착용쾌적성이 향상된 방탄복 개발과 성능평가

김소영 · 이예진* · 홍경희*†

충남대학교 생활과학연구소, *충남대학교 의류학과

Development and Performance Evaluation of Body Armor for Wear Comfort Enhancement

Soyoung Kim · Yejin Lee* · Kyunghi Hong*†

Research Institute of Human Ecology, Chungnam National University

*Dept. of Clothing & Textiles, Chungnam National University

접수일(2012년 4월 26일), 수정일(1차 : 2012년 8월 30일, 완료일 : 2012년 9월 15일), 게재확정일(2012년 10월 12일)

Abstract

This study helps develop a cool body armor that maintains a tight-fit configuration to the body surface and evaluates the performance of newly developed body armor in a wear test. Three types of body armor were used for evaluation. One was a tight fitting body armor that was constructed to improve the degree of fit and ease of movement for Korean soldier using 3D technology. Another was ventilating body armor with attached spacers on the shoulder to reduce the thermal stress on the soldier. The third was a prevailing body armor produced by a Korean body armor company. In order to evaluate the performance of the body armor, a human wear test, a thermal mannequin test, and computational fluid dynamics (CFD) were executed. Five subjects participated in the wear test. Subjective wear sensation, total amount of sweat and dynamic change of clothing microclimate were observed during and after exercise on a treadmill; subsequently, it was found that subjects rated tight fitting body armor and ventilating body armor lighter, drier, and easier to move than the conventional body armor ($p<.05$). Total amount of sweat was the least in the case of ventilating body armor. The thermal resistance and vapor resistance of the ventilating body armor were improved remarkably. In addition, the skin temperature of the ventilating body armor with spacers was lower than the tight fitting body armor by at least 1°C in the CFD result. It is noted that thermal-wet comfort of the 3D body armor with ventilating feature is superior to the conventional body armor, especially when the ventilating channel is not closed due to a backpack.

Key words: Body armor, Wear comfort, Spacer, Thermal stress, Ease of movement; 방탄복, 착용쾌적성, 스페이서, 온열감, 동작 기능성

I. 서 론

*Corresponding author

E-mail: khhong@cnu.ac.kr

본 연구는 지식경제부의 섬유산업스트림간 협력에 관한 기술개발 사업인 패션스트림과제(과제번호 10036323)의 지원을 받아 수행되었습니다.

방탄복은 총알 및 파편으로부터 착용자를 보호하는 것이 주목적이었기 때문에 보호성능을 향상시킬 수 있는 신소재 개발은 꾸준히 이루어져왔다(Kim et al., 2009). 그러나 상대적으로 착용자의 쾌적성을 고려하여 통합적 시스템 접근법을 접목한 공학적 디자인 개발은 매우 부

족한 실정이다. 통합적인 방탄복 디자인 개발을 위해서는 방호성능과 더불어 동작 가동성, 착용쾌적성 등이 다루어져야 한다. 그런데 이 요소들은 상호향상의 관계가 아니기 때문에 적절한 방호성능 수준을 맞추면서 모든 성능을 충족시킬 수 있는 설계는 무척이나 어려운 일이다. 예를 들어 방호성능을 향상시키기 위해 소재를 포함한 여러 부자재를 많이 사용하거나 방탄복의 방호면적을 크게 하면 방탄복 자체의 무게가 증가하게 된다. 여기에 방탄판을 삽입하면, 총 무게는 기존 방탄복의 경우 대략 8.8kg(한국군 방탄복 기준)~9.9kg(미국 Interceptor Body Armor 기준, Endrusick et al., 2006)에 달해 착용 시 에너지 소모가 크고 동작의 민첩성 등도 떨어지게 된다. 이에, 조금이라도 무게를 줄이기 위하여 인체 체형에 적합하게 설계하여 불필요한 여유를 생략하는 것이 필요하다. 체형에 대한 심층 분석 없이 제작한 방탄복은 전반적으로 치수적합성이나 동작 가동성이 떨어지기 때문에 이로 인하여 착용자에게 무게감, 열적 불편감, 동작 불편함 등이 가중된다.

착용감이 우수한 방탄복을 위하여 최근에는 미국 여성의 인체 형상을 고려한 방탄복 디자인에 대한 연구(Tung, 2008), 방탄복 착용 시의 팔, 어깨 및 목의 동작기능을 평가한 연구(Blackledge et al., 2009; Close et al., 2009), 개인용 방탄복 착용 시 상체부의 근골격 통증 정도에 관한 연구(Konitzer et al., 2008) 등도 수행되어왔다.

방탄복의 쓰이는 소재의 면적을 더 이상 줄일 수 없을 경우에는 무게 경감을 위해서는 일차적으로 소재의 경량화가 필수적이며 이차적으로는 방탄복 무게를 착용자가 적게 느끼도록 적절하게 인체의 각 부분에 무게를 분산시키는 것이 필요하다. 무게 분산을 위해서 인체와의 밀착성을 향상시키면 동작 편이성도 동시에 향상시킬 수 있다.

최근에는 3차원 측정기술이 발달하여 인체에 잘 맞는 2D 방탄복이 국내외에서 개발되고 있다. 본 연구실에서는 아라미드를 여러 겹으로 적층하면서 한국인의 3차원 형상에 잘 맞으면서 총탄에 의한 부상 시 인체의 치명적 부위를 커버할 수 있도록 세라믹 판을 디자인하고, 이에 따라 밀착형 3D 방탄복 설계법(New1)을 제안한 바 있다(Kim et al., 2010). 그러나 인체 밀착형 방탄복은 무게 분산으로 인하여 동작 편이성은 높아지지만 열적 부담감이 늘어날 수도 있다.

형태적 문제를 보완하여 밀착성이나 동작 가동성을

개선하여도 방탄복의 열적 부담감은 방탄복에서 해결해야 할 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 최근 참전 병사들의 열적 부담감을 줄여주기 위하여 방탄복 안에 환기용 베스트를 착장한 후 증발냉각력과 단열력을 평가하여 환기성능을 개선(Cheuvront et al., 2008; Endrusick et al., 2006)시키거나 개인용 냉각장치를 방탄복에 부착한 후 생리반응 평가(Gonzalez et al., 2006; Hadid et al., 2008)를 실시하는 등 쾌적성 향상을 위한 연구가 하나 둘씩 진행되고 있다. 또한 군복 착용 시의 만족도 조사(Kim et al., 1990)에서는 통기성과 투습성에 대한 불만족도가 높은 것으로 보고되었다. 그러나 앞서 언급한 인체와의 밀착성은 해결하지 않고 환기성만을 다루었기 때문에 부피와 무게가 커짐에 따르는 단점을 재고 해보아야 한다.

이에 본 연구에서는 3D 밀착 방탄복(New1)을 제작하고, 이로부터 더 발전시켜 인체 모든 부분을 밀착시키기보다는 환기에 중요한 통로가 되는 곳은 밀착시키지 않으면서 그 외 부분은 밀착시켜 제작한 부분 밀착형 3D 방탄조끼(New2)를 제작한 다음 이 두 가지 타입의 방탄복에 대한 성능을 기존 방탄복과 비교 평가하고자 하였다. 즉, 체열의 확산에 중요한 어깨 목 부위를 스페이서로 들뜨게 하면서 다른 부위는 밀착시킨 부분 밀착형 3D 방탄복(New2)이 기존의 방탄복이나 전체 밀착형 방탄복에 비하여 열적 부담감과 착용쾌적성이 얼마나 향상되는가를 분석하여 한국인 방탄복 착용자의 착용감 향상에 기여하고자 한다.

II. 연구방법

1. 방탄복 디자인 선정

방탄복 디자인은 총 세 종류로서 두 가지 타입으로 새롭게 개발된 3D 방탄복(New1, New2)과 현재 국내에서 시판되어 사용되고 있는 기존의 방탄복(Old)을 선정하였다(Fig. 1). 개발 방탄복 1(New1)은 한국인 3차원 표준형상 인체를 이용하였고, 무게를 분산하면서도 잘 밀착되도록 아라미드 적층 두께 및 방탄판의 형상과 위치를 고려하여 3차원 형상에서 부위별로 블록화 한 다음 각 블록의 종단과 횡단에서 각각의 여유분을 측정하여 이를 패턴 설계에 반영하여 제작한 3D 밀착형 방탄복이다. 아라미드는 약 1cm의 두께로 몸판에 고루 분포하므로 이를 전체적으로 고려하여 여유분을 설정하였고,

Fig. 1. Three types of body armor (New1, New2, and Old).

방탄판은 앞판과 뒤판의 일부분에만 위치하기 때문에 방탄판이 없는 부위는 여유분을 설정하지 않으면서 방탄복의 겉감 패턴을 설계하였다(Kim et al., 2010). 또한, 아라미드는 고강도, 고신도, 고탄성을 동시에 만족시킬 수 있도록 최신 개발된 코오롱인더스트리(주)의 Heracron 600D를 사용하였으며, 기존의 Heracron 800D에 비하여 더 부드러워 여러 겹 적층 시에도 뻣뻣하지 않고 인체의 형태를 따라 곡이 잘 형성되도록 설계하는데 용이하였다.

개발 방탄복 2(New2)는 앞서 개발된 3D 밀착형 방탄복 1(New1)에 스페이서를 부착하여 환기효과를 가지도록 설계된 부분 밀착형 3D 방탄복이다. 방탄복은 착용 시 적층 구조로 인하여 열적 스트레스가 발생하는데 인체의 곡률과 형태를 고려하여 방탄복 내에 착용할 수 있는 스페이서를 부착하여 제작하였다(Fig. 2). 어깨 부위의 스페이서는 방탄복 착용 시 환기의 촉진 및 어깨의 압력을 분산시키기 위한 목적으로 설계되었으며, 그 형태는 어깨의 곡률을 고려하여 앞쪽은 2cm, 뒤쪽은 1cm의 두께로 제작되었고, 스페이서의 위아래에 절개선을 넣어 골을 형성하여 20cm × 6.5cm 크기로 제작하였다. 등의 스페이서는 환기촉진을 위하여 파이프 형태로 제작되었다. 스페이서로 인하여 착용 후 동작 시 불편함을 초래하지 않도록 동작 시에도 안정적인 제7경추 아래쪽에 지름 3cm, 높이 4cm의 원기둥형 스페이서를 부착하였다. 메쉬 구조의 소재를 사용하여 만든 조끼에 어

Fig. 2. Body armor with a spacer vest to reduce heat stress.

개와 등의 스페이서를 일체형으로 부착하여 조끼형의 내의로 제작하였으며 방탄복 안에 기존 내의 대신 이를 착용시켜 발한 시 착용쾌적성과 온열 쾌적성을 향상시키고자 하였다. 또한, 열적 부담이 커질 때 환기를 촉진하기 위하여 허리 부위에 벨크로를 이용하여 느슨하게 할 수 있도록 제작하였다.

개발 방탄복 1, 2(New1, New2)의 외피는 군용 난연 특수복 m-아라미드를 발수 가공하여 사용하였으며 내피는 면 100% 메쉬 소재를 사용하여 제작하였다. 기존의 방탄복(Old)은 현재 국내에서 생산되어 착용되는 방탄복을 선정하였다. 기존 방탄복(Old)은 현재 국내에서 생산되어 착용되는 방탄복을 선정하였으며 기존 방탄복(Old)의 외피는 아라미드 100%, 내피는 나일론 100% 타프타로 구성되었다. 각 방탄복의 무게는 개발 방탄복 1(New1)은 2.73kg, 개발 방탄복 2(New2)는 2.91kg으로 스페이서의 무게 0.085kg을 포함하여 총 2.99kg이며 기존 방탄복(Old)의 무게는 3.37kg이다. 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)에는 3차원 테크놀러지를 이용하여 한국형으로 새로 개발된 방탄판을 삽입하였다. 새로 개발된 방탄판의 무게는 4.03kg이며 기존 방탄판의 무게는 5.45kg이다. 방탄판의 무게를 포함한 총 방탄복의 무게는 개발 방탄복 1(New1)은 6.76kg이고, 개발 방탄복 2(New2)는 7.02kg이며, 기존 방탄복(Old)의 무게는 8.82kg이다.

2. 인체 착용 실험

선정된 세 가지 타입의 방탄복에 대하여 20대 피험자 5인을 대상으로 의복 기후를 측정하고 주관적 착용감 평가를 실시하였다. 방탄복 착용 후 휴대용 피부 온습도 센서(LT-8, Gram Co., Japan)를 앞의 가슴, 뒤의 견갑의 중앙에 부착하고 인공기후실(환경온도 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 $70 \pm 3\%$)에서 운동 전후의 온습도를 측정하였다(Fig. 3). 또한 운동 전후의 몸무게를 체중계로 측정하여 단위시간당의 발한량과 발한률을 계산하였다.

세 가지 타입의 방탄복을 착용하고 동작을 실시한 후에 주관적 평가를 7점 척도를 이용하여 실시하였다. 사용한 척도는 압박감(1=매우 적다, 7=매우 크다), 중량감(1=매우 가볍다, 7=매우 무겁다), 동작 용이성(1=매우 나쁘다, 7=매우 좋다) 등이었다. 또한 방탄복을 착용하고 트레드밀에서 러닝을 실시하면서 운동 중과 운동 후에 온열감(1=매우 춥다, 7=매우 덥다), 습윤감(1=매우 건조하다, 7=매우 습하다), 쾌적감(1=매우 불쾌하다, 7=매우 쾌적하다), 노동부담(1=매우 쉽다, 7=매우 많이

Fig. 3. Subject wear test in the environmental chamber.

힘들다) 등 쾌적성 요소항목에 대하여 주관적 평가를 실시하였다. 통계분석은 SPSS 18.0을 사용하여 일원배치 분산분석을 실시하였다.

3. 발한 셔말 마네킹을 통한 열저항과 투습성 평가

세 가지 타입의 방탄복에 대한 열저항 및 투습성 평가를 위하여 발한 셔말 마네킹을 이용하여 단열력(clo)과 증발냉각력(im/clo)을 측정하였다. 발한 셔말 마네킹은 인하대학교 스포츠레저섬유연구센터 및 서울대학교 패션신소재센터에 있는 아시안 남성 사이즈(키: 175cm, 면적: 1.8m², 무게: 30kg, 의복 사이즈: M)의 “Newton”을 사용하였으며 인공기후실의 환경은 온도 20±0.5°C, 상대습도 65±3%에서 실시하였다. 기존 방탄복(Old)과 3D 개발 방탄복 1(New1)은 면 내의, 전투복 상하의 위에 착용하였고 스페이서가 부착된 개발 방탄복 2(New2)는 스페이서를 부착하기 위하여 제작한 메쉬형 내의 위에 전투복 상하의와 방탄복을 착용하고 더울 때를 가상하여 스페이서가 부착된 경우에는 옆선의 벨크로를 느슨하게 붙여서 환기가 극대화되게 하였으며 이것을 다음의 수치해석 결과와 비교하였다.

4. 수치해석을 통한 온열 쾌적성 평가

방탄복 착용 시 스페이서가 있는 조건과 없는 조건에서 인체 피부면의 온도분포를 유한요소법에 의한 구조해석용 상용 소프트웨어인 FLUNT CFD(ANSYS, Inc., USA)를 사용하여 구하였다. 해석에는 mass balance equation, momentum balance equation, energy balance equation, density model of air식이 사용되었으며 온도 30°C, 상대습도 45%에서의 열손실량을 고려하여 피부온을 해석하였다. 수치해석에 사용된 데이터는 <Table 1>과 같이 방탄복 겹감, 안감, 메쉬, 아라미드의 면적(cm²), 무게(g), 두께(cm), 단위면적당 무게(g/cm²), 겉보기비중, 밀도(g/cm³), 함기율(%), 비열, 열전도도이다. <Fig. 4>는 열유체해석을 위하여 3D 스캔형상으로부터 지오펜트리를 생성하여 메쉬를 만드는 과정을 보여주는 것으로서 어깨에 스페이서가 있고 환기를 극대화하기 위하여 허리 부위도 느슨하게 착용한 예이다.

III. 결과 및 고찰

1. 인체 착용 실험

온습도 센서를 부착하고 운동을 실시한 후 상대습도가 90%에 도달했을 때 운동을 정지하였으며 총 온습도 측정시간은 운동 시작으로부터 30분이 될 때까지 측정하였다. 각 방탄복에서 운동 시작 후 상대습도가 90%에 도달한 시간을 측정한 결과는 <Table 2>와 같다. 방탄복 앞면에서는 개발 방탄복 2(New2) > 개발 방탄복 1(New1) > 기존 방탄복(Old) 순으로 상대습도 90%에 도달하였다. 즉 개발 방탄복 2(New2)의 경우는 548초가 걸려야 의복 기후가 상대습도 90%에 도달하였고 기존 방탄복은 394초 만에 의복 기후가 90% RH에 도달하였다. 방탄복 뒷면에서는 개발 방탄복 1(New1) > 개발 방탄복

Table 1. Properties of body armor system for CFD analysis

	Area (cm ²)	Weight (g)	Thickness (cm)	Unit weight/area (g/cm ²)	Apparent specific gravity	Density (g/cm ³)	Air permeability (%)
Outer (m-Aramid)	6.45	0.13	0.038	0.0202	0.5304	1.50	64.64
Lining (Nylon 100%)	6.45	0.05	0.013	0.0078	0.5963	1.39	57.10
Lining(mesh) (Cotton 100%)	6.45	0.14	0.107	0.0217	0.2029	1.55	86.91
Aramid	6.45	0.13	0.026	0.0202	0.7752	1.44	46.17

Fig. 4. Creating process of geometry (left) and mesh (right) from the 3D scan data.

2(New2) > 기존 방탄복(Old) 순으로 상대습도 90%에 도달하여 개발 방탄복의 의복 기하는 서서히 습해졌다.

<Fig. 5>는 상대습도가 90%에 달했을 때 운동을 중지한 후 휴식기의 온도 변화 그래프이다. 그래프 상에서 온도의 차이는 크게 나타나는 않지만 스페이서가 부착된 개발 방탄복 2(New2)의 앞면에서 휴식기에 온도가 더 감소하였다. 습도의 차이를 살펴보면 방탄복의 앞면과 뒷면에서 모두 개발 방탄복 2(New2) > 개발 방탄복 1(New1) > 기존 방탄복(Old) 순으로 습도가 감소하였다. 또한 개발 방탄복 2(New2)는 휴식기에 습도가 급격하게 감소되는 것으로 나타나 기존 방탄복에 비해 환기가 잘 되는 것으로 사료된다.

향온 항습실에서 운동 전후의 몸무게를 측정하여 발한량을 계산하였으며 운동시간은 운동시작~상대습도

90% 도달 시 운동정지~휴식기까지의 전체 시간을 30분으로 하여 측정하였다. <Table 3>은 30분 동안의 발한량 및 발한율을 측정한 결과이다. 기존 방탄복(Old) > 개발 방탄복 1(New1) > 개발 방탄복 2(New2)의 순으로 발한량이 많았으며, 따라서 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비하여 온열쾌적성이 더 좋았다.

주관적 착용감 평가결과는 <Table 4>와 같다. 가슴 부분의 압박감은 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비해 높으나 어깨 부분에서의 압박감은 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비해 적었다. 기존 방탄복(Old)이 평면적으로 설계되어 몸에 잘 밀착되지 않아 그 무게가 어깨에 모두 편중되는 것에 비하여, 3차원 기술을 이용하여 설계된 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)는 밀착성이 증대되어 가슴 부분에서 피트성이 향상되었기 때문에 방탄복 전체의 무게가 어깨에 편중되지 않고 전체적으로 고르게 분산되는

Table 2. Time to reach RH 90% in the microclimate for three types of body armor during exercise
(Unit : sec)

	Front			Back		
Type	New1	New2	Old	New1	New2	Old
Mean	486.4	548.8	394.4	451.2	420.8	384.0

Table 3. Amount of sweat & sweat rate after exercise

	New1	New2	Old
Amount of sweat (g)	0.1086	0.1110	0.1310
Amount of sweat rate (g/min)	0.0036	0.0037	0.0043

Fig. 5. RH (%) & temperature changes in microclimate of subject wearing body armor after exercise.

Table 4. Subjective sensation of three types of body armor

(Unit: 7 point scale, n=5)

		New1	New2	Old
Pressure	Chest	3.6	3.2	2.2
	Shoulder	3.6	3.4	4.2
Weight	Sense of weight (total)	3.4*	3.8	5.2*
Ease of Movement	Neck (flexion)	4.2	3.6	3.0
	Neck (extension)	6.0	6.4	5.2
	Neck (rotation)	3.8	3.8	3.0
	Firing in sitting position	5.0*	5.4*	3.0*
Total Sensation (during exercise)	Lying down	4.6	5.0	4.0
	Lying back	4.0	5.0	4.6
	Thermal sensation	6.4	6.2	6.4
	Humidity sensation	4.2	4.6	4.8
	Comfort sensation	4.4	4.0	3.6
Total Sensation (after exercise)	Burden of labor	3.2*	3.8	4.6*
	Thermal sensation	5.6	5.6	5.4
	Humidity sensation	4.8	4.6	5.2
	Comfort sensation	4.0	4.2	3.8
	Burden of labor	3.2	3.0	3.8

* $p<.05$

것을 알 수 있었다. 가슴 부분의 압박감 정도는 기존의 방탄복에 비해서 높기는 하지만 보통(4점) 이하이기 때문에 착용자에게 부담으로 작용하지는 않을 것으로 사료된다. 또한 전체적 중량감은 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비해서 적었으며 개발 방탄복 1(New1)은 기존 방탄복(Old)에 대하여 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p<.05$). 이는 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비하여 밀착성이 증대되고 무게가 경감되었기 때문에 가슴 부분의 압박감은 증가하고 어깨 부분에서의 압박감과 전체적인 중량감은 감소된 것으로 사료된다.

목의 동작 용이성에서도 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비해 동작이 용이하였으며 무릎앉아 총쏘기 동작에서는 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 모두 기존 방탄복(Old)에 대하여 통계적으로 유의차가 있었다($p<.05$).

운동 중 온열감, 습윤감 쾌적감을 측정한 결과 통계적으로 유의차는 없었으나 운동 중 쾌적감은 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비해 쾌적하였다. 운동 중 노동부담은 개발 방탄복1(New1)과 기존 방탄복(Old) 간에 통계적으로 유의차가 있었고($p<.05$)

개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비하여 운동 중 노동부담이 적었다. 운동 후 온열감, 습윤감, 쾌적감, 노동부담을 측정한 결과 세 가지 타입의 방탄복 간에 유의한 차이는 나타나지 않았다.

2. 발한 셔말 마네킹을 통한 열저항과 투습성 평가 결과

발한 셔말 마네킹을 이용하여 전신 열저항성을 측정한 결과는 <Table 5>와 같으며 기존 방탄복(Old)의 열저항성이 가장 높고($0.404\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) 이에 따라 보온력도 가장 높았다(2.6clo). 개발 방탄복 1(New1)은 기존 방탄복(Old)에 비하여 보온력이 86%였으며, 개발 방탄복 2(New2)는 기존 방탄복(Old)에 비하여 보온력이 62%로 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비하여 시원하였다. 발한 셔말 마네킹의 투습저항성을 측정한 결과 기존 방탄복(Old)의 투습저항성이 $76.98\text{m}^2 \cdot \text{Pa/W}$ 로 가장 높았으며 개발 방탄복 2(New2)의 투습저항성이 $36.4\text{m}^2 \cdot \text{Pa/W}$ 로 가장 낮았다. 기존 방탄복(Old)에 비하여 개발 방탄복 1(New1)은 80%, 개발 방탄복 2(New2)는 47%의 투습저항성을 가져 개발 방탄복 1, 2

Table 5. Performance evaluation of body armor using a thermal mannequin

	$R_{wtd} (m^2 \cdot ^\circ C/W)$	R_{clo}	$R_{et} (m^2 \cdot Pa/W)$	im	im/clo
Old	0.404	2.60	76.98	0.24	0.092
New1	0.349	2.25	61.76	0.28	0.124
New2	0.252	1.63	36.40	0.42	0.257

R_{wtd} = weighted total resistance, R_{clo} = thermal resistance of clothing, R_{et} = total water vapor resistance of clothing, im/clo = im/ R_{clo}

(New1, New2)가 기존 방탄복(Old)에 비하여 투습성이 더 높았다.

증발저항력을 알아보기 위하여 투습지수(im)를 구하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$im = 0.45 \times \frac{Rc(m^2 \cdot ^\circ C/W)}{Re(m^2 \cdot mmHg/W)}$$

im = permeability index

Rc = resistance to heat transfer(thermal insulation)

Re = resistance to moisture transfer

투습지수(im)는 기존 방탄복(Old)이 제일 낮았으며 (0.24im) 개발 방탄복 2(New2)가 제일 높았고(0.42im), 증발저항력은 기존 방탄복(Old)이 제일 낮고(0.092im/clo) 개발 방탄복 2(New2)가 제일 높아(0.257im/clo) 개발 방탄복 2(New2)가 기존 방탄복(Old)에 비하여 시원하였다.

3. 수치해석을 통한 피부온 분포

열적 쾌적성 향상을 위해 고안된 스페이스의 유무에 따른 수치해석의 결과는 다음과 같다. <Fig. 6>과 같이 스페이스가 있는 개발 방탄복 2(New2) 착용 시 스페이스가 없는 개발 방탄복 1(New1)에 비해 피부온의 차이가 1°C 이상 낮게 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 방탄복의 착용쾌적성을 향상시키기 위하여 디자인된 3D 부분 밀착형의 개발 방탄복 2(New2)가 3차원 밀착형 개발 방탄복 1(New1)과 기존 방탄복(Old)에 비하여 성능이 얼마나 개선되는가를 평가하였다. 개발 방탄복 1(New1)은 방탄복 적층 구조를 고려하여 부위별로 여유분이 다르게 3D로 설계되었으며, 개발 방탄복 2(New2)는 개발된 3D 방탄복 1(New1)에 착용시의 열적 스트레스를 감소시켜주기 위하여 메쉬 소재에 부착된 일체형 스페이스를 삽입하여 제작하였다. 그 결과 인체 착용 실험 시 3D 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존의 방탄복(Old)에 비하여 미세기후 90% RH에 도달하는 시간이 느린 것으로 나타나 인체 부담이 적고 환기가 잘되었다. 특히, 부분 밀착형 방탄복 2(New2)에서는 운동 후 휴식기에서 습도 감소가 급격하게 나타나 스페이스가 방탄복의 환기를 촉진함을 알 수 있었다. 운동 전후의 발한량은 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)의 발한량이 기존 방탄복(Old)보다 적어 온열쾌적성이 우수함을 알 수 있었다. 주관적 착용감 평가결과 개발 방탄복 1, 2(New1, New2)가 기존의 방탄복(Old)에 비하여 어깨 부분의 압박감과 전체적 중량감이 적고 동작 용이성이 우수하였다.

발한 셔말 마네킹 실험을 통하여 열저항 및 투습저항성 측정된 결과 새로 개발된 방탄복 1, 2(New1, New2)

Fig. 6. Results of CFD of skin temperature with / without spacer.

가 기존 방탄복(Old)에 비하여 열저항값, 투습저항값이 낮아서 땀이 잘 발산됨을 알 수 있었다. 또한 수치해석 결과 스페이서가 부착된 부분 밀착형 방탄복 2(New2)는 평균 피부온을 1°C 이상 낮춰주는 효과가 있어 착용자의 열적 스트레스를 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

부분 밀착형 3D 개발 방탄복 2(New2)의 부속품인 메쉬 소재에 부착된 일체형 스페이서 장치는 탈부착형으로서 이를 부착하고 옆선의 벨크로를 느슨하게 착용하면 환기가 극대화될 수 있다. 동작 가동성이 더욱 중요한 상황에서는 스페이서 메쉬 내의를 탈착하고 밀착형으로 착용할 수 있어 부분 밀착형 3D 개발 방탄복 2(New2)는 상황적응력이 큰 방탄복이라 할 수 있다. 환기를 촉진시키도록 한 설계 구조를 방해함이 없이 환기 효과를 발휘하려면, 방탄복 안에 착용되는 내의와 군복에 대한 설계도 같이 진행되어 전투복을 시스템화 할 때 더욱 효과적일 것으로 예상된다.

References

- Blackledge, C., Carruth, D., Babski-Reeves, K., Close, D., & Wilhelm, M. (2009). Effect of body armor design on upper body range of motion. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, Annual Meeting, USA*, 53 (14), 907-911.
- Cheuvront, S. N., Goodman D. A., Kenefick, R. W., Montain, S. J., & Sawka, M. N. (2008). Impact of a protective vest and spacer garment on exercise-heat strain. *European Journal of Applied Physiology*, 102(5), 577-583. doi:10.1007/s00421-007-0632-3
- Close, D., Babski-Reeves, K., Carruth, D., Blackledge, C., & Wilhelm, M. (2009). Assessment of body armor design impacts on user perceptions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, Annual Meeting, USA*, 53 (14), 912-916.
- Endrusick, T. L., Berglund, L. G., Gonzalez, J. A., Gallimore, R., & Zheng, J. (2006). Use of a spacer vest to increase evaporative cooling under military body armor. *DTIC online public technical reports*. Retrieved February 10, 2011, from <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a459877.pdf>
- Gonzalez, J. A., Berglund, L. G., Endrusick, T. L., & Kolka, M. A. (2006). Forced ventilation of protective garments for hot industries. *DTIC online public technical reports*. Retrieved February 10, 2011, from <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a460047.pdf>
- Hadid, A., Yanovich, R., Erlich, T., Khomenok, G., & Moran, D. S. (2008). Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing a ballistic vest. *European Journal of Applied Physiology*, 104(2), 311-319. doi:10.1007/s00421-008-0716-8
- Kim, S. Y., Lee, Y. J., Park, S. A., & Hong, K. H. (2010). Pattern construction for body armor with uneven thickness according to layering method of inner material. *Proceedings of the Society of Living Environment System, Fall Conference, Korea*, 163-164.
- Kim, J. H., Yu, E. S., Park, J. H., Cho, Y. S., & Yoon, I. N. (2009). 방탄복 기술동향 [A technical trend review of body armor]. *Fiber Technology and Industry*, 13(4), 292-302.
- Kim, K., Kim, Y., Kim, H., Ahn, T., Lee, S., Choi, K., Hong, K., & Hwang, S. (1990). A study on the functional design process and performance evaluation of army's training wear. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 14(2), 104-116.
- Konitzer, L. N., Fargo, M. V., Brininger, T. L., & Reed, M. L. (2008). Association between back, neck, and upper extremity musculoskeletal pain and the individual body armor. *Journal of Hand Therapy*, 21(2), 143-149. doi:10.1197/j.jht.2007.10.017
- Tung, T. Y. (2008). *Design criteria of type IV body armor for women*. Unpublished master's thesis, Oregon State University, Corvallis.