</i> =.015)	.717** (<i>p</i> =.000)	.642** (<i>p</i> =.000)	.618** (<i>p</i> =.000)						
		Calf	.392** (<i>p</i> =.005)	.186 (<i>p</i> =.197)	.608** (<i>p</i> =.000)	.418** (<i>p</i> =.003)	.527** (<i>p</i> =.000)	.820** (<i>p</i> =.000)					
		Thigh	.362** (<i>p</i> =.010)	.207 (<i>p</i> =.149)	.551** (<i>p</i> =.000)	.399** (<i>p</i> =.004)	.413** (<i>p</i> =.003)	.798** (<i>p</i> =.000)	.632** (<i>p</i> =.000)				
	Sitting posture	Ankle	.345* (<i>p</i> =.014)	.312* (<i>p</i> =.027)	.674** (<i>p</i> =.000)	.587** (<i>p</i> =.000)	.624** (<i>p</i> =.000)	.935** (<i>p</i> =.000)	.812** (<i>p</i> =.000)	.783** (<i>p</i> =.000)			
		Calf	.338* (<i>p</i> =.016)	.215 (<i>p</i> =.133)	.571** (<i>p</i> =.000)	.397** (<i>p</i> =.004)	.502** (<i>p</i> =.000)	.802** (<i>p</i> =.000)	.971** (<i>p</i> =.000)	.597** (<i>p</i> =.000)	.819** (<i>p</i> =.000)		
		Thigh	.350* (<i>p</i> =.013)	.319* (<i>p</i> =.024)	.675** (<i>p</i> =.000)	.480** (<i>p</i> =.000)	.525** (<i>p</i> =.000)	.792** (<i>p</i> =.000)	.646** (<i>p</i> =.000)	.834** (<i>p</i> =.000)	.843** (<i>p</i> =.000)	.647** (<i>p</i> =.000)	

Table 8. Paired *t*-test of perceived clothing pressure in wearing experimental wears

Experimental clothing	Area	Before exercise(A) <i>M</i> (<i>SD</i>)	During exercise(B) <i>M</i> (<i>SD</i>)	Paired <i>t</i> -test		
				<i>M</i> (B-A)	<i>t</i>	<i>p</i>
CP-1	Ankle	3.5(0.9)	3.4(0.9)	-.100	-.557	.591
	Calf	4.4(1.1)	4.3(0.8)	-.100	-.361	.726
	Thigh	3.9(0.8)	4.2(1.0)	.300	1.406	.193
	Whole	3.9(1.1)	4.3(0.8)	.400	1.177	.269
CP-2	Ankle	3.9(1.2)	4.5(1.2)	.600	3.674	.005**
	Calf	4.8(0.9)	5.5(0.8)	.700	3.280	.010**
	Thigh	4.5(0.7)	5.1(0.8)	.600	2.250	.051
	Whole	4.9(0.8)	5.4(0.8)	.500	2.236	.052
CP-3	Ankle	3.6(1.6)	3.8(1.4)	.200	1.500	.168
	Calf	4.2(0.9)	4.8(0.9)	.600	3.674	.005**
	Thigh	3.6(1.1)	3.5(1.4)	-.100	-.429	.678
	Whole	4.1(1.0)	3.8(1.0)	-.300	-1.406	.193
CP-4	Ankle	2.7(1.3)	2.4(1.1)	-.200	-1.500	.168
	Calf	5.1(0.7)	5.6(0.5)	.500	2.236	.052
	Thigh	4.2(0.9)	5.0(0.8)	.900	3.857	.004**
	Whole	4.6(2.4)	5.0(0.6)	.400	1.500	.168
CP-5	Ankle	1.4(0.5)	1.3(0.5)	-.100	-1.000	.343
	Calf	2.3(0.7)	3.2(0.7)	.800	6.000	.000***
	Thigh	2.2(0.6)	2.8(1.2)	.600	2.250	.051
	Whole	2.2(0.6)	2.8(0.9)	.600	2.714	.024*

p*<.05, *p*<.01, ****p*<.000

Table 9. Evaluation of perceived feeling during exercise when wearing five types of compression

	Experimental wears					F	p
	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5		
Ease of movement	4.6(0.8) ^b	5.9(0.8) ^c	3.7(1.1) ^a	5.5(0.5) ^c	5.8(0.4) ^c	13.347	.000***
Comfort	3.8(0.6) ^a	5.7(0.5) ^b	4.1(1.1) ^a	5.6(0.5) ^b	5.3(0.8) ^b	14.064	.000***
Muscle support	5.4(0.7) ^{ab}	5.9(0.6) ^c	5.1(0.7) ^b	5.6(0.5) ^{ab}	2.8(0.6) ^a	38.151	.000***
Exercise fitness	3.3(0.6) ^b	6.1(0.7) ^d	4.9(0.7) ^c	5.9(0.6) ^d	2.6(0.5) ^a	59.906	.000***

*** $p < .000$, Duncan's multiple range test: $a < b < c < d$

으로 나쁜 평가를 받았다. 운동 전과 운동 중에 느끼는 압박감의 선호도를 비교하면, CP-2를 착용했을 때, 운동 전보다 운동 중에 발목과 종아리에 대한 주관적 압박감의 선호도가 유의미하게 증가했다. CP-3은 종아리 부위, CP-4는 허벅지 부위에서 CP-5는 종아리와 하의 전체에서 운동 중 압박감의 선호도가 유의미하게 향상되었다. 의복압이 가장 높은 CP-1과 가장 낮은 CP-5는 피험자들의 주관적 압박감에 좋은 평가를 받지 못했으며, 의복압이 2.0kPa를 넘지 않는 CP-2(0.67~1.82kPa)가 주관적으로 가장 선호됨을 확인하였고 이는 선행연구에서 제시하는 쾌적한 의복압 영역에 포함되었다(Kim & Hahm, 1994).

실험복을 착용하고 운동 중에 느끼는 동작 용이성, 착용 쾌적감, 근육 지지감 그리고 운동 적합성 항목의 평가 결과는 Table 9와 같다. 동작 용이성 항목은 CP-2(5.9점), CP-5(5.8점), CP-4(5.5점)를 순으로 나타났으나, 이들 실험복은 모두 통계적으로 동일 그룹에 포함되었다. 가장 비선호하는 실험복은 CP-3으로 적용된 의복압은 상대적으로 낮은 편으로 동작 수행에 부정적인 영향을 미치지 않았으나, 부분적으로 부착된 폴리우레탄 소재로 만들어진 테이핑이 운동 동작 수행을 할 때 동작에 충분히 대응하지 못해 부정적인 평가를 받았음을 짐작할 수 있다. 착용 쾌적감 결과 또한 동작 용이성과 유사하게 CP-2(5.7점), CP-4(5.6점), CP-5(5.3점)는 5점 이상으로 선호하였고, 상대적으로 의복압이 가장 높은 CP-1(3.8점)은 평균 수는 가장 비선호하는 것으로 나타났다. 즉 통계적으로 CP-3과 동일 그룹에 포함되어 CP-1과 CP-3은 비선호하는 것으로 확인되었다. 근육지지는 CP-2(5.9점)를 가장 선호했고 CP-4(5.6점)와 CP-1(5.4점), CP-3(5.1점) 순으로 선호하는 것으로 확인되었다. 이들은 모두 평균이 5점 이상이었으나 의복압이 가장 낮은 CP-5는 2.8점으로 가장 낮게 평가되었다. 운동 적합성 항목에서는 CP-2(6.1점)과 CP-4(5.9점)로 가장 좋게 평가되었다. 그러나 의복압이 가장 높은 CP-1(3.3점)과 의복압이 가장 낮은 CP-5(2.6점)는 운동복 용도로 비선호하는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과를 종합해보면, 압박감에서 가장 선호되었던 주관적 압박감의 선호도가 가장 좋게 평가되었던 CP-2(0.67~1.82kPa)는 모든 평가 문항에서 가장 높은 점수로 우수한 감성평가를 받았다. 한편 본 연구의 실험복으로 이용된 컴프레션 웨어 중 의복압이 가장 높거나 낮은 의복은 피험자들에게 감성적으로 부정적인 평가를 받았다. 이는 스포츠 컴프레션 웨어의 의복압이 착용 감성에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 시사한다. 그

리고 컴프레션 웨어 설계 시 의복압이 너무 높거나 낮지 않은 적절한 수준의 의복압을 부여할 때, 착용자들로 하여금 심리적 만족감을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 20대 남성을 대상으로 시판용 스포츠 컴프레션 웨어 하의 5종의 의복압을 측정하고 이에 따른 혈류의 변화 및 주관적 감성 평가를 실시하였다. 스포츠 컴프레션 웨어의 의복압 수준이 혈류와 감성에 미치는 영향을 확인하여, 스포츠 컴프레션 웨어 개발 및 설계에 유의한 정보를 제공하고자 하였다. 종합적 결론은 다음과 같다.

첫째, 의복압 측정 실험 결과 시판 컴프레션 웨어의 의복압은 발목 0.6~1.1kPa, 종아리 0.7~2.3kPa, 허벅지 0.9~1.9kPa로 나타났다. 앉은 자세에서 측정된 결과 허벅지의 의복압은 0.1~0.2kPa 증가하는 것을 알 수 있었다. 실험복 간의 의복압 차이가 크지 않았으며, CP-1의 가장 압박감이 강했으며, CP-2, 3, 4는 중간 수준, CP-5는 가장 약했다.

둘째, 혈류 변화는 착용 즉시 혈류량, 혈류속도를 관찰하고, 운동 후 표면온도 측정으로 관찰하였다. 혈류량과 혈류속도는 5종 실험복 중 전체적으로 의복압이 가장 높은 CP-1과 중간 수준의 CP-2, CP-4 착용 시 유의미하게 증가하였고 의복압이 가장 낮은 CP-5 착용 시에는 루즈 핏과 통계적 유의차가 없었다. 한편 운동 후에는 CP-2의 표면온도가 가장 높게 나타나 CP-2 착용이 혈류 변화를 활성화시키는 것으로 나타났다. 또한 혈류 변화를 측정된 변인들과 의복압은 서로 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 즉 의복압이 높을수록, 혈류량과 혈류속도가 증가되며 이는 표면온도의 상승에도 영향을 미친다고 할 수 있다.

셋째, 주관적 착용평가에서 주관적 압박감 선호도, 동작 용이성, 착용 쾌적감, 근육 지지감 그리고 운동 적합성 항목에서 가장 높은 평가를 받은 실험복은 CP-2인 것으로 나타났다. 한편 본 연구의 실험복으로 이용된 컴프레션 웨어 중 의복압이 가장 높거나 낮은 의복은 피험자들에게 감성적으로 부정적인 평가를 받았다. 가장 긍정적인 감성평가를 받은 CP-2는 0.67~1.82kPa의 의복압으로 종아리 부위도 2.0kPa를 넘지 않아 부드러운 압박감을 부여하는 컴프레션 웨어이다.

결론적으로 컴프레션 웨어의 가압수준은 혈류량, 혈류속도,

표면온도, 그리고 주관적 감성평가에 모두 영향을 주었다. 특히, 정량적 지표인 혈류량, 혈류속도, 표면온도는 의복압과 양의 상관을 보였으나, 피험자들의 주관적 감성평가에서 의복압이 가장 높은 CP-1은 선호되지 않았다. 이에 컴프레션 착용이 혈류에 미치는 긍정적인 영향과 피험자들에게 심리적으로 작용하는 주관적인 영향을 고려한다면, 본 연구의 실험복 중 CP-2 수준(0.67~1.82kPa)이 가장 적절한 의복압 수준이라고 할 수 있다. 이로써 본 연구는 시판 스포츠 컴프레션 웨어의 의복압 수준을 확인하고 그에 따른 혈류의 변화와 주관적 감성을 평가함으로써 착용감과 기능성을 모두 충족시킬 수 있는 적절한 수준의 의복압을 제안하였다. 다만 시판 의복을 실험복으로 사용하여 디자인 요소 및 소재 등을 통제하지 못했다는 한계가 있다. 추후 연구에서는 컴프레션 의복을 실험복을 직접 제작하여, 통제된 조건에서 혈류 및 감성 평가를 진행한다면 더욱 의미 있는 연구가 될 것이다.

References

- Ali, A., Creasy, R. H., & Edge, J. A. (2010). Physiological effects of wearing graduated compression stockings during running. *European Journal of Applied Physiology*, 109(6), 1017-1025. doi:10.1007/s00421-010-1447-1
- Bringard, A., Denis, R., Belluye, N., & Perrey, S. (2006). Effects of compression tights on calf muscle oxygenation and venous pooling during quiet resting in supine and standing positions. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46(4), 548-554.
- Duffield, R., & Portus, M. (2007). Comparison of three types of full-body compression garments on throwing and repeat-sprint performance in cricket players. *British Journal of Sports Medicine*, 41(7), 409-414. doi:10.1136/bjism.2006.033753
- Formenti, D., Ludwig, N., Rossi, A., Trecroci, A., Alberti, G., Gargano, M., ... & Caumo, A. (2017). Skin temperature evaluation by infrared thermography: comparison of two image analysis methods during the nonsteady state induced by physical exercise. *Infrared Physics & Technology*, 81, 32-40. doi:10.1016/j.infrared.2016.12.009
- Gill, N. D., Beaven, C. M., & Cook, C. (2006). Effectiveness of post-match recovery strategies in rugby players. *British Journal of Sports Medicine*, 40(3), 260-263. doi:10.1136/bjism.2005.022483
- Hadžić, V., Širok, B., Malneršič, A., & Čoh, M. (2019). Can infrared thermography be used to monitor fatigue during exercise? A case study. *Journal of Sport and Health Science*, 8(1), 89-92. doi:10.1016/j.jshs.2015.08.002
- Jakeman, J. R., Byrne, C., & Eston, R. G. (2010). Efficacy of lower limb compression and combined treatment of manual massage and lower limb compression on symptoms of exercise-induced muscle damage in women. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 3157-3165. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e4f80c
- Kakkos, S. K., Timpilis, M., Patrinos, P., Nikolakopoulos, K. M., Papageorgopoulou, C. P., Kouri, A. K., ... & Tsolakis, I. A. (2018). Acute effects of graduated elastic compression stockings in patients with symptomatic varicose veins: A randomised double blind placebo controlled trial. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 55(1), 118-125. doi:10.1016/j.ejvs.2017.10.004
- Kim, H. E., & Hahm, O. S. (1994). The clothing pressure of the bodysuits on various sizes and movements. *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 1(2), 129-138.
- Kim, N. Y., & Hong, K. H. (2016). The effect of compression knee band and heat treatment on blood velocity of the elderly with osteoarthritis. *Fashion & Textile Research Journal*, 18(5), 716-723. doi:10.5805/SFTI.2016.18.5.716.
- Kim, S. Y., & Hong, K. H. (2014). Effects of local body heating and cooling on thermogram analysis of the extremity with hot pack. *Korean Journal of Human Ecology*, 23(6), 1205-1215. doi:10.5934/kjhe.2014.23.6.1205
- Korean Agency for Technology and Standard. (2010). 측정데이터 검색-전신[Search measurement data-whole body]. *Size Korea*. Retrieved July 14, 2018, from <http://sizekorea.kr/measurement-data/body>
- Kraemer, W. J., Bush, J. A., Wickham, R. B., Denegar, C. R., Gómez, A. L., Gotshalk, L. A., ... & Sebastianelli, W. J. (2001). Influence of compression therapy on symptoms following soft tissue injury from maximal eccentric exercise. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 31(6), 282-290. doi:10.2519/jospt.2001.31.6.282
- Mayrovitz, H. N., & Sims, N. (2003). Effects of ankle-to-knee external pressures on skin blood perfusion under and distal to compression. *Advances in Skin & Wound Care*, 16(4), 198-202.
- Miyamoto, N., Hirata, K., Mitsukawa, N., Yanai, T., & Kawakami, Y. (2011). Effect of pressure intensity of graduated elastic compression stocking on muscle fatigue following calf-raise exercise. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(2), 249-254. doi:10.1016/j.jelekin.2010.08.006
- Mosti, G., & Partsch, H. (2014). Improvement of venous pumping function by double progressive compression stockings: higher pressure over the calf is more important than a graduated pressure profile. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 47(5), 545-549. doi:10.1016/j.ejvs.2014.01.006
- Park, J. H., & Choi, J. W. (2010). Pilot study on effects of thermal stimulation using clothing microclimate on capillary diameter and other physiological responses. *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 17(6), 740-749.
- Quesada, J. I. P., Carpes, F. P., Bini, R. R., Palmer, R. S., Pérez-Soriano, P., & de Anda, R. M. C. O. (2015). Relationship between skin temperature and muscle activation during incremental cycle exercise. *Journal of Thermal Biology*, 48, 28-35. doi:10.1016/j.jtherbio.2014.12.005
- Stanton, J. R., Freis, E. D., & Wilkins, R. W. (1949). The acceleration of linear flow in the deep veins of the lower extremity of man by local compression. *The Journal of Clinical Investigation*, 28(3), 553-558. doi:10.1172/JC1102104
- Styf, J. (1990). The influence of external compression on muscle blood flow during exercise. *The American Journal of Sports Medicine*, 18(1), 92-95. doi:10.1177/036354659001800115
- Troynikov, O., Ashayeri, E., Burton, M., Subic, A., Alam, F., & Marteau, S. (2010). Factors influencing the effectiveness of compression garments used in sports. *Procedia Engineering*, 2(2), 2823-2829. doi:10.1016/j.proeng.2010.04.073