

화생방보호의 설계 개념 연구

A Study on the Design Concept for NBC Clothing

강재성*
Jae-Sung Kang

서현관*
Hyeon-Kwan Seo

박현배**
Hyen-Bae Park

류삼곤**
Sam-Gon Ryu

박상훈***
Sang-Hoon Park

Abstract

The selection factors of the protective clothing against the NBC agents are the protection(chemical, biological, TIMs), duration, weight/comfort, dexterity/mobility, size, visibility, cleaning and unit cost, etc. To develop the NBC protective clothing, we should need to review about the design concepts of the protective materials(shell and liner fabric) and form. This paper identify an important factors for the protective materials and form, and presents design strategies for important factors based on the evaluation results of the materials and the form.

Keywords : NBC Clothing(화생방보호의), Design Concept for NBC Clothing(화생방보호의 설계 개념)

1. 서론

화생방보호의는 화생작용제로부터 인체를 보호하고, 지속적인 임무수행이 가능해야 한다. 미국 NIJ(National Institute of Justice)의 지침서에 의하면, 화생방보호의의 선택시 유기물(화학, 생물학, 산업위험물)에 대한 방호력, 방호내구성, 환경조건, 중량/착용감, 기밀성/이동성, 크기, 형태, 세탁성, 훈련성, 제작비용 등을 고려해야 한다¹⁾. 이러한 선택요건을 만족하기 위해서는 보호소재와 보호의 형상 연구가 필요하다.

화생방 보호의 소재는 수증기 혹은 공기의 배출 여부에 따라 크게 불침투성, 침투성, 반침투성, 선택투

과성 개념으로 분류된다. 불침투성 소재는 외부에서 유입될 수 있는 모든 종류의 오염물질을 차단하는 개념으로 착용감은 전혀 고려하지 않는다. 침투성/반침투성 소재는 오염물질의 차단과 더불어 착용감 개선을 통한 임무 수행능력의 향상을 위해 등장한 개념이다. 이는 외피와 내피로 구분되는 직물로 이루어져 있으며, 오염물질은 내피에 함유된 활성탄을 통해 차단되어 피부를 보호한다. 그리고 공기와 같은 기체는 직물을 통해 자유롭게 드나들 수 있으므로 인체에서 발산되는 열이나 수증기의 배출이 용이하여 열적피로도를 획기적으로 줄일 수 있다. 이들 중 침투성 소재는 증기상의 오염물질을 주로 방호하기 위한 목적으로 설계되어 있어 액체상 작용제는 일부만 차단할 수 있기 때문에 방호성능 구현에는 한계가 있다. 반침투성 소재는 액체상의 작용제 방호를 위해 발수/발유성 부여, 에어로졸 상의 작용제를 방호하기 위한 원단 직조 설계 등으로 침투성 소재에 비해 기능성이 강화되었다. 또한 일반 환경에서 착용하는 동안 방호성능

† 2012년 1월 6일 접수~2012년 2월 24일 게재승인

* 삼양화학공업(Samyangchemical Co. Ltd)

** 국방과학연구소(ADD)

*** 삼성탈레스(SAMSUNG THALES)

책임저자 : 서현관(protec@samyangchem.com)

의 지속적인 유지관리를 위해 세탁성이 부여되었으며, 열적피로도 및 중량을 감소시켜 임무수행능력을 향상시켰다. 하지만 침투성/반침투성 소재는 에어로졸상의 작용제를 완벽히 차단하지 못하고, 활성탄의 흡착이 유지되는 기간에만 사용할 수 있다는 한계성을 지니고 있다.

선택투과성은 불침투성의 열피로도와 침투성의 방호성능 한계에서 벗어나기 위해 제시된 개념이다. 선택투과막은 외부의 모든 물질(공기, 액체/증기/에어로졸상의 작용제)을 유기막을 통해 지속적으로 차단할 수 있어 활성탄의 흡착한계성을 극복하였으며, 내부의 수증기를 효과적으로 배출할 수 있어 열피로도를 줄일 수 있는 소재로 인식되고 있다(Fig. 1)^[2].

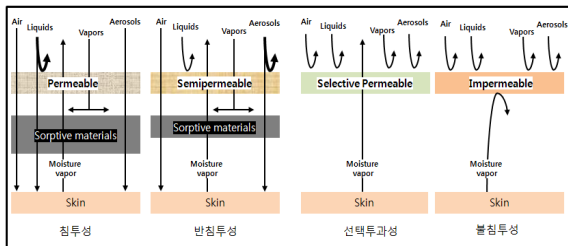


Fig. 1. The protective concept of characteristic materials

보호의 소재 및 디자인 개발에 관한 국제적인 동향은 다음과 같다.

불침투성보호의의 주요소재는 기체 투과성이 매우 낮은 것으로 알려진 부틸계 고무를 위장원단에 코팅하여 제조함으로써 이화학적 물성이 강하고, 작용제 방호성능이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 하지만 착용 후 열적피로도가 급격히 상승함에 따라 임무수행능력이 저하되는 단점을 가지고 있다. 하지만 열피로도의 영향을 거의 받지 않는 한랭기후(러시아 등)에서 여전히 운용 중이며, 그 외 나라에서는 고농도 화학/생물학 오염 발생 시에만 국한적으로 적용되며, 별도의 냉각 및 호흡장치를 부착하여 적용되고 있다.

1980년 초에 열적피로감에 따른 임무지속성의 한계를 극복하기 위해 침투성보호의가 개발되었다. 이때부터 화생방보호의의 재질은 위장무늬가 적용된 외피와 분말형 활성탄이 침적된 내피로 구성된다. 침투성 보호의는 우레탄 폼에 침적된 분말형 활성탄에 의해 증기상 화학 작용제 제거를 목표로 하고 있다. 하지만 활성탄을 침적하는 과정에서 활성탄의 겉 표면에 각종 유기물질 및 접착제 성분이 코팅되고, 일반 환경에서

운용시 활성탄이 탈리되며, 세탁성이 없어 운용시 활성탄에 흡착된 일반 유기물질과 외피에 묻은 오염물질을 즉시 제거하지 못하기 때문에 방호성능의 급격한 저하가 나타났다.

1990년대 미국에서는 분말형 활성탄을 적용한 보호의의 단점을 개선하기 위해 JSLIST 프로그램을 통하여 흡착소재를 구슬형 입상 활성탄으로 변경하였다. 이때 개발된 내피는 활성탄의 일부분만 접착제가 부착되고, 일반환경에서 운용 시 활성탄의 이탈이 일어나지 않으며, 운용시 몸에서 발생하는 땀이나 피지는 세탁을 통해 효과적으로 제거할 수 있어 착용시간동안 지속적으로 방호성능을 유지시킬 수 있다. 특히 두께가 얇아 열적피로도가 개선되었다. 이러한 구슬형 활성탄을 적용한 보호의는 현재 전 세계 약 30개국에서 운용중이다.

선택투과막은 투습성, 방풍/방수성을 기초로 하고 있다. 선택투과막이라 함은 무수한 기공성 혹은 소재 내의 작용기에 의해 인체에서 발생한 수분은 배출시키고, 외부에서 유입되는 공기, 오염물질 등을 완벽히 차단함으로써 아웃도어 분야에서 널리 적용되고 있다. 미군은 2000년대 초반부터 기술개발을 시도하고 있으며, 아민계, 셀룰로오스계, Nafion, Sulfonated polymer 계 등의 소재로 방호성능을 시험하고 있다^[2,3]. 이러한 선택투과막의 개념은 미국의 FSS(Future Soldier System), 독일의 IdZ(Infanterist der Zukunft)과 같은 미래병사체계에 적용하기 위해 연구개발 중이다.

앞서 설명한 바와 같이 보호의는 이미 방호성능이 검증된 소재로 제작되어진다. 하지만 형상에 따라 시스템의 성능(방호력, 중량, 운용성 등)이 달라진다.

보호의는 대부분 전투복 위에 착용하는 덧옷이기 때문에 착용자의 활동성을 보장할 수 있는 크기로 제작되어진다. 이에 따라 몸과 보호의 사이에는 공간이 형성되어 큰 공기층이 형성된다. 이 공기층은 운용 시 급격한 수축/이완 작용을 하여 보호의의 열림 부위를 통한 외부 오염공기의 유입을 초래하는 Bellow effect 를 야기시킨다.

문헌^[4]에 따르면, 보호복의 시스템 평가는 모의작용제(McS : Methyl Salicylate)를 이용하여 진행하였다. 시스템 평가 결과 운용과정에서 인체의 동적 활동범위가 가장 큰 목과 겨드랑이에서 모의작용제가 다량 투과되었다. 이것은 Bellow effect 때문에 발생하는 현상으로 보호의 상의에 형성된 공기층에 많은 영향을 받는 것으로 파악된다(Fig. 2).

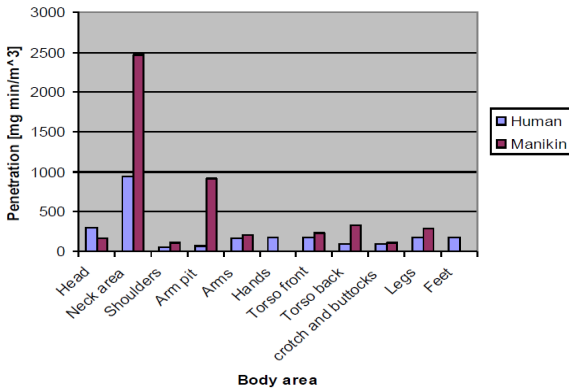


Fig. 2. The MIST evaluation results of protective clothing

이상과 같이 선진국에서는 보호의 소재뿐만 아니라 형상도 함께 고려하여 향상된 수준의 보호의를 개발하고 있는 반면, 한국은 1980년대 초에 개발한 분말형 활성탄소재의 침투성 보호의에 의존하고 있어, 개선된 소재와 형상을 고려한 보호의 개발이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 미래병사체계 응용연구와 연계하여 화생방보호의 신규 소재의 선택적 접근방안 및 새로운 형상개발을 통해 열피로도 및 Bellow effect 저감 방안을 제시하고자 한다.

2. 본론

가. 침투성보호의의 소재 설계

침투성보호의는 외피와 내피로 구성되며, 방호성능의 관점에서 기능이 구분되어 있다.

외피가 구현해야 하는 주요 성능은 액체 및 에어로졸 형태의 작용제를 1차적으로 방호하는 것이며, 증기상의 작용제의 침투를 최소화해야 한다. 내피가 구현해야 하는 주요 성능은 기체로 침투되는 화학작용제를 흡착 기능을 통해 제거하는 것이다. 그리고 외피와 내피가 결합된 상태에서는 외부의 공기는 받아들이고, 피부로부터 발생하는 수증기와 열을 발산하여 열피로도를 감소시킴으로써 임무지속성을 향상시키는데 있다. 이와 같은 주요기능을 Fig. 3에 도식화 하였다.

이렇게 침투성 소재의 방호개념을 이해함으로써 보호의의 소재에 대한 설계 방안을 도출 할 수 있다.

외피 개발 시 주요 고려사항은 방호성능, 열피로도, 가시광선/적외선 위장, 내구성이다(Fig. 4).

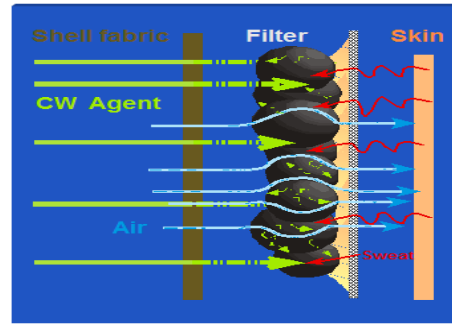


Fig. 3. The protective concept of air permeable protective materials



Fig. 4. The considering design items of outer shell fabric

방호성능에 주로 관련된 요소는 공기투과도와 액체 발유도, 기공도 등이 있다. 공기투과도의 조절을 통해 증기상 작용제의 침투속도를 제어하고, 액체 발유도를 통해 액체상의 작용제 침투를 차단할 수 있어야 하며, 에어로졸 방호를 위한 기공크기에 대한 관심 및 연구도 필요하다.

열피로도는 주로 원단의 두께 및 공기투과도와 관련된다. 원단이 얇고, 공기투과도가 높은 것이 열피로도가 적지만, 내구성과 방호성능을 동시에 충족시켜야만 하므로 적절한 수준의 값을 정립할 필요가 있다.

가시광선/적외선 위장성능은 군의 요구에 따라 제시된 위장무늬를 적용하여야 한다. 이때 표면처리, 견뢰도 등을 고려하여 염색이 이루어져야 한다.

내구성은 다양한 항목이 있으나 주로 착용성과 강도를 고려하여 인열 강도와 세탁 내구성(견뢰도, 발유도 등)이 보장될 수 있도록 설계해야 한다.

화생방보호의 최종 개발목표는 높은 방호성능의 유지 및 착용성이다. 공기투과도와 액체 발유도는 방

호성능에 주로 관련된 항목이며, 열피로도과 내구성등과도 밀접한 관련이 있어 제품의 주요 검토항목으로 선정해도 무방하다.

공기투과도는 화학작용제가 포함된 오염공기, 즉 증기상의 작용제가 직물로 스며들 때 투과속도를 제어하는 중요한 요소이다. 공기투과도는 투과율이 낮은 외피의 영향을 많이 받게 되므로 외피의 설계 제어가 방호성능의 향상에 큰 영향을 끼친다.

공기투과도와 관련된 연구는 불침투성 보호의 소재 설계개념에서부터 도출되었다. 이에 관련된 문헌^[5]에서는 다음과 같은 수식 (1)을 이용하여 침투성 소재의 공기투과도를 설정하였다.

$$C_I T_{skin} = M_f / P_a \tag{1}$$

여기서, $C_I T_{skin}$ = Instructive to estimated the agent dosage

M_f = Weight average

P_a = The fabric air permeability

HD 과과농도의 기준^[5]은 피부가 붉어지는 정도인 100 mg-min/m³이며, GD는 LCt₅₀을 기준^[7]으로 35 mg-min/m³을 설정하였다. 위의 식에 따라 계산한 결과 외피의 공기투과도는 39.6 cm/min 전후로 설계하여 보호의를 제작하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단되었다(일반적인 보호의의 시편방호성능 기준을 고려할 때 HD = 4.0 µg/cm² 이하, GD = 1.25 µg/cm² 이하임).

Table 1. The correlation of air permeability vs. threshold

Agent	Breakthrough Dosage (mg-min/m ³)	Threshold Mf (µg/cm ²)	비고
HD	100*	3.96	공기투과도 = 39.6 cm/min (at 0.1 i.w.g.)
GD	35**	1.386	

* HD : 문헌 5, p 14., ** GD : 문헌 7, II-23

액체발유처리는 액체상의 화학작용제가 국소 부위에 급격히 흡수되어 과량 침투함에 따라 내피에 직접적인 타격을 가하게 되어 방호성능이 급격히 상실되는 것을 방지하기 위함이다. 발유도 등급이 높아질수록 고체임계표면장력값이 낮아지며, 화학작용제를 포함한 탄화수소계 유기화합물의 침투를 막아 줄 것으로 판단된다 (Table 2).

Table 2. The KS standard materials for the oil repellency test

시험용액	발유등급 [급]	밀도, [kg/L]	표면장력 at 25°C, [mN/m]
흰색광물유에 불합격	0	-	-
흰색광물유	1	0.84~0.87	31.5
흰색광물유 65 vol : N-헥사데칸 35 vol	2	0.82	29.6
n-헥사데칸	3	0.77	27.3
n-테트라데칸	4	0.76	26.4
n-도데칸	5	0.75	24.7
n-데칸	6	0.73	23.5
n-옥탄	7	0.70	21.4
n-헵탄	8	0.69	14.8

• 관련 근거 : KS K ISO 14419

화학 작용제 중 25 °C에서 HD와 GD의 고체임계표면장력은 각각 42.5 mN/m, 24.5 mN/m 이다^[6]. 따라서 고체임계표면장력 값보다 낮은 값을 가지도록 외피의 표면처리가 필요하다. 따라서 외피의 발유도 시험평가는 최소한 n-도데칸 이하의 표면장력을 가지는 탄화수소계 물질을 통해 확인해야 하며, 바람직하게는 n-데칸 이하의 표면장력을 가지는 용액으로 시험해야 한다. 하지만 시험결과처리 시 육안 확인에 의한 개인적인 오차가 발생하기 때문에 접촉각 측정방법에 의해 현재의 기술력으로 도달 가능한 고체임계표면장력 값을 확인하였다.

일반적으로 고체임계표면장력(γ_S)은 고체와 액체의 접촉각으로부터 Zisman plot에서 결정되어지며, Young's Equation을 이용한 Zisman plot에서 $\cos\theta = 1$ 일때 γ_L 을 γ_S 로 정의 한다. Young's Equation^[7]을 정의하면 수식 (2)와 같다.

$$\gamma_L \cos\theta = \gamma_S - \gamma_{SL} \tag{2}$$

여기서 γ_S : 고체의 임계표면장력

γ_{SL} : 고체, 액체간의 계면 장력

γ_L : 액체의 표면장력, θ : 접촉각

발유처리 된 초기상태 외피에 대한 유기액체별 접촉

각을 측정된 결과 Table 3과 같다. 이 고체임계표면장력 값을 Zisman plot을 이용하여 외삽한 $\cos\theta = 1$ 값을 계산한 결과, 현재 기술로 도달 가능한 고체임계표면장력 값은 약 21 mN/m 이었다.

Table 3. The contact angle test results for outer shell

유기 액체	n-헥산	n-데칸	n-테트라데칸	흰색광물유
액체표면장력 (mN/m)	18.4	23.5	26.4	31.5
접촉각(θ)	0	34	85.6	109.3
지속시간	수초	5 분	수시간	수시간

보호의는 일반 환경에서 적의 공격이 예상될 때 착용을 하며, 방호성능의 유지를 위해 세탁이 필요하다. 착용과 세탁과정에서 가장 변화가 심한 항목은 액체발유도이다. 착용에 의한 물성저하는 운용성에 따라 달라지기 때문에 본 연구에서는 세탁방법에 의한 발유도 변화를 관찰했다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 세제의 종류에 관계없이 세탁횟수의 증가와 비례하여 고체임계표면장력도 증가됨을 알 수 있다. 하지만 세제성분에 따라 고체임계표면장력은 달라진다. A 세제의 경우 2회 세탁부터 외피의 고체임계표면장력 값이 화학작용제 GD의 액체표면장력보다 큰 값을 보였으며, B 세제는 5회 세탁 이후에도 외피의 고체임계표면장력 값이 화학작용제 GD의 액체표면장력보다 낮은 값을 보였다. 즉, 고체임계표면장력은 세탁의 성분에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

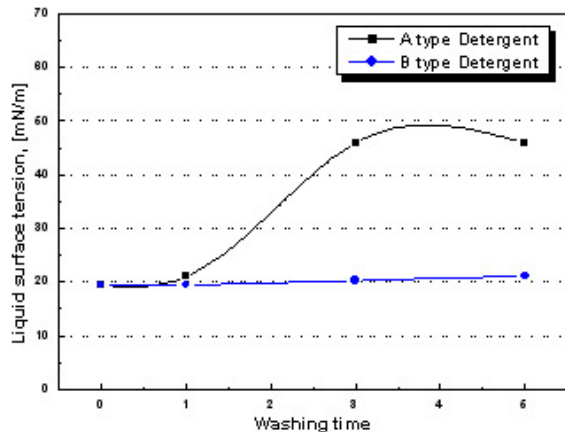


Fig. 5. The variation of solid critical surface tension for outer shell according to washing conditions

따라서 세탁 시 외피의 고체임계표면장력에 영향을 주지 않는 세제를 선정하여야 한다.

액체발유도와 화학작용제 방호력과의 상관관계를 분석하려면 보호의를 착용 및 세탁 후에 화학작용제 투과량의 변화를 파악하는 것이 필요하다. Fig. 6에 따르면 보호의의 착용 및 세탁에 의해 화학작용제 투과량의 변화가 큰 것은 GD 작용제이다. 이는 착용 및 세탁에 의해 외피의 액체발유도 손상에 따른 영향으로 판단된다. 따라서 착용 및 세탁성을 고려할 때 외피의 초기 고체임계표면장력값은 GD의 액체표면장력 값인 24.5 mN/m 미만으로 제작하는 것이 바람직하다.

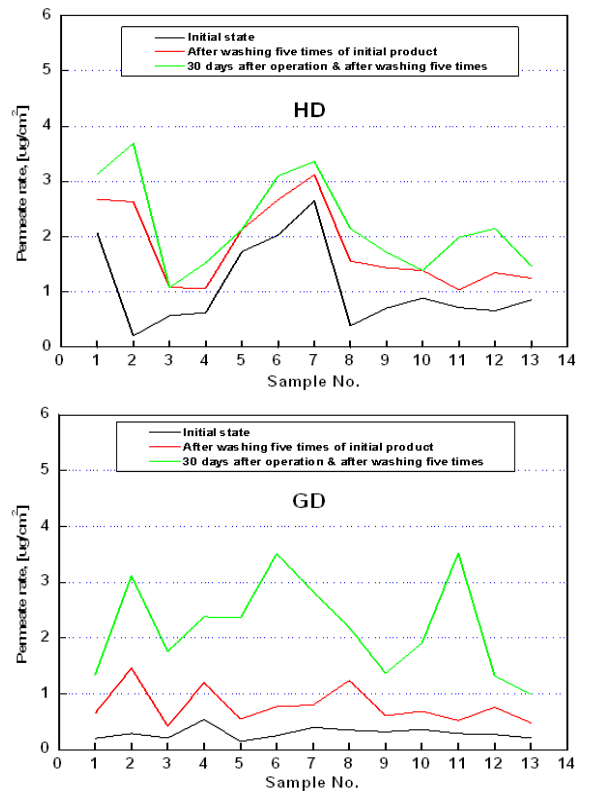


Fig. 6. The chemical warfare permeation values(initial, washing and operation)

열피로도 는 의복을 입고 작전 시 임무수행 지속시간과 밀접한 관련이 있으며, 섬유 의 밀도, 두께, 표면처리, 기공도 등에 의존하게 된다. 이 항목들은 섬유의 직조과정에서 밀도나 재직 방법에 따라 달라진다. 본 연구에서는 열피로도 에 영향을 미치는 많은 요소들 중 섬유 기공도에 따른 수증기저항성을 평가하였다. 시험

결과 열피로도도는 평균기공크기에 따른 섬유 내 함기율이 적을수록 투습저항성은 낮아진다(Table 4). 향후 개발될 보호의가 미군 최신 규격(MIL-DTL-32102)의 수증기 저항성 값(9.8 m²Pa/W 이하)을 기준으로 한다면, 평균 기공도는 최소 15.0 μm 이하로 재직하는 것이 바람직할 것이다.

Table 4. The correlation of porosity vs. water vapor resistance

구분	기공도 [μm]	수증기 저항성 [m ² Pa/W]
A	12.04	8.2
B	15.16	8.6
C	16.22	11.6
D	15.77	10.3

하지만 열피로도도는 섬유의 평균기공도 외에 재질, 밀도, 두께, 조직 등 다양한 요소가 관여함에 따라 지속적인 연구개발이 필요할 것으로 판단된다.

나. 선택투과막 소재 설계

선택투과막은 현재 활성탄형 보호의 수준의 방호성을 만족할 만한 제품이 개발되어 있지 않고, 방호성을 가지는 물질이 공개되어 있지 않기 때문에 다양한 소재로 평가가 진행되어야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 선진국에서는 플루오르계, 우레탄계, 그리고 복합소재들이 기초연구 되고 있다.

선택투과막의 소재는 화학적 안정성을 가지며 막으로 제조된 후 투습성을 갖춘 물질이어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 국내에서 수입이 용이하고, 안정적인 제조가 가능한 우레탄계, 아크릴계, 플루오르계를 적용하여 단층 또는 복합 층의 선택투과막을 제조하였으며, 미군 보고서에 일부 적용된 Nafion 소재를 비교 시험 대상으로 하였다. Table 5에 나타난 바와 같이 소재 종류, 두께, 기공특성들이 서로 상이한 13종의 멤브레인을 획득하여 모의 작용제(DMMP), 수증기 투과율을 시험하였다. 국내에서 획득 가능한 소재들 두께는 단일막의 경우 약 10~20 μm 이내이고, 복합소재들도 최대 50 μm 였다.

모의 작용제 투과율은 두께가 증가하면 낮아지는 경향성을 보이며, 수증기 투과율은 복합막보다는 단일막 일 경우 투과능성이 높아지는 것으로 나타났다(Fig. 7).

Table 5. The weight, thickness, porosity by materials

시료 번호	멤브레인 소재	중량 (g/m ²)	두께 (μm)	기공 특성
1	소수성 100 PU	320	10~15	무공성
2	친수성 80 PU-M	314	10~15	무공성
3	친수성 PU 50	316	10~15	무공성
4	친수성 80 PU-P	328	10~15	무공성
5	PTFE + PU(무공)	301	20	무공성 (편발수)
6	PVDF	330	15	유공성
7	PVDF + PU	299	50	무공성
8	PTFE	311	30	유공성
9	PTFE + PU	294	25	유공성
10	PVA + Nano PU	301	35	유공성
11	PVA + ePTFE + Nano PU	372	45	무공성
12	PVA + 유공 PU + Nano PU	350	50	무공성
13	Nafion 117	-	180	무공성

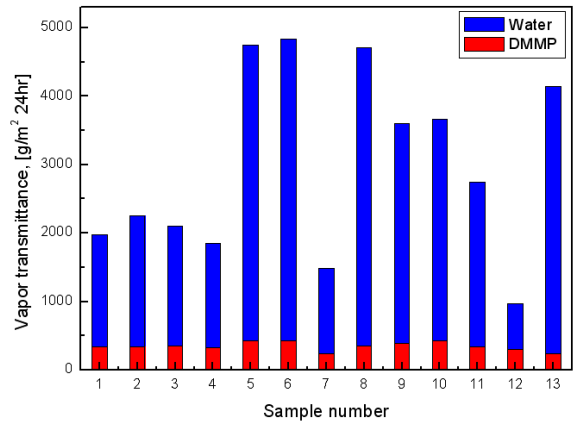


Fig. 7. The water vapor and DMMP transmittance by membrane types

Fig. 7에서 두께가 증가할수록 모의 작용제의 투과율이 낮다는 것에 착안하여, 소재를 PU로 국한하고 두께별로 수증기 및 DMMP 투과율, 그리고 실작용제의 투과량을 측정하였다. Table 6에 결과에 나타난 바와 같이, PU 재질의 선택투과막은 두께가 증가할수록 수증기 투과율, DMMP 투과율 및 실작용제의 투과량은 감

소한다. 하지만 Nafion의 경우 두께가 뚜렷하게 높음에도 불구하고, 수증기 투과량은 높고 HD 작용제 방호 성능은 목표치(4.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)에 거의 도달하고 있다. 이와 같이 소재의 두께를 계속 증가시킬 경우 방호 성능의 목표치는 구현할 수 있겠으나, 수분이 투과하지 못해 열적피로도를 심각하게 야기시킬 수 있기 때문에 두께의 증대는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 Nafion과 같이 고분자의 구조적인 설계를 통해 작용제의 이동을 막고, 숄폰기와 같은 친수성작용기를 도입시켜 수분의 이동을 용이하게 해야만 화생방보호에 적용이 가능한 선택투과막이 만들어질 것으로 판단된다.

Table 6. The permeability test results by materials

구분	두께 [μm]	투과율 [$\text{g}/\text{m}^2 \text{ day}$]		실작용제 투과량 [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]	
		수증기	DMMP	HD	GD
	100	2,240	187	400	300 \uparrow
	150	1,599	163	297	200 \uparrow
Nafion	180	4,143	238	5~10	-

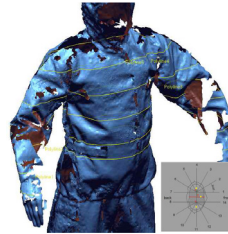
다. 보호의 형상 설계

보호의 선택의 기본요건 중 중량/착용성, 치밀성/이동성, 크기, 형태는 보호의의 디자인과 깊은 관련이 있다. 관련문헌⁴⁾에 의하면 검증된 소재로 보호의를 제작한다 하더라도 디자인에 따라 활동 시 Bellow effect가 발생하기 때문에 방호 성능의 저하를 초래할 수 있으며, 내부의 공기층이 클 경우 열적피로도가 가중된다. 특히 미래병사체계에서는 방호 성능의 최적화, 주변 장비와의 간섭배제, 열적피로도 저감이 동시에 고려되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 3D 스캔을 통해 보호의의 크기를 판단하고, 두건 및 목, 허리부분 등 Bellow effect에 취약한 부분을 보완하기 위한 설계를 진행하였다. 또한 신규 디자인의 열적스트레스 지수를 기존의 보호의와 비교평가 하였다.

Table 7에 나타낸 바와 같은 서로 다른 디자인의 보호의를 착용하고, 디자인별로 내부 공극율을 측정하였다. 공극률은 인체와 의복사이의 거리를 계측함으로써 각각의 디자인별로 내부 공간을 추론할 수 있다. Table 8에 나타낸 것과 같이 공극률 시험결과 디자인 1(#1, 조임끈이 없는 현용보호의의 형태)에 비해 디자인 2(#2, 허리 및 겨드랑이 조임끈 부착된 신규형상)가 측정부

위에 따라 다르지만 최소 24 %에서 최대 63 %까지 공극이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 7. The body parts of 3D design test



측정 부위	세부항목
Section 1	어깨
Section 2	겨드랑이
Section 3	밑가슴
Section 4	허리벨트위
Section 5	허리벨트 아래

Table 8. The 3D design test results

위치	Section 1		Section 2		Section 3		Section 4		Section 5	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
1	49	35	59	13	55	24	65	17	73	19
2	42	27	48	17	44	23	51	17	62	16
3	54	43	34	22	34	23	26	10	32	25
4	35	45	56	31	61	22	36	18	37	21
5	45	26	64	42	41	42	20	25	14	27
6	51	46	76	19	76	28	39	20	59	35
7	74	48	69	9	77	28	35	3	49	20
8	66	47	70	16	36	23	2	2	33	19
9	63	37	71	23	28	29	30	14	47	28
10	36	24	49	44	43	53	27	22	39	24
11	47	48	49	19	49	34	37	20	30	24
12	48	34	49	13	31	12	24	2	28	18
13	46	38	55	18	30	17	38	11	47	5
14	44	31	50	12	36	20	44	18	43	13
평균	50	38	57	21	46	27	34	14	42	21

또한 디자인의 열적스트레스 지수는 써멀마네킨을 이용하여 평가하였다. Fig. 8에 보이는 바와 같이 보호의 2종(현용보호의, 신규디자인)에 대해 각각 방독면, 보호장갑 및 보호덧신을 써멀마네킨에 장착하고 동일한 환경조건으로 열적스트레스 지수 시험을 실시했다. 시험결과 신규디자인(보호의 재질의 두건 일체형, 조임끈 적용)이 현용보호의(부틸 재질 두건, 조임끈 없음)에 비해 단열성은 9 % 감소하고, 열적스트레스지수는 약 11 % 이상 증가되어 착용성이 향상된 것으로 판단된다(Table 9).



Fig. 8. The photograph of the thermal manikin test for NBC protective clothing

Table 9. The test results of heat stress index test

구분	현용보호의	신규디자인
단열성, [clo]	1.410	1.290
수분투과지수, [im]	0.360	0.370
의류 투습저항, [m ² Pa/W]	0.037	0.032
열적스트레스 지수, [im/clo]	0.256	0.287

3. 결론

화생방보호의 선택시 유기물(화학, 생물학, 산업위험물)에 대한 방호력, 방호내구성, 환경조건, 중량/착용감, 기밀성/이동성, 크기, 형태, 세탁성, 훈련성, 제작비용 등 12가지를 고려해야 한다. 현재 전 세계적으로 활성탄의 흡착성능에 의존하는 보호의가 대부분 보급되어 운용 중에 있으며, 일부 선택성 투과막을 이용한 제품이 적용 중이다.

보호의의 개발 시 소재의 방호성능과 형상에 따른 착용성이 동시에 고려해야한다. 침투성 소재의 경우 외피는 야전에서 위장성을 발휘함과 동시에 액체상의 작용제를 1차적으로 방호하는 역할을 수행함에 따라 액체 발유도, 기공성 등이 중요한 요소로 판단되며, 시스템의 공기투과도는 작용제의 침투속도에 관여한다. 이에 따라 액체 발유도는 외피의 고체임계표면장력 24.5 mN/m 미만, 공기투과도는 39.6 cm/min 이하, 섬유 기공도는 15 μm 이하로 설계하는 것이 바람직하다.

선택성 소재의 경우 분리막의 방호성능과 수증기 투과율의 최적화가 선행되어야만 한다. 따라서 Nafion과

같이 고분자의 구조적인 설계를 통해 작용제의 이동을 막고, 스폰기와 같은 친수성작용기를 도입시켜 수분의 이동을 용이하게 해야만 화생방보호의에 적용이 가능한 선택투과막이 만들어질 것으로 판단된다.

또한 모든 화생방보호의는 Bellow effect를 최소화하고, 운용성을 만족할 수 있는 형상을 개발하는 데 관심을 가져야 한다. 이를 위해 기공도를 최소화 할 수 있도록 허리와 겨드랑이 부분에 조임끈을 설치하여 인체와 최대한 밀착이 될 수 있는 구조로 설계되어야 한다.

그 외 중량, 비용 및 일반 환경에서도 지속적인 성능 유지를 위한 세탁성 등이 최적화 되어야 한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Sarah V. Hart, "Guide for the Selection of Personal Protective Equipment for Emergency First Responders", U.S. Department of Justice, pp. 39~43, 2002.
- [2] Eugene Wilusz, "Material Technology for Chemical/Biological Protective Clothing", Natick Soldier Center, 2002.
- [3] Eugene Wilusz, "Advanced Material Technologies for Lightweight Chemical/Biological Protective Clothing", Natick Soldier Center, 1998.
- [4] John W. Castellani, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics, ICEE, pp. 122~126, 2009.
- [5] Elaina H. Harrison, "Test Results of Air-permeable Saratoga Hammer Suit to Challenge by Chemical Warfare Agents", ECBC-TR-405, 2004.
- [6] Stanley H., "Potential Military Chemical/Biological Agent and Compounds", U.S. Army, pp. II-21~38, 2005.
- [7] Quoc Truong, "Designing Superoleophobic Chemical/Biological Protective Clothing", Natick Soldier Center, 2010.