

이방향 형상기억합금을 이용한 지능형 보온성 등산용 자켓의 프로토타입 개발

이지연 · 신연욱 · 김희정 · 백범기 · 김은애[†]

연세대학교 의류환경학과

Prototype Intelligent Thermal Mountain Climbing Jacket Embedded with a Two Way Shape Memory Alloy

Jiyeon Lee · Yeonwook Shin · Heejung Kim · Bumki Baek · Eunae Kim[†]

Dept. of Clothing & Textiles, Yonsei University

접수일(2009년 8월 27일), 수정일(2009년 11월 16일), 게재확정일(2009년 12월 7일)

Abstracts

This study reports on the development of intelligent clothing using a shape memory alloy (SMA) that forms a still air layer and provides thermal insulation depending on the environment temperature. SMA springs were prepared with Nitinol and have an original length of 6mm and a latent length of 20mm with a response temperature of 24.5°C. Hysteresis was evaluated at a temperature between 0°C and 40°C. An experimental outdoor jacket that was attached with 30 springs was compared with a commercial jacket in terms of the microclimate temperature, humidity, and comfort properties by human subject tests in the microclimate chamber set at 5±0.5°C. The results showed that the microclimate temperature of SMA embedded clothing system from the wear trials was higher than the commercial ones during the rest period after exercise, especially on the skin side. In addition the thermal, humidity, and comfort sensations of SMA embedded clothing were better than the commercial ones.

Key words: Shape memory alloy, Thermal insulation, Still air layer, Comfort sensation; 형상기억합금, 보온성, 정지공기층, 쾌적감

I. 서 론

추운 환경에서 입는 아웃도어 의복의 주목적은 보온이다. 그러나 아웃도어 스포츠는 언제나 최대 운동에 도달하는 것이 아니고 스포츠웨어를 장시간 또는 하루 종일 착용하는 경우도 빈번하여 주위의 기후 조건이 변할 수 있기 때문에 아웃도어 스포츠를 위한

의복은 보온력과 함께 온도 조절 범위가 더 크게 요구된다(김태규, 성수광, 2006). 특히 등산과 같이 가을, 겨울의 한랭한 환경에서 움직임이 많은 스포츠는 기본적으로 보온성을 유지하되 온도 변화의 폭이 크고 그것을 조절할 수 있는 의복을 필요로 한다.

의복의 보온력을 최대화하기 위해서는 양모나 오리털과 같이 정지 공기를 다량 함유하는 섬유가 주로 사용되어 왔다. 최근에는 가변보온력을 갖는 의복으로 Gore-tex[®]사에서 AIRVANTAGE[™]라는 상품명으로 공기를 주입하고 빼내는 방법으로 착용자가 절연의 양을 조절하는 방법도 이용되고 있다. 이 의류는 세탁의 불편함뿐 아니라 공기를 불어넣는 튜브로 인하여

[†]Corresponding author

E-mail: eakim@yonsei.ac.kr

본 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-C00995).

투습성이 저하되고 따라서 장시간 착용하면 땀이 차는 단점이 있다(장승욱, 2004; 황수영, 2007). 온도 적응 능력을 갖도록 하기 위해 상변이 물질을 사용하기도 하나(신윤숙 외, 2004; 여정희, 2005; 장승욱, 2004) 이것 또한 효율성 측면에서 논란의 대상이 되고 있다.

최근에는 가변보온력을 증대시키거나 보온효과를 극대화하기 위하여 첨단과학과의 접목으로 지능적인 보온성 의복들이 스마트 의류라는 이름으로 개발되고 있다(“발열의류”, 2006; 한국섬유기술연구원, 2007; Rantanen et al., 2002). 그러나 대부분의 보온용 스마트 의류는 열저장 장치를 이용하여 착의자가 필요에 따라 전원을 공급함으로써 의복의 보온성을 향상시키지만, 이는 배터리와 같은 전원 공급 장치를 장착해야만 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 선행연구(여정희, 2005; 황수영, 2007)에서는 전원 공급 없이도 자동으로 스스로 감지하고 작동, 조절함으로써 최고의 단열재인 공기층을 형성하도록 하는 형상기억합금을 이용한 신지능형 의류가 제안되었다.

형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)은 어떠한 온도 조건하의 형태를 기억하고 있어 그 온도 영역에 도달했을 때 본래의 형태로 되돌아갈 수 있는 금속 화합물이다. 형상기억합금 중에서도 니티놀은 브라질의 와이어, 수술용 스텐트를 포함한 다양한 용도로 사용되고 있으며 스프링의 지름, 선지름, 열처리 조건 등 제작 조건에 따라 변형의 크기와 힘이 달라진다(Buehler & Wang, 1967).

선행연구에서는 이를 근거로 한 스프링을 제작하여 스프링이 전이환경에 따라 공기층을 형성함으로써 의복 내 보온성을 확보할 수 있는 방법으로 의복에 적용할 수 있는 가능성을 제시한 바 있으나(황수영, 2007) 저온환경에서의 이력현상이나 환경온에 따른 의복 내 합금의 반응 온도 설정 등 실제 의복 적용 사례에 대한 연구는 미비한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 환경 온도에 따라 가변적으로 보온성을 부여하는 정지 공기층을 형성하기 위해 형상기억합금을 이용한 지능형 의복의 프로토타입 개발을 그 목적으로 하고 있으며, 이의 적합성과 사용가능성을 살펴보기 위해 아웃도어 시장의 큰 부분을 차지하는 등산용 의복을 실험의복으로 선정하였다. 형상기억합금이 외부 온도에 적절히 반응할 수 있도록 스프링을 제작하고 이를 실험의복에 부착하였으며 시판되는 등산용 아웃도어 의복과 인공기후실 내에서 의복 내 미세기후와 착용자의 쾌적성을 비교·분석하였다.

II. 연구방법

형상기억합금 스프링의 반응 온도를 설정하여 가변 보온성을 가지는 아웃도어 의복을 제안하기 위해 다음의 순서로 실험을 실시하였다.

1차 실험은 형상기억합금 스프링을 제작하기 전에 시판 아웃도어 의복의 의복 내 미세기후 측정을 통하여 적절한 형상기억합금 스프링의 반응 온도를 제시하고자 하는 목적으로 실시하였다.

2차 본 실험은 1차 실험에 의거해 제작된 형상기억합금 스프링을 부착한 실험의복을 시판 아웃도어 의복과 함께 착용한 후, 의복의 객관적 보온성 및 주관적 쾌적성 측정을 통해 형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 시판 아웃도어 의복을 비교·분석하였다.

1. 형상기억합금 스프링의 반응 온도 설정

한랭환경하에서 형상기억합금 스프링이 반응하여야 하는 최적의 온도를 설정하기 위해 피험자 실험을 실시하였다. 피험자는 키 180cm, 체중 93kg의 25세 된 건강한 남성으로 실험의복을 착용하고 온습도센서(MSR12 Signal Data Recorder, MSR Electronics GmbH, Switzerland)를 등쪽 견갑골 사이와 의복 레이아웃별로 동일한 위치에 부착하였으며(Fig. 1), 온도 17°C, 14°C, 11°C, 8°C, 5°C로 설정된 인공기후실에서 피부온 및 의복 내 미세기후를 측정하고 주관적 감각을 평가하였다. 이때 상대습도는 50±5%로 고정하였다.

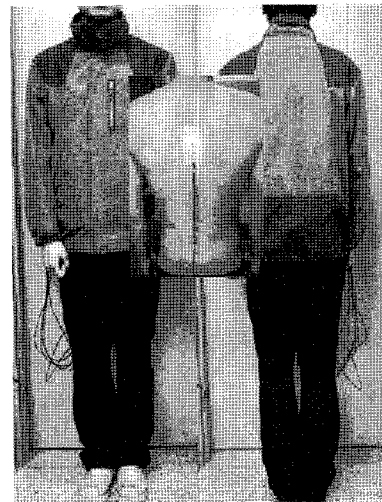


Fig. 1. Test garment and location of a sensor.

실험의복은 가을겨울용 아웃도어 의복에 대한 시장 조사를 통해 3 레이어 시스템으로 된 제품을 선정한 후 제작한 베스트를 zip-up shirt와 outer jacket 사이에 착용하여 총 4 레이어 시스템으로 구성하였다. 의복 시스템을 구성하는 각 레이어의 특성은 <Table 1>과 같다.

2. 형상기억합금 스프링 제작

형상기억합금 스프링은 24.5°C 이상의 상온에서 6mm로 압축되어 있다가 24.5°C로 환경이 변하게 되었을 때 반응하여 20mm로 팽창하도록 제작하였다 (Fig. 2). 스프링 형태를 잡아주는 금형에 Nitinol을 감고, 780°C에서 30분간 용체화 처리를 한 다음 다시 470°C에서 구속 시효 처리 후 샌딩 과정을 거쳤다. 제작된 형상기억합금 스프링의 구체적인 물리적 특성은 <Table 2>와 같다.

3. 형상기억합금 스프링의 이력 평가

제작된 형상기억합금 스프링의 이력을 통한 반응성

을 평가하기 위해 40°C에서 0°C까지의 이력을 HCE (Human-Clothing-Environment) simulator로 측정하였다 (Fig. 3). HCE simulator는 사람이 의복을 여러 겹 입고 더운 곳과 추운 곳을 들락거리는 것처럼 여러 층의 직물로 의복 시스템을 구성하고, 저온과 고온 챔버로 환경을 구성해서 필요한 조건으로 의복 시스템을 저온과 고온에 번갈아 노출시켜 의복 내 미세기후를 측정하는 장치이다 (Kim et al., 2006). 40°C에서 0°C, 0°C에서 40°C까지 내려가고 올라가면서 형상기억합금의 이력을 3번 반복 측정하여 평균으로 나타내었다.

4. 형상기억합금 스프링 부착 의복 제작

실험을 위해 형상기억합금 스프링을 부착하지 않은 것과 부착한 두 종의 베스트를 <Fig. 4>와 같이 제작하였다. 부착한 형상기억합금 스프링은 총 30개이며, 가로 8cm, 세로 10cm 간격으로 부착하였다. 사용된 직물은 <Table 1>의 3rd layer 베스트로 안감 기능을 할 수 있도록 흡수속건 PET로 된 것이며 이들 베스트를 outer jacket의 안쪽에 착용하여 실험하였다.

Table 1. Characteristics of garment fabrics

Fabric system	Main purpose	Fiber contents	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)
1 st Undershirt	Wicking	PET 51% Nylon 41% PU 7%	0.58	137
2 nd Zip-up Shirt	Insulation	Nylon 63% PET 19% PU 18%	0.91	318
3 rd Vest	Insulation	High performance PET 100%	1.24	158
4 th Outer Jacket (e-PTFE laminated)	Weather Protection	PET 100% (lining) PET 100% (shell)	0.55	531

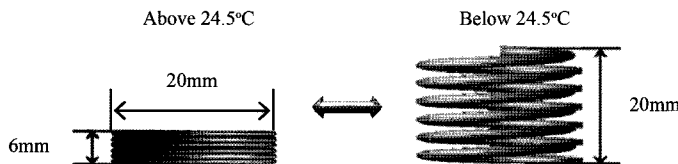


Fig. 2. Two-way effect of SMA (Shape Memory Alloy).

Table 2. Characteristics of SMA springs

Alloy	Composition (%)	Original length (mm)	Latent length (mm)	Average mass (g)	Response time (sec)
Nitinol	Ni 50.8 Ti 49.2	6	20	1.56	11

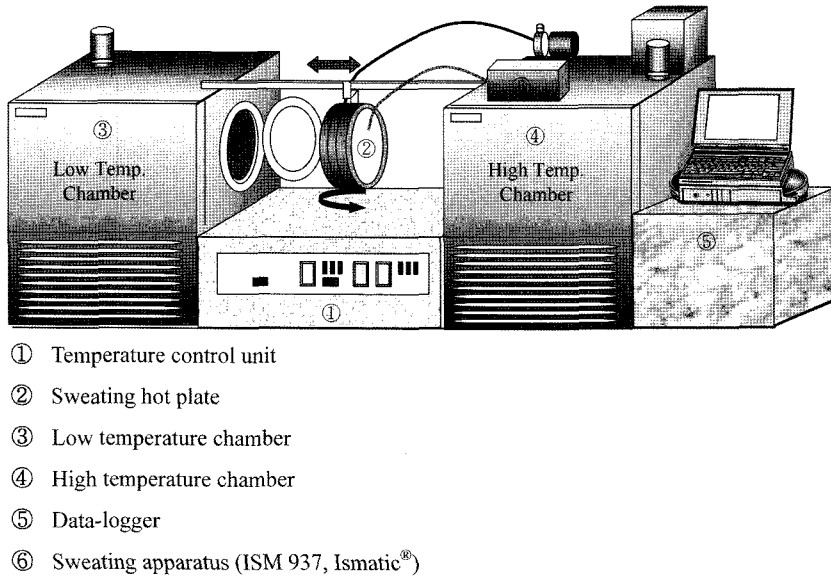


Fig. 3. HCE simulator (U.S. Patent Pending 10/1896.876, 2004; Korea Patent No. 0483996, 2005).

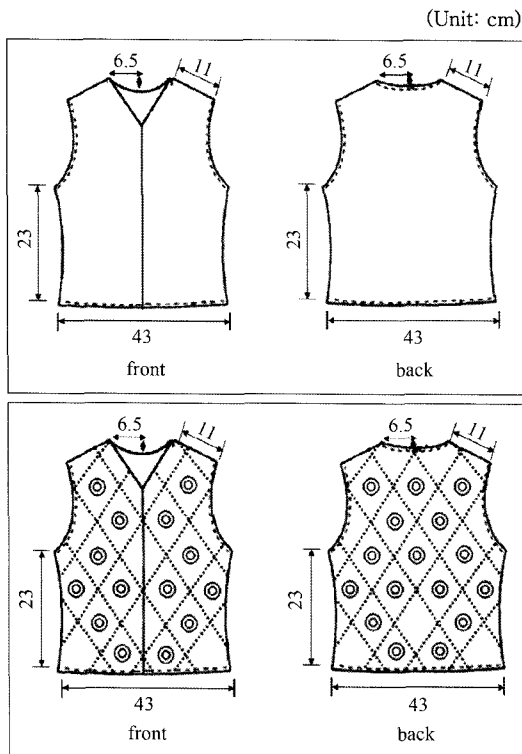


Fig. 4. Attachment of SMA onto the experimental clothing.

5. 형상기억합금 스프링 부착 의복의 착용 성능 평가

형상기억합금 스프링 부착이 의복의 보온성과 쾌적성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 형상기억합금을 부착하지 않은 것과 부착한 의복 시스템을 각각 착용하고 피부온과 의복 내 미세기후, 주관적 감각을 측정함으로써 보온성과 쾌적성을 비교 평가하였다.

실험에 참여한 피험자는 20대의 건강한 성인 남성 8명(키: 177.7 ± 2.3 cm, 체중: 74.0 ± 3.0 kg)으로 미세기후 측정을 위해 온습도센서(MSR12 Signal Data Recorder, MSR Electronics GmbH, Switzerland)를 등쪽 견갑골 사이와 같은 지점의 의복 각 레이어 사이에 부착하였다(Fig. 5).

피험자는 상온에서 30분간 안정한 뒤 인공기후실로 들어가 실험을 실시하였으며, 형상기억합금 스프링의 반응 온도 결정 실험 결과를 토대로 인공기후실의 환경을 온도 $5 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 $40 \pm 5\%$ 로 설정하였다. 피험자는 인공기후실에서 10분간 안정을 취한 뒤 트레드밀(J4F, Tunturi Oy Ltd. Finland)에서 7.0km/h의 스피드, 5%의 경사도로 15분간 러닝, 다시 의자에 앉아 20분간 휴식을 취하고 퇴실하여 10분간 안정을 취하였다(Fig. 6). 15분간의 운동은 등산시 소비되는 운동량(400rpm/hr, 이원자, 윤준식, 2001)을 고려하여 설정하였다.

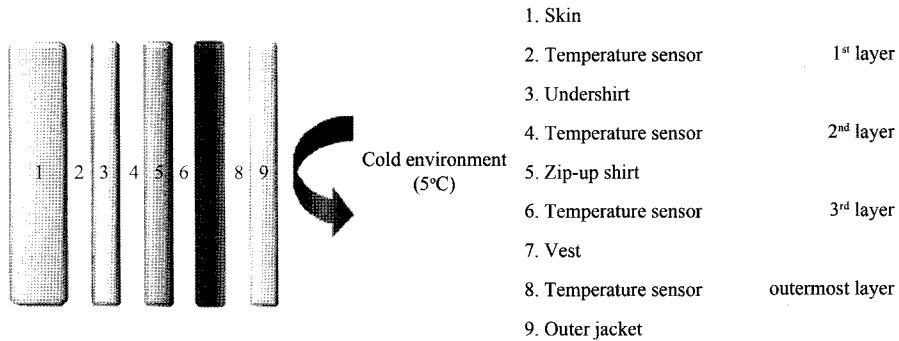


Fig. 5. Layer layouts of test fabrics and sensors.

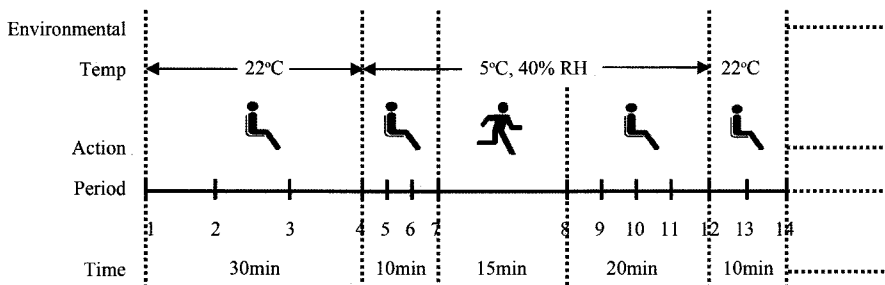


Fig. 6. Subjective test protocol.

6. 분석방법

의복 내 미세기후 온도와 습도는 매 10초 간격으로 측정되었고 평균 및 표준편차를 통해 t-test로 분석하였다. 온열감, 습윤감 및 쾌적감은 ASHRAE 7점 및 9점 척도를 사용하여 평가하였으며 SPSS 14.0을 이용한 Wilcoxon signed-rank test로 시간에 따른 유의차가 있는지 검정하였다. 모든 그래프는 평균값 그래프로 표기하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 형상기억합금 스프링의 반응 온도 설정

환경 온도에 따른 형상기억합금 스프링이 반응하는 온도를 도출하기 위해 실험의복시스템을 착용한 피험자를 17°C, 14°C, 11°C, 8°C, 5°C에 노출시켜 형상기억합금 스프링이 부착될 최외층의 의복 내 미세기후 온도 변화를 비교한 결과는 <Fig. 7>과 같다. 환경온이 내려갈수록 최외층의 온도가 빠른 속도로 하강하

는 것을 볼 수 있는데, 예를 들어 환경온 17°C, 14°C에서는 10분이 지나서야 의복 내 온도가 1.4°C 하강하였고 이 때 피험자는 비로소 추위를 느끼기 시작하는 것으로 분석되었다. 반면, 환경온 11°C에서는 환경온에 노출된지 5분도 지나지 않아 의복 내 온도가 1.5°C 하강하였으며 이 때 피험자는 처음부터 추위를 느끼지는 않았지만 10분이 경과했을 때 불쾌감을 호소하였다. 환경온에 노출되자마자 의복 내 온도가 각기 0.6°C, 1.4°C 하강한 8°C와 5°C의 환경에서는 피험자가 환경온 노출 후 바로 추위를 느끼는 것으로 나타났다. 이 결과를 토대로 형상기억합금 스프링이 부착될 최외층의 미세기후 온도는 추위를 느끼기 시작하는 24.5°C이며 24.5°C를 형상기억합금 스프링의 반응 온도로 도출하였다.

2. 형상기억합금 스프링의 이력 평가

24.5°C에서 반응을 시작하도록 처리한 형상기억합금 스프링의 반응성을 평가하기 위해 40°C에서 0°C까지 온도 변화에 따른 형상기억합금의 길이 변화를

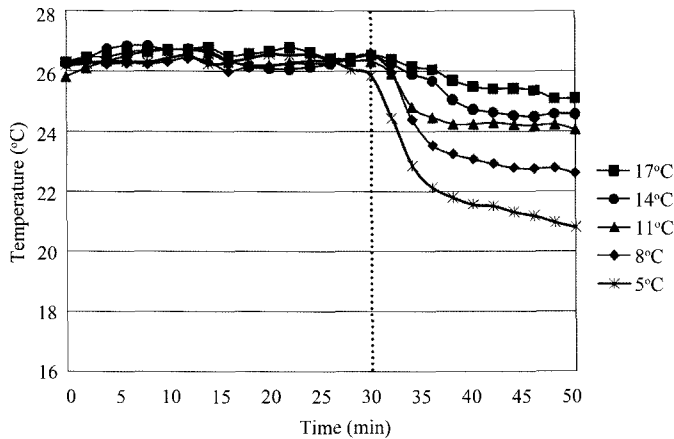


Fig. 7. Microclimate temperature of the outermost air layer at the environmental temperature of 17°C, 14°C, 11°C, 8°C, and 5°C.

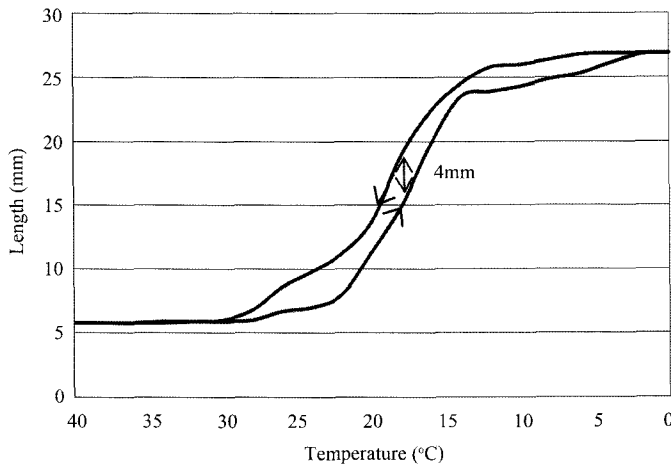


Fig. 8. Hysteresis of SMA.

측정한 결과 원래의 길이가 6mm였던 것이 온도가 내려갈수록 최대 27mm까지 늘어나는 것으로 나타났지만 <Fig. 8> HCE simulator 상에서 의복 레이어별로 위치시켜 단면을 측정할 경우 의복압으로 인해 평균 20mm 높이를 형성하는 것으로 나타났다. 환경 온도가 40°C에서 0°C로 변할 때와 0°C에서 40°C로 변할 때 형상기억합금 스프링의 길이 차이는 최대 4mm로 나타났는데, 이는 마르텐사이트와 오스테나이트 경계 영역에서 반복된 동작으로 미세구조가 전이됨에 따라 차이가 나타나기 때문이다. 또한 저온으로 내려갈수록 이력의 차이는 작아지고 있어, 추운 환경에 노출되었을 때 스프링이 즉각적으로 반응하여 공기층을 형성함으로써 보온성을 부여하고, 유지할 수 있

는 것으로 해석할 수 있다.

3. 형상기억합금 스프링 부착 의복의 착용 성능 평가

형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복의 의복 내 미세기후 온도 변화는 <Fig. 9>와 같다. 최외층 레이어에서의 미세기후 온도는 상온에서 30분 안정하는 동안은 거의 같지만, 저온으로 이동 후 운동 8분까지와 운동 후로부터 실험 종료까지 형상기억합금 스프링을 부착한 의복의 온도가 부착하지 않은 의복의 온도보다 각각 1.26°C, 1.31°C 더 높게 나타났다. 통계적으로도 운동 후 상온 안정기에

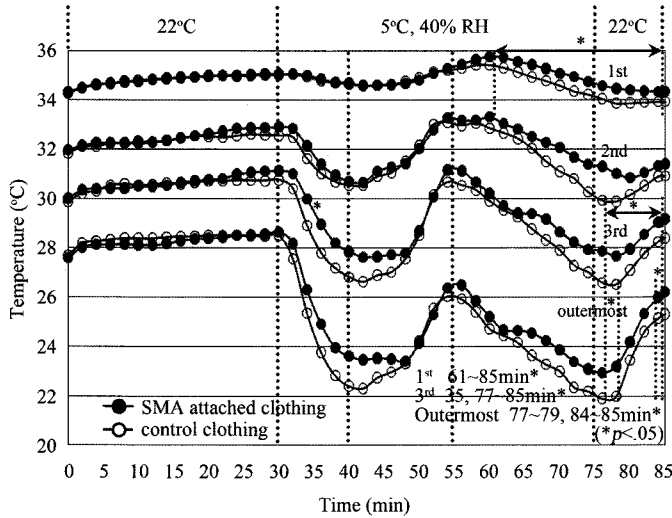


Fig. 9. Microclimate temperature of SMA attached and control clothing.

해당하는 77분~79분, 84분~85분까지 유의미함을 보였다($p < .05$).

세 번째 레이어에서는 형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복 사이의 온도 차이는 상온 안정 20분 후로부터 저온 입실 운동 시작 10분까지, 운동 후 휴식기로부터 실험이 끝날 때까지 각각 1.17°C, 1.41°C로 나타났으며 통계적으로도 35분과 77분~85분까지 유의미한 것으로 나타났다($p < .05$).

두 번째 레이어에서는 저온입실 후부터 운동 시작 전까지, 운동 직후 실험 종료까지 형상기억합금을 부착한 의복이 부착하지 않은 의복보다 높은 온도를 가지는 것으로 드러났지만, 통계적으로 유의미함을 보이지 않았다.

첫 번째 레이어, 즉 피부온은 상온과 저온입실 후에 형상기억합금을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복의 온도가 거의 같았지만, 운동 직후 휴식기부터 실험 종료까지 0.63°C의 온도 차이를 보였고 형상기억합금을 부착한 의복이 부착하지 않은 의복보다 온도가 높아 체온 변화가 더 적은 것으로 나타났다. 통계적으로도 운동 후 휴식기에 해당하는 61분과 63분~85분까지 유의한 것으로 나타났으며, 따라서 형상기억합금 스프링의 팽창으로 인한 보온효과를 확인할 수 있었다. 즉, 최외층이나 세 번째 레이어, 두 번째 레이어에서 운동 후 휴식기에 통계적으로 유의한 온도 차이가 발견되지 않았지만 형상기억합금이 보온효과를 발생시킴으로써 최내층 체온에 영향을 미친

것으로 해석할 수 있다.

<Fig. 10>은 형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복의 최외층과 최내층 레이어 습도 변화를 나타낸 것으로 세 번째와 두 번째 레이어는 최내층과 유사한 경향을 나타내 그래프가 겹쳐 보여서 최내층으로 대표 표기하였다. 최외층 레이어에서의 미세기후 습도는 실험 시작으로부터 상온에서 12분까지 형상기억합금을 적용한 의복 시스템이 미적용 의복보다 낮게 나타났고, 저온입실 후 운동 시작 7분 경과로부터 휴식기와 실험 종료에 이르기까지 형상기억합금을 적용한 의복의 습도가 더 낮은 것으로 나타났다. 특히 운동 시작 후 11분이 경과되었을 때 형상기억합금 적용 여부에 따른 습도 차이는 8.5%가 가장 높았고, 통계적으로도 운동 후 휴식기에 해당하는 52분~55분, 57분과 60분~61분, 67분~77분까지와 83분~85분까지 유의미함을 나타냈다($p < .05$).

최내층 레이어, 즉 피부층에서는 형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복 사이의 습도 차이가 크게 발견되지 않았지만, 운동 후 휴식기에 해당하는 61분~75분까지 형상기억합금을 부착한 의복의 습도가 부착하지 않은 의복의 습도보다 높게 나타나는 경향을 살펴볼 수 있는데, 이는 형상기억합금 스프링이 보온성을 발현함으로써 발한으로 인한 습도 상승으로 판단된다. 단, 피험자의 주관적인 감각 중 습윤감 결과에서 보다 건조하다고 보고한 것을 볼 때 전반적인 습윤감에는 영향을 미치지 어려운 근소

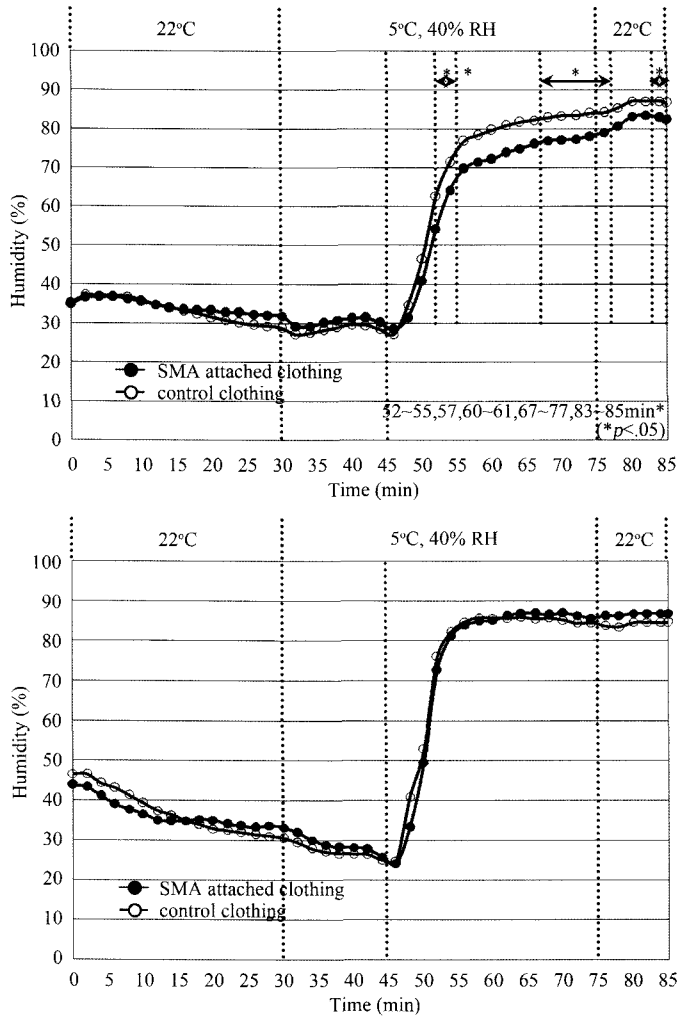


Fig. 10. Microclimate humidity of SMA attached and control clothing in the outermost layer and 1st layer.

한 차이로 해석된다.

형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복 시스템의 온열감, 습윤감 및 쾌적감에 관한 결과는 <Fig. 11>과 같다. 온열감은 상온 안정기에 해당하는 period 1~4까지 두 의복 시스템 모두 춥지도 덥지도 않다(neutral, 7점) 혹은 춥지도 덥지도 않다(neutral, 7점)와 약간 따뜻하다(slightly warm, 8점)의 중간 상태를 보였지만, 시간이 흐름에 따라 형상기억합금 스프링 부착시 더 따뜻하다고 느끼는 것으로 나타났다. 또한 저온입실 후인 period 4부터 운동 후 안정기인 period 12까지 형상기억합금을 부착한 의복이 서늘하다(cool, 4점)를 가장 낮은 척도로 가진

반면, 형상기억합금을 부착하지 않은 의복은 약간 춥다(slightly cold, 3점)를 가장 낮은 척도로 나타내며 차이를 보였다.

습윤감의 경우 period 1~7까지는 형상기억합금 스프링을 부착한 의복이 부착하지 않은 의복보다 습기 차지도 건조하지도 않은 중간(neutral, 4점) 상태보다 약간 위에 위치하였지만, 운동 직후부터 상온 안정에 이르는 period 9~14까지 형상기억합금을 부착한 의복 착용시 보다 건조하다고 느끼는 것으로 나타났다.

쾌적감은 실험 시작부터 실험이 끝날 때까지 형상기억합금 스프링을 부착한 의복이 부착하지 않은 의복보다 쾌적한 것으로 나타났고, 저온입실 후 10분에

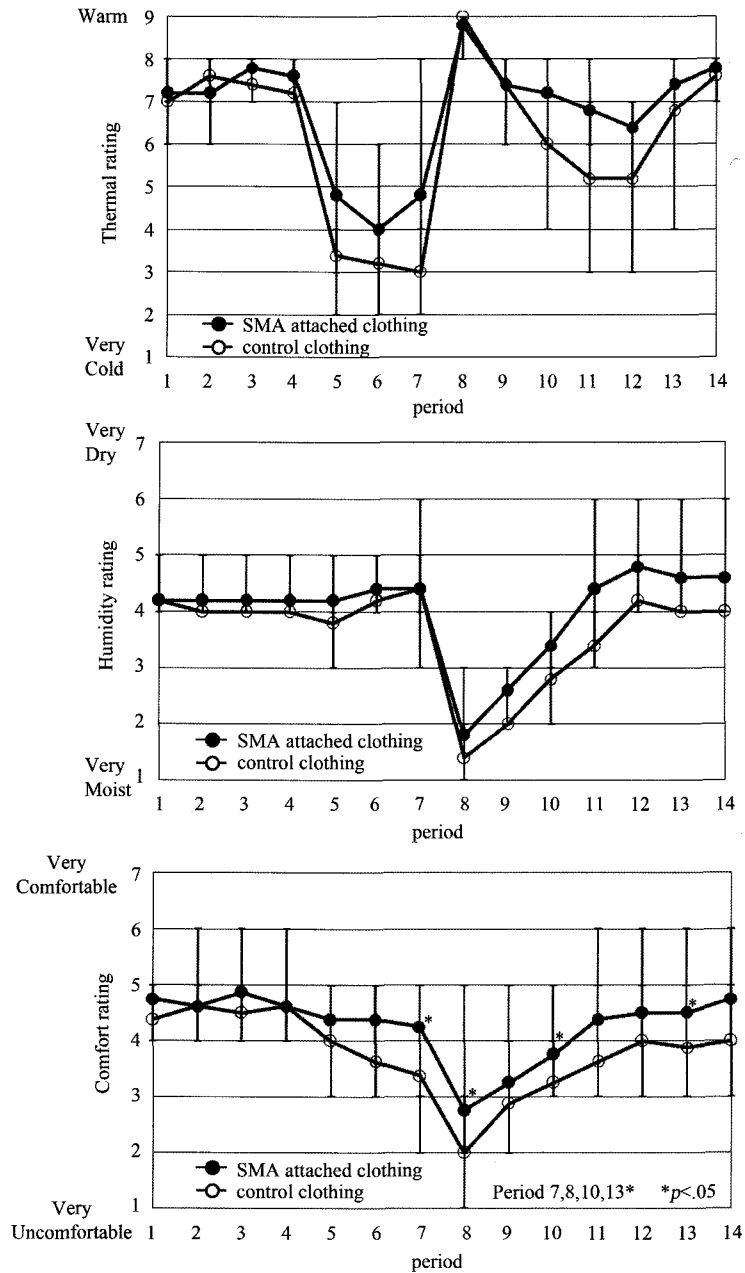


Fig. 11. Thermal, humidity and comfort sensation of SMA attached and control clothing.

해당하는 period 7과 운동 직후인 period 8, 운동 후 휴식기 10분에 해당하는 period 10과 퇴실 직후인 period 13에서 유의 수준 $p < .05$ 로 형상기억합금 부착 의복이 미부착 의복보다 쾌적감이 더 좋은 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 겨울철 등산환경하에서 등산활동에 적합한 의복시스템을 제안하기 위하여 의복시스템 내 가변적 보온성을 부여하고, 온도 변화에 따른 의복 내

공기층을 형성하도록 이방향 형상기억효과를 갖는 형상기억합금을 적용하여 지능형 의복을 제안하고 그 효과를 고찰하였다.

환경 온도 변화에 따라 형상기억합금 스프링이 반응하는 온도는 24.5°C로 결정하였으며, 24.5°C에서 반응을 시작하는 형상기억합금 스프링은 최대 27mm 까지 늘어나는 것으로 나타났지만 의복 내 부착시 의복압과 시료의 무게로 평균 20mm의 높이를 구현하는 것으로 나타났다. 형상기억합금 스프링을 부착한 의복과 부착하지 않은 의복의 착용성능을 비교한 결과, 운동 직후 휴식기로부터 실험 종료까지 최외층에서 1.31°C, 세 번째 레이어에서 1.41°C, 두 번째 레이어에서 1.45°C, 피부온에 해당하는 첫 번째 레이어에서 0.63°C 미세기후 온도가 더 높게 나타나 형상기억합금 스프링이 공기층을 효과적으로 형성시킴으로써 최내층 체온에 영향을 미쳐 보온성을 발현한 것으로 해석할 수 있었다. 또한 최외층을 제외한 나머지 세 번째 레이어와 두 번째 레이어, 피부온에 해당하는 첫 번째 레이어에서 형상기억합금 부착 의복이 미부착 의복보다 운동 후 휴식기에 더 높은 습도를 가지는 것으로 나타났지만, 피험자들은 저온입실 후 운동 중을 제외한 모든 period에서 형상기억합금을 부착한 의복 착용시 더 따뜻하고, 더 건조하다고 느끼는 것으로 평가하였다.

이와 같은 결과로 겨울철 저온환경에 노출되었을 때 운동 중 휴식기에 급격한 체온 저하를 방지하는데 있어 그 의의가 있는 것으로 판단할 수 있으며, 형상기억합금 스프링을 이용한 겨울철 등산복 접퍼를 개발함에 있어 의복 내 보온성과 쾌적성을 동시에 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 겨울한파 발열의류로 막을 수 있다. (2006, 1. 9). *연합뉴스*. 자료검색일 2008, 4. 11, 자료출처 <http://prlink.yonhapnews.co.kr/>
- 김태규, 성수광. (2006). 스포츠웨어 착용에 따른 운동시 온열생리반응에 미치는 영향. *한국의류산업학회지*, 8(1), 123-128.
- 신윤숙, 정영옥, 전향란, 손경희, 김성희. (2004). PCM 마이크로캡슐을 이용한 열조절 섬유소재 개발. *한국의류학회지*, 28(6), 767-775.
- 여정희. (2005). *SMA의 공기층 형성과 PCM을 이용한 의복의 가변보온성*. 연세대학교 대학원 석사학위 논문.
- 이원자, 윤준식. (2001). 등산복의 쾌적성 연구. *생활문화예술논집*, 24, 171-187.
- 장승욱. (2004). PCM 응용 온도감응 섬유소재. *섬유기술산업*, 8(3), 257-265.
- 한국섬유기술연구소. (2007). 스마트 섬유의 용도 전개와 시장 동향. *섬유기술*, 36(1), 67-75.
- 황수영. (2007). *형상기억합금(Shape Memory Alloy)을 이용한 가변보온성 지능형 의복 개발*. 연세대학교 대학원 석사학위 논문.
- Buehler, W. J., & Wang, F. E. (1967). A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. *Journal of Ocean Engineering*, 1, 105-120.
- Kim, E. A., & Yoo, S. J. (2004). U.S. Patent Pending 10/1896, 876. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kim, E. A., & Yoo, S. J. (2005). Korea Patent No. 0488996. Seoul: Korean Intellectual Property Office.
- Kim, E. A., Yoo, S. J., & Shim, H. (2006). Performance of selected clothing systems under subzero conditions: Determination of performance by a Human-Clothing-Environment simulator. *Textile Research Journal*, 76(4), 301-308.
- Rantanen, J., Impiö, J., Karinsalo, T., Malmivaara, M., Reho, A., Tasanen, M., & Vanhala, J. (2002). Smart clothing prototype for the arctic environment. *Personal and ubiquitous computing*, 6(1), 3-16.