지능형 소방복의 양산화를 위한 이방향 형상기억합금 부착 방법

박미경 · 이지연 · 김은애[†]

연세대학교 의류환경학과

Attachment of Two-Way Shape Memory Alloy onto Fabric for Mass Production of Fire Fighters' Turnout Gear

Mikyung Park · Jiyeon Lee · Eunae Kim[†]

Dept. of Clothing & Textiles, Yonsei University

접수일(2011년 12월 28일), 수정일(2012년 4월 2일), 게재확정일(2012년 4월 18일)

Abstract

This study shows the optimum attachment of Two-Way Shape Memory Alloy (TWSMA) springs onto thermal liner and its sewing method for the mass production of fire fighter's intelligent turnout gear. SMA springs were attached to the fabric by four different methods and stitched by two different shapes (square and wave). The durability of the attached springs was tested by laundering up to 50 cycles. Examined were whether the springs would remain attached to the fabric after repeated laundering, the shape memory effect and reaction of the springs, and the anti-corrosiveness of the springs. A Human-Clothing-Environment simulator evaluated thermal insulation according to attachment methods, air layer volume, and stitch types. The findings showed that silicon attached springs remained intact after repeated laundering; in addition, repeated laundering did not influence the responsiveness and anti-corrosiveness of SMAs. Air volume had positive relations with the insulation. Attachment methods or stitch methods had limited impact on the thermal insulation. As a result, a wave type stitch with silicone attachment was suggested as the optimum method to attach the SMA springs onto the intelligent turnout gear for fire fighters.

Key words: Shape memory alloy, Attachment method, Thermal insulation, Volume of the still air layer; 형상기억합금, 부착 방법, 단열성, 공기층 부피

I. 서 론

소방복에서는 화재 현장의 열이 복사 형태로 인체에 침투하는 것을 막기 위해 어느 정도의 두께가 필요하다. 이러한 소방복 직물의 무게와 작업 시 착용하는 소방 헬멧, 장갑과 같은 개인보호장비(Personal Protective

Equipment, PPE)에 의한 무게는 소방복을 포함한 소방 장비 전체의 무게를 가중시키고, 이로 인해 신체는 압박을 받거나 활동이 구속되어 작업 능률이 저하된다(Kim & Lee, 1997).

이러한 소방복의 무게와 무게로 인한 단점을 극복하기 위해 일방향 형상기억합금을 적용한 소방복, GORE-TEX®의 Airlock® 기술이 적용된 소방복 등이 개발되었다. 그러나 일방향 형상기억합금을 적용한 소방복은 일방향적 형상기억효과로 인해 화재 환경의 고온에서 팽창된 스프링이 상온으로 되돌아온 후에도 계속 팽창되어 있는 것으로 보고되었다(Congalton, 1999). 이렇게

[†]Corresponding author

E-mail: eakim@yonsei.ac.kr

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

팽창된 것은 원래의 수축 상태로 되돌리기 위해 외부의 응력이 필요하기 때문에(Miller & Lagoudas, 2000) 그 효용성은 극히 제한적이다. 또한, 현재 특허 등록(U.S. Patent No. 6,312,784 B2, 2001)은 되어있지만 그에 관한 구체적인 내용이나 제품 생산에 관한 기술은 보고된 바가 없다.

GOORE-TEX[®]의 Airlock[®] 기술은 정형화된 실리콘 소재의 폼을 이용하여 일정 공기층을 영구적으로 확보함으로써 기존 소방복의 중간층을 대체, 무게 면에서 절감시키는 효과를 가져왔다(Nocker & Seibert, 2002). 그러나 Airlock[®] 기술 역시 가변적인 주변 환경에 능동적으로 대처하지는 못하며, 단열재로서의 공기층 확보에 있어 실리콘 폼 높이 이상으로의 정지 공기층 두께를 확보하기 어렵다는 한계점을 가지고 있다.

이러한 기존의 한계점을 보완하기 위해 개발된 이방향 형상기억합금(Two-Way Shape Memory Alloy, TWSMA)을 적용한 소방복은 이방향 형상기억효과를 이용하여 주변 환경 온도에 따라 스프링의 수축과 팽창을 능동적으로 조절함으로써 필요할 때는 보호성을 부여하는 정지 공기층을 형성하고, 평상시에는 밀착된 형태로 활동이 자유롭도록 고안된 것이다. 또한, 형상기억합금 스프링의 팽창 정도와 수축 및 팽창 온도를 합금 제작 단계에서 자유로이 조절할 수 있어 다양한 환경에의 적용도 가능하다. 따라서, 소방복의 보호 성능을 충분히 발현하면서도 기존의 한계점으로 지적되던 두께와 무게감을 효과적으로 보완하는 것으로 연구된 바 있다(Lee, 2008).

선행연구(Hwang, 2007; Lee, 2008; Park, 2009; Yeo, 2005)에서는 지능성을 검토하는데 주목적을 두었기 때문에 생산성이나 의복 제작 이후의 보수, 관리 등의 문제점은 고려하지 않고 프로토타입을 제작하기 위하여 형상기억합금 스프링을 수작업 바느질로 두 겹의 직물 사이에 퀼팅으로 부착시켰다. 따라서 본 연구에서는 생산성을 고려하기 위하여 스프링을 직물에 부착하기 쉬운 방법들을 선정한 후 이들의 세탁 내구성을 비교 평가함으로써 최적의 부착 방법을 도출하고자 한다. 또한 스티치 간격에 따른 공기층 형성과 스티치 방법 간의 단열성의 차이 여부를 분석함으로써, 형상기억합

금 스프링을 이용한 지능형 소방복의 대량 생산 시 효율적인 봉제 공정을 제안하고자 한다.

II. 연구방법

1. 형상기억합금 스프링

본 연구에서 사용한 이방향 형상기억합금은 Ni과 Ti를 이용한 것으로 상온에서 7mm로 압축되어 있다가 33°C에서 반응을 시작하며 40°C 이상이 되었을 때 35.6mm로 팽창하는 스프링을 사용하였으며<Fig. 1>, 구체적인 특성은 <Table 1>과 같다.

<Fig. 2>는 형상기억합금 스프링의 상변태를 확인하기 위해 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimetry, DSC)를 이용하여 상의 변화에 따른 흡열과 발

Fig. 1. Two-way shape memory effect of SMA (Shape Memory Alloy) spring.

Fig. 2. DSC curves of prepared TWSMA to show the phase change by temperature.

Table 1. Characteristics of SMA spring

Alloy	Composition (%)	Original length (mm)	Latent length (mm)	Diameter (mm)	Mass (g)
Nitinol	Ni 50.8 Ti 49.2	7.0	35.6	21	2.6

Table 2. Transformation temperature by DSC

Phase	M _s	M _f	A _s	A _f
Temperature (°C)	34.61°C	1.15°C	14.10°C	49.36°C

열 반응 피크로부터 오스테나이트상과 마르텐사이트상의 시작온도와 끝온도를 얻은 결과이다. <Table 2>에서 보는 바와 같이 A_s(Austenite start temperature)는 14.10°C, A_f(Austenite finish temperature)는 49.36°C, M_s(Martensite start temperature)는 34.61°C, 그리고 M_f(Martensite finish temperature)는 1.15°C로 나타났다.

2. 형상기억합금 스프링의 부착 방법과 부착织물의 스티치 방법

1) 형상기억합금 스프링의 부착 방법

상용화에 적합한 형상기억합금 스프링의 부착 방법을 도출하기 위해 <Table 3>과 같은 기존의 연구에서 사용된 손바느질법과 대량 생산을 위한 기계화 작업이

가능한 고리 삽입법, 실리콘 직접 부착법과 실리콘 간접 부착법을 이용하여 스프링을 직물에 부착하였다. 손바느질법은 스프링의 하단면에 세 지점을 잡아 직물과 연결되도록 손바느질한 방법이며, 고리 삽입법은 직물 위에 동일 직물을 한 겹 덧대어 두 겹이 되도록 봉제한 후, 덧대어 봉제한 직물과 본래의 직물 사이에 스프링의 끝부분을 끼워 한 바퀴 돌려 삽입하는 방법이다. 또한, 실리콘의 접착성을 이용하여 스프링을 직물에 부착할 때, 직물 위에 직접 부착하는 실리콘 직접 부착법과 직물 위에 덧대어진 부직포 위에 부착하는 실리콘 간접 부착법으로 분류하여, 스프링의 끝부분에 액상 타입의 실리콘 0.05ml를 떨어뜨린 후 직물 혹은 부직포에 고정시켜 48시간 동안 건조하였다.

2) 형상기억합금 스프링 부착 직물의 스티치 방법

형상기억합금 스프링을 직물에 부착한 후 이를 봉제함에 있어 <Fig. 3>에서 보는 것처럼 사각 스티치 방법과 물결 스티치 방법으로 분류하여 각기 봉제하였다. <Fig. 3(a)>의 사각 스티치 방법은 기존 연구에서 일반

Table 3. Attachment method of SMA spring onto fabric

	Side	Above
Hand sewing
Loop insertion
Silicone (direct)
Silicone (indirect)

Fig. 3. Stitch types.

적으로 사용되어온 스티치 방법으로, 가로 방향으로 재봉선의 꿰김 없이 봉제하는 1차 공정을 통해 두 겹의 직물을 고정시키고, 세로 방향으로 짧게 봉제하는 2차 공정을 통해 스프링의 이동을 방지하고자 한 것이다. 여기서 1차 공정은 봉사의 꿰김 없이 계속적으로 봉제를 할 수 있는 작업을 의미하며, 2차 공정은 봉제 시 봉사를 끊어 다른 부분에서 다시 봉제를 이어가는 작업을 뜻한다. 물결 스티치 방법은 <Fig. 3(b)>와 같이 1차 공정, 즉 하나의 공정만으로 두 겹의 직물을 고정시키면서 동시에 스프링 사이도 봉제하는, 2차 공정을 요하지 않는 방법이다.

3. 형상기억합금 스프링 부착 직물의 세탁 내구성 평가

형상기억합금 스프링의 부착 방법에 따른 내세탁성을 평가하기 위해 두 겹의 직물 사이에 네 가지의 부착 방법에 따라 각기 스프링을 부착하고 세탁을 실시하였다. 다섯 개의 형상기억합금 스프링으로 하나의 시료를 구성하였으며, 부착 방법별로 총 1, 10, 20, 50회씩 반복 세탁하였다. 세탁 시간은 총 4시간 15분으로 ISO 6330: 2000(Textiles - Domestic washing and drying procedures for textile testing)에 준하여 행굼과 탈수를 표준 코스로 실시하였고, 28분간 건조하였다(Table 4).

반복 세탁이 실시된 후, 부착 방법에 따라 스프링과 직물의 분리 여부를 시각적으로 평가하는 부착성 평가

와 이방향 형상기억효과가 지속적으로 유효한지 검증하는 형상기억 반응성 평가, 중성 염소 분무 시험법(KS D 9502, 2009)으로 스프링의 부식성을 살펴보는 내부식성 평가를 실시하였다.

4. 형상기억합금 스프링 부착 직물의 단열성 평가

1) 형상기억합금 스프링 부착 직물의 정지 공기층 부피에 따른 단열 효율성 평가

세탁 내구성 평가를 통해 최적의 부착 방법으로 밝혀진 실리콘 직접 부착법으로 형상기억합금 스프링을 직물에 부착한 후, 공기층 부피에 따른 단열 효율성에 차이를 보이는지 살펴보기 위해 HCE(Human-Clothing-Environment) simulator를 이용하여 미세기후 온도 변화를 측정하였다. HCE simulator는 수직의 체열판과 온도도 센서로 구성되어 의복 시스템을 가상하며, 고

Table 4. Washing conditions

Washing machine	Drum-type, WR-HC137UW, Samsung, Korea
Washing process	Standard Process (4 hours 15 min) (Main washing time - 3 hours 48 min, Drying time - 28 min)
Cycles	0, 1, 10, 20, 50
Detergent	Cationic detergent (Acts, Pigeon Inc. Korea)
Amount of detergent	30ml

Table 5. Characteristics of garment fabrics

Fabric system	Fiber contents	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)	Fabric count (Warp×Weft/m ²)	Weave type
1 st Inner wear	Cotton 100%	0.42	173	72×62	Plain
2 nd Working wear	Polyester 52% Polypropylene 48%	0.30	157	67×58	Plain
3 rd Thermal liner	Meta-aramid 92% Para-aramid 5% T140 3%	0.58	251	65×61	Plain

온과 실온 환경의 분리된 챔버를 왕복하면서 환경 온도의 급격한 변화에 대한 인체의 온습도 변화를 측정할 수 있도록 설계된 기기이다(Kim et al., 2006). 실험을 위해 <Table 5>처럼 실제 소방대원들이 착용하는 의복 시스템 중 3개의 레이어로 시료를 구성하였으며, 형상기억합금 스프링은 3번째 레이어인 열차단 직물에 부착하였다. 실온(27°C)과 고온(40±0.5°C, 50±5% RH)의 환경에 번갈아 노출시켰을 때 통계적으로 유의한 차이가 나타난 고온 노출 18분<Fig. 4(a)>에서 34분<Fig. 4(b)>에 해당하는 미세기후 온도 변화에 의한 면적을 형상기억합금 스프링 미부착 시료와 비교하여 백분율로 산출한 것을 단열 효율성으로 간주하였으며, <Eq. 1>에 따라 산출하였다. 본 연구에서는 고온 환경 노출 시 미세기후 온도 변화를 기준으로 하여 온도 변화가 적을수록 단열 효율성이 높은 것으로 나타내었다.

$$\text{Thermal insulation (\%)} = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100 \quad \cdots \text{Eq. 1.}$$

S_1 : Area under curve formed by control fabric,

$$S_1 = \int_a^b f(x) dx$$

S_2 : Area under curve formed by TWSMA embedded fabric,

$$S_2 = \int_a^b g(x) dx$$

a: Beginning time of temperature change (18 min)

b: Ending time of temperature change (34 min)

두 겹의 직물 사이에서 스프링이 고온 환경 노출 시 충분히 팽창할 수 있는 스프링 팽창에 따른 직물의 여유분을 측정하기 위하여 스프링이 완전히 팽창하였을 때 스프링의 크기를 기준으로 직물의 여유분을 측정할 결과, 스프링이 팽창하기 위해 필요한 최소한의 직물 크기는 가로, 세로 5.6cm×5.6cm로 나타났다.

Fig. 4. Calculation of thermal insulation.

Fig. 5. Side view of the air layer generated by extended SMA springs.

Fig. 6. Calculation of the air volume.

스프링 팽창을 위한 최소한의 직물 크기를 기준으로 각각 0.5cm씩 더하여, 스프링 팽창 시 나타나는 측면의 모습이 <Fig. 5>와 같은 5개의 시료를 제작하고 그 때의 공기층 부피를 도출하였다(Fig. 6). 이때, 도출된 각 시료에 형성되는 공기층 부피는 시료 전체의 크기 490cm²를 기준으로 산출되었다.

또한, 각기 다른 공기층 부피가 단열 효율성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 HCE simulator를 이용하여 비교하였다.

$$V = (A_1 + A_2) \times 2 \quad \cdots \text{Eq. 2.}$$

V = Total air volume

$$A_1 \text{ (volume of cylinder)} = \pi r_1^2 h$$

$$A_2 \text{ (volume of cone)} = 1/3 \pi r_2^2 h$$

2) 형상기억합금 스프링 부착 직물의 스티치 방법에 따른 단열성 평가

형상기억합금 스프링이 부착된 직물의 스티치 방법에 따라 단열성에 차이가 있는지 비교하기 위해 실리 콘 직접 부착법을 이용하여 스프링을 직물에 부착 후,

HCE simulator로 사각 스티치 방법과 물결 스티치 방법으로 제작된 시료의 단열성을 비교·분석하였다.

5. 분석방법

형상기억합금 스프링의 부착 방법 및 스프링 부착织물의 공기층 부피에 따른 각각의 단열성은 SPSS 12.0 통계 패키지를 사용하여 One-way ANOVA test를 통해 분석한 후, Duncan test로 각 집단 간 차이가 있는지 사후 검정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 형상기억합금 스프링 부착织물의 세탁 내구성 평가

1) 형상기억합금 스프링 부착织물의 부착성 평가

형상기억합금 스프링 부착织물의 반복 세탁 횟수에 따라 스프링의 부착 방법별로 스프링과织물의 부착성 여부를 시각적으로 판단한 결과, <Fig. 7(a)>의 손바느질 법과 <Fig. 7(b)>의 고리 삽입법에서는 반복 세탁 10회부터 스프링과织물의 분리가 관찰되어 50회 반복 세탁했을 경우 두 가지 부착 방법 모두 스프링과织물이 완전히 분리되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 실리콘 간접 부착법의 경우 반복 세탁 50회까지 스프링이织물로부터 분리되지는 않았지만, <Fig. 7(d)>에서 보는 것처럼 스프링이 부직포에 부착된 채로 부직포 자체가织물로부터 분리되는 현상이 나타났다. 이는 반복 세탁 20회부터 나타난 현상으로, 물리적으로 스프링과织물이 완전히 분리되지는 않았지만, 50회 이상 반복 세탁할 경우 충분히 분리가 발생할 것으로 예상되었다. 실리콘 직접 부착법은 50회 반복 세탁 후에도 <Fig. 7(c)>에서 보는 바와 같이 스프링과织물 사이의 부착성이 반복 세탁 전과 유사하게 유지되어 실리콘을 사용한 직접 부착 방법이 부착성 측면에서 가장 세탁 내구성이 뛰어난 것으로 분석되었다.

2) 형상기억합금 스프링의 형상기억 반응성 평가

형상기억합금 스프링 부착织물을 1, 10, 20, 50회 반복 세탁한 후 스프링을织물로부터 분리하여 고온과 실온에서 수축과 팽창을 반복하는 형상기억효과 반응성을 비교한 결과, 세탁 횟수에 관계없이 형상기억합금 스프링이 1000번까지 동일한 반응 속도로 수축팽창

Fig. 7. SMA attached specimens after 50 cycles of laundering.

하는 것이 관찰되었다. 즉, 반복 세탁 후에도 스프링의 형상기억효과가 지속적으로 유지되는 것을 살펴볼 수 있었다.

3) 형상기억합금 스프링의 내부식성 평가

형상기억합금 스프링은 금속의 특성으로 인해 세탁 시 스프링 내 균열이나 표면 흠으로 인한 부식이 발생할 수 있고, 스프링의 부식은 균일성과 성능을 저하시켜 형상기억합금 스프링의 형상기억효과와 초탄성 효과에 부적인 영향을 미칠 수 있으므로, 중성 염소 분무 시험법으로 반복 세탁에 따른 스프링의 내부식성을 관찰한 결과, <Fig. 8(a)>에서 보는 바와 같이 <Fig. 8(a)>의 미세타과 <Fig. 8(b)>의 10회 반복 세탁, <Fig. 8(c)>의 50회 반복 세탁에 따른 스프링에서의 변화가 관찰되지 않았다. 즉, 세탁 전 시료와 세탁 후 시료 사이의 스프링 부식은 나타나지 않은 것으로 분석되었다.

Fig. 8. Corrosion-resistant properties of SMA spring with and without laundering.

2. 형상기억합금 스프링 부착 직물의 단열성 평가

1) 형상기억합금 스프링 부착 직물의 정지 공기층 부피에 따른 단열 효율성 평가

<Table 6>은 형상기억합금 스프링이 팽창하였을 때 생성된 정지 공기층의 부피가 서로 다른, 5개의 시료별 공기층 부피를 산출한 표이다.

공기층의 부피에 따른 단열 효율성을 비교 평가하기 위해 5개의 시료별로 최내층 레이어에서의 미세기후 온도 변화를 측정된 결과는 <Fig. 9>와 같으며, 특히 고온 환경에 노출된 18~34분 구간에서 공기층 부피가 서로 다른 시료 사이에 통계적으로 유의한 온도 차이를 보이는 것으로 나타났다($p<.05$). 또한 Duncan의 사후검정 결과, 고온 노출 시 18~34분 사이에서 5.6cm×5.6cm와 6.1cm×6.1cm의 시료 그룹과 6.6cm×6.6cm, 7.1cm×7.1cm, 7.6cm×7.6cm 사이즈의 시료 그룹 사이에 유의한 차이를 나타내는 것으로 밝혀졌고, 이때 온도 차이는 최소 0.31°C에서 최대 0.43°C로 나타났다. 즉, 6.6cm×6.6cm, 7.1cm×7.1cm, 7.6cm×7.6cm의 시료 그룹이 5.6cm×5.6cm와 6.1cm×6.1cm의 시료 그룹에 비해 고온 환경

Table 6. Volume of the air layer

Sample size (cm×cm)	Air volume (cc/490cm ²)
5.6×5.6	72
6.1×6.1	85
6.6×6.6	104
7.1×7.1	124
7.6×7.6	139

노출 시 낮은 온도 변화의 폭을 보여 단열 효율성 측면에서 우수한 것으로 분석되었다. 하지만 그룹 내에서는 미세기후 온도 변화 차이가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타나 단열 효율성 차이는 일정 공기층 부피 이상에서 나타나며, 본 실험의 경우 6.6cm×6.6cm 시료의 정지 공기층 부피인 104cc를 단열 효율성이 있는 최소한의 공기층 부피로 해석할 수 있었다. 이는 동일한 공기층 두께 하에서는 공기층의 부피 역시 단열 효율성에 영향을 미친다는 사실을 나타낸다.

통계적으로 유의한 차이가 나타난 18분에서 34분 사이에 스프링 부착 시료 간 온도 변화를 비교한 결과 스프링 미부착 시료의 온도 변화를 기준으로 <Fig. 10>과 같은 단열 효율성을 보였다. 즉, 고온 환경에 노출 시 104cc 이상의 공기체적을 갖는 시료에서 미부착 시료보다 10% 이상의 단열 효율성을 갖는 것으로 나타났다

Fig. 9. Microclimate temperature in the skin layer according to the volume of the air layer generated by SMA spring.

Fig. 10. Thermal insulation of microclimate temperature change between air volume from 18 min to 34 min.

Fig. 11. Relationship between average air volume and average microclimate temperature from 18 min to 34 min.

으며, 공기체적이 증가할수록 단열 효율성은 높아지는 경향을 보였다.

즉, 공기층 부피가 작을수록 환경 온도에 직접적으로 영향을 받아 미세기후 온도가 상승하였으며, 공기층 부피가 증가할수록 고온 노출에도 온도 변화의 폭이 작아 낮은 평균 미세기후 온도를 나타냈고, 따라서 상대적으로 공기층 부피가 작은 시료에 비해 단열성은 증가하는 것으로 해석할 수 있었다(Fig. 11).

2) 형상기억합금 스프링 부착 직물의 스티치 방법에 따른 단열성 평가

두 겹의 직물 중 아래 직물에 형상기억합금 스프링을 부착하고, 위의 직물과 스프링이 부착된 아래 직물을 봉제할 때 1, 2차에 걸친 봉제 과정이 필요한 사각스티치 방법과 1차 공정으로 봉제가 완성되는 물결스티치 방법의 단열성을 HCE simulator를 이용하여 비교한 결과는 <Fig. 12>와 같다. 사각스티치 방법과 물결스티치 방법 시료의 최내층에서의 온도 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으므로, 스티치 방법에 따른 단열 효과는 차이가 없는 것으로 분석되었다. 이는 사각과 물결이라는 스티치 방법이 스프링 팽창으로 인한 정지 공기층 부피 형성에 직접적인 영향을 미치지 않았으며, 두 스티치 방법의 시료 모두 고온 환경에 노출되었을 때 유사한 정지 공기층을 형성함으로써 최내층에서 단열성의 차이를 보이지 않은 것으로 판단할 수 있었다. 따라서 1차 공정으로 봉제가 완성되는 물결스티치 방법은 단열성을 확보하면서도 양산화 진행 시 생산 시간적 측면에서 효율적인 것으로 분석된다.

Fig. 12. Microclimate temperature in the skin layer according to stitch type.

IV. 결 론

본 연구에서는 가변적인 단열성을 부여하는 이방향 형상기억합금 스프링 부착 지능형 소방복의 양산에 적합한 스프링 부착과 봉제 방법을 도출하기 위해 세탁 내구성 실험과 단열성 평가를 실시하였고, 그에 따른 구체적인 봉제 방안을 제안하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 지능형 소방복의 양산에 적합한 형상기억합금 스프링의 부착 방법을 도출하기 위해 4가지의 부착 방법을 이용한 직물의 반복 세탁 및 세탁 후 물성 평가를 통해 세탁 내구성을 평가한 결과, 실리콘 직접 부착법이 직물 부착성 측면에서 세탁 내구성이 가장 뛰어나고 스프링 자체의 물성 변화에도 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

둘째, 최적의 부착 방법으로 밝혀진 실리콘 직접 부착법으로 형상기억합금 스프링을 직물에 부착한 후 정지 공기층 부피를 달리한 5개의 시료를 제작, HCE simulator를 이용하여 실온 환경 27°C와 고온 환경 40°C의 외부 온도 변화에 따른 의복 시스템 내의 미세기후 온도 변화를 측정함으로써 공기층 부피가 단열성에 미치는 영향을 살펴본 결과, 정지 공기층의 부피가 클수록 최내층 레이어에서 의복 내 미세기후의 온도 변화 폭이 작고, 단열 효율성도 증가하는 것으로 나타났다. 특히 정지 공기층의 부피는 단위 면적 490cm² 당 최소 104cc 이상 되어야 형상기억합금 스프링이 공기층을 효과적으로 형성하여 단열 효율성을 향상시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

셋째, 1, 2차 공정으로 봉제가 완성되는 사각 스티치 방법과 1차 공정으로 봉제가 완성되는 물결 스티치 방법의 스티치 방법에 따른 단열성을 평가한 결과, 두 스티치 방법 사이의 단열성은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 즉, 두 가지 스티치 방법 자체가 스프링의 팽창으로 인한 의복 시스템 내 공기층 확보에 영향을 주지 않아 단열성에 직접적인 영향을 미치지 않은 것으로 분석되었다. 이는 2차 공정에 의해 완성되는 사각 스티치보다 1차 공정으로 완성되는 물결 스티치가 대량 생산 시 생산 시간 단축에 효과가 있을 것으로 예상되므로, 양산체제 시 물결 스티치를 이용한 봉제 공정을 제안하고자 한다.

이러한 결과들을 토대로 이방향 형상기억합금 스프링을 적용한 지능형 소방복의 양산화를 위해 실리콘 직접 부착법으로 형상기억합금 스프링을 직물에 부착하고 490cm²의 단위 면적당 104cc 이상의 공기층을 확보하도록 물결 스티치 방법으로 봉제한 후, 의복에 적용하는 방법을 본 연구에서는 제안하고자 하였다.

References

- Congalton, D. (1999). Shape memory alloys for use in thermally activated clothing, protection against flame and heat. *Fire and Materials*, 23, 223–226. doi:10.1002/(SICI)1099-1018(199909/10)23:5<223::AID-FAM687>3.0.CO; 2-K
- Hwang, S. Y. (2007). *Intelligent thermal insulating outdoor jacket development by shape memory alloys*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul.
- 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. doi:10.1177/0040517506057529
- Kim, E. K., & Lee, M. S. (1997). A study on the actual condition of Korean firefighter's protective clothing. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 21(1), 93–103.
- Lee, J. Y. (2008). *Development of fire fighters' turnout gear using two-way shape memory alloy for thermal protection*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul.
- Miller, D. A., & Lagoudas, D. C. (2000). Thermomechanical characterization of NiTiCu and NiTi SMA actuators: influence of plastic strains. *Smart Materials and Structures*, 9(5), 640–652.
- Nocker, W., & Seibert, J. (2002). Fire fighter garment with non textile insulation. *Proceedings of the RTO HFM Symposium on Blowing hot and cold: protecting against climatic extremes, Germany*, 9.
- Park, H. J. (2009). *Intelligent thermal insulation of cold protective clothing by dimension and distribution of embedded shape memory alloy springs*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul.
- Russell, D. A., Elton, S. F., & Congalton, D. (2001). *U.S. Patent No. 6,312,784 B2*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Yeo, J. H. (2005). *Temperature adaptable thermal insulation of clothing system using SMA formed air layer and PCM*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul.