

화학보호복의 화재위험성 및 화학적 투과시험을 통한 파괴시간산정에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fire Risk Assessment & Calculation Breakthrough Time through Permeation Test of Chemical Protective Clothing

고재선[†] · 박평규*

Jae-Sun Ko[†] · Pyoung-Kyu Park*

대전대학교 소방방재학과, *(주)산청 기술연구소
(2009. 10. 26. 접수/2010. 4. 9. 채택)

요 약

본 연구는 화학보호복 원단들에 대하여 내화학적 및 난연성을 조사하기 위하여 ASTM 및 ISO의 방법을 이용하여 내화학적 및 화재위험성시험을 실시하였다. 시험결과 폴리에틸렌의 경우 전혀 난연성이 없는 것으로 분석되었지만 고무에 데카브롬 등 난연성 물질이 첨가된 불소고무 원단이 뛰어난 난연성을 보였다. 특히 현재 소방용 방열복으로도 사용되고 있는 알루미늄 필름에 아라미드원단을 라미네이팅한 원단이 가장 뛰어난 난연성을 보였다. 하지만 내화학적 있어 알루미늄은 4% NaOH에 부식되는 결과를 보이고 있어 이를 극복하기 위한 방안으로는 다층의 베리어성 필름을 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 아울러 난연성 시험결과 알루미늄필름과 폴리머 베리어성 필름을 소재로 만든 Dual skin과 불소고무에 난연성 물질이 포함된 것을 소재로 만든 Single skin이 화학보호복으로 적합한 것으로 판단된다. 또한 열방호실험과 열전달지수실험결과 두께의 증가와 다층구조일수록 TPP와 HTI 증가하는 것으로 나타났다. 향후 화학보호복 원단의 화재위험성 및 내화학적시험 등 지속적 연구와 보완이 적절한 화학보호복 원단 성능개선에 기여할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

We have test chemical resistance and flame retardant properties of chemical protective clothing Fabrics by the ASTM and ISO standard methods. The flame retardant test results show that polyethylene is poor in flame resistance but fluoroelastomer add to decabrom is excellent in flame resistance. Especially, nowadays heat protective clothing for firefighters, which is aluminized film layers laminated to aramid fabric, show the excellent flame resistance. However, the chemical resistance test results show that aluminium is high corrosive in 4M NaOH solution alone. The problem of corrosion can be overcome by employing multiple barrier film. Also, based on the result of flame retardant test, duel skin of polymer barrier film add to aluminum film and single skin of fluorinated rubber with flame retardant materials seems to be fit for the chemical protective clothing. Also the thermal protection and heat transfer test results show that TPP and HTI is increased assured that the continued study on fire risk assessment & chemical resistance of chemical protective clothing fabrics will contribute to the upgrade the performances of chemical protective clothing fabrics.

Key words : Breakthrough time, Steady state permeation rate, Char distance, Chemical protective fabrics, Flame retardant

[†]E-mail: 119kjs@hanmail.net

1. 서 론

최근 산업의 발달로 인해 많은 유해화학물질의 대량 취급 및 사용량의 증가로 인해 노출 빈도의 증가와 누출시 대형 인명사고가 발생할 가능성이 높아지고 있다. 특히 유해화학물질 누출 및 화재·폭발시 현장 대응 팀인 소방관들에게 인체에 치명적인 피해를 입힐 수 있으므로 이들의 안전을 확보하기 위하여 화학보호복의 원단에 대한 내화학성 및 화열에 대한 화재위험성 연구를 진행하게 되었다. 또한 산업분야에서 작업자들에게도 항상 유해물질에 대한 위험이 잠재하고 있어 주의 및 예방이 필요하며 특히, 안전장비 및 관리시스템이 절실히 요구되고 있다. 환경부 통계자료¹⁾를 이용하여 분석해보면 156개 업소 60종에서 년 간 16,380톤의 화학물질을 제조하여 사용하고 있으며 사용과정에서 사고가 발생할 수 있다고 보고하였다. 따라서 이런 환경에 노출된 작업자와 노출 시 대응 팀인 소방관들의 신체 보호를 위하여 침투성 보호복과 화열에 강한 특수 화학보호복 착용이 절실히 필요시 되고 있다. 또한 2000~2006년까지 국내에서 발생한 화학물질의 사고는 총 311건으로서 2000년 40건, 2001년 26건, 2003년 28건이었지만 2004년부터는 52건, 2005년 53건 2006년 70건으로 증가추세에 있다. 우선 사고발생물질인 화학물질의 종류별 분류로서 톨루엔, 유사휘발유, 황산, 시너, 암모니아, 솔벤트 순으로 사고가 발생한 것으로 분석되었고, 톨루엔 염산, 유사휘발유 등 사고 다발물질에 의한 사고 건수는 전체의 36%를 차지하고 있는 것으로 분석 되었다. 사고발생형태로는 화재, 폭발, 유

출, 누출, 화재 + 폭발, 질식, 유입, 누출 + 폭발, 누출 + 화재, 누출 + 확산 순으로 분석 되었고, 화재사고가 102건으로 전체사고의 약 33%를 차지하고 있어 화열에 대한 주의가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 시설에 따른 사고발생현황을 분석해보면 고정시설 사고는 저장탱크, 제조공정사고를 포함하여 최근 7년간 전체사고의 약 81%(257건)를 차지하고 있고, 이동시설의 사고는 약 19%(62건)로 분석되었다. 따라서 소방관을 비롯하여 특수 환경 분야인 석유화학공장, 유독가스 운반차량 및 유독가스 취급사업장의 종사자들은 유해물질들을 대량으로 저장 및 취급하면서 항상 유독가스 및 잠재적인 화열(열적스트레스)에 대한 위험에 노출되어 있고, 사고 발생 시에 그 영향은 치명적이므로 위험요인이 높다고 할 수 있다. 이러한 특수 환경에 노출된 작업자와 누출 대응시 소방관들을 보호하기 위해 개량된 특수 화학보호복의 개발이 필요하다.

2. 실 험

Table 1은 화학보호복의 화재위험성 및 내화학성평가를 위하여 사용된 시험 장치들의 사양을 나타낸 것이다.

2.1 파과시간 및 농도측정 시험

화학작용제에 의한 저항성 시험 방법은 일반적으로 사용되고 있는 ASTM F 739에²⁾ 따라 Acetone, H₂SO₄, NaOH 및 화학작용제 성능 평가를 수행하였다. 시험에 사용된 원단은 Table 2에 나타내었고 Figure 1은 시험에 사용된 장치이다. 또한 실험에 사용된 전체 원단소

Table 1. Specification of Experimental Apparatus

Test Method	Test Apparatus	Country	Model	Fabric Scale
ASTM F 739	Chemical Permeation Tester	퍼킨엘머 + KNR + pesce lab + 회전과학	Parts Assembleing Make	10 × 10cm
ISO 17492	Thermal Protective Performance Tester	USA Thread Work	Parts Assembleing Make	20 × 20cm
ASTM F 1358	Flammability Tester	USA ATLAS	Mo-7660	75 × 40cm
ISO 5658-2	Flame Propagation Tester	UK FTT	FTT0045	800 × 150 × 50mm ≤
ISO 4589-2	Oxygen Index Tester	UK FTT	FTT0080	140 × 50mm × thickne
ASTM E 662	Smoke Density Tester	UK FTT	FTT0064	75 × 75 × 25mm ≤
ISO 5659-2	FTIR	USA GX	IR100	75 × 75 × 25mm ≤

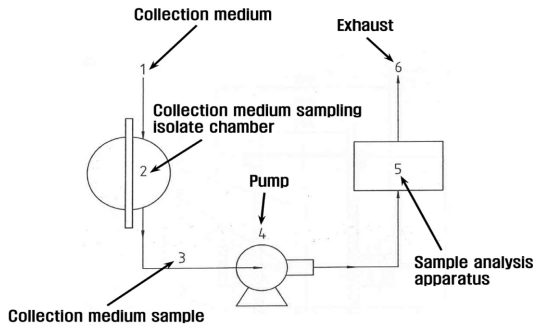


Figure 1. The apparatus of chemical permeation test.

재의 약어는 다음과 같다. AFL: Aluminized film, L사, AFX: Aluminized film, X사, AFS: Aluminized film, S사, GF: Glass fiber, AF: Aluminized film, SPN: Spunlace nonwoven, NPN: Needle punching nonwoven, PB: Polymer barrier, NW: nonwoven, FE: Fluoro-elastomer, Ny: Nylon, IIR: Isobutylene-isoprene rubber, Nomex: Aramid 일종, LDPE: Low density polyethylene, HDPE: Medium density polyethylene을 나타낸다. 화학보호복의 파괴농도측정 시험은²⁾의 세부 시험 방법은 다음과 같다. 먼저 투과셀 중앙에 시험하고자 하는 보호복 원단을 장착한 후, 시험편의 외부표면에 시험 화학물질을 노출시키고, 내부 표면에는 액체 또는 기체 포집매체를 흐르게 하여, 포집매체에 검출된 화학물질의 농도가 파괴농도(Opened-loop test: $0.1\mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$, Closed-loop test: $0.25\mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$)에 도달하는 시간을 측정한다. 원단의 화학작용제 침투저항의 가장 일반적인 지표는 파괴시간(BT, Breakthrough Time)과 정상상태투과율(SSPR, Steady State Permeation Rate)로 보고 있다. 여기서 파괴시간이란 시험화학물질이 화학보호복 시험편 표면에 닿기 시작해서 다른 쪽 면에 규정된 파괴농도로 검출될 때까지 경과된 시간이며, 정상상태 투과율은 침투가 더 이상 진행되지 않는 침투율로서 작을수록 우수함을 의미한다.

각각의 작용제에 대하여 실험조건은 유량, $50 \sim 150\text{mL}/\text{min}$, 교반속도 $50 \sim 150 \pm 5\text{rpm}$, 포집매체(collection medium)로 증류수나 공기를 사용하였다. 본 연구에서는 시료를 통과한 화학작용제의 분석을 위하여 화학작용제의 종류에 따라 UV/Vis 광도계(Rigas Co, Korea)와 Conductivity meter(Orion Co, USA)를 사용하여 분석하였다.

2.2 화학용액투과에 대한 저항성 시험

화학용액투과에 대한 저항성 시험은 파괴농도측정

Table 2. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
Neoprene	Breakthrough Time & Concentration	ASTM F 739
Isobutyl/Lipstop	Breakthrough Time & Concentration	ASTM F 739
PE/Lipstop	Permeation	ASTM F 739
PE/Fluoro/Lipstop	Permeation	ASTM F 739
PE/Lipstop	Permeation	ASTM F 739
PE/Fluoro/Lipstop	Permeation	ASTM F 739

시험에 사용한 방법인 ASTM F739²⁾로 화학보호복의 화학물질 침투성 측정을 실시하였다. Table 2는 화학용액투과에 대한 저항성시험에 사용된 원단소재들의 목록이다.

그 세부시험방법은 보면 다음과 같다. 이 규격은 소재의 표면에 작은 구멍 또는 틈을 통한 화학물질의 통과과정인 투과 능력을 측정하는 것으로 시험원리는 경사진 홈통에 놓여 있는 의류소재의 표면으로 일정 속도의 액체를 흘려보낼 때 시험편에 침투 및 투과되는 양을 측정해서 투과지수를 나타내는 시험방법이다.

$$P = \frac{M_p \times 100}{M_T} \tag{1}$$

여기서,

P: 투과지수

M_p : 흡습지와 보호필름에 스며들어 있는 시험 용액의 무게(g)

M_R : 비커에 모아진 시험용액의 무게(g)

M_T : 시험편에 공급된 시험용액의 무게(g)

이다.

2.3 ISO 17492의 실험방법

열 방호성능과 열전달지수 비교를 위한 방법으로는 TPI(Thermal Protection Index)를 이용한 ISO 17492의 방법³⁾을 사용한 것이다. Heat Flux는 $80 \pm 2\text{kw}/\text{m}^2$ 를 제공하여 원단내부온도가 $T_{12}(12^\circ\text{C})$ 와 $T_{24}(24^\circ\text{C})$ 일 때 시간을 측정하는 방법이며, HTI는 다음과 같은 식으로 표현 된다.

$$\text{HTI}_x = F \times t_x \tag{2}$$

Table 3. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
AF/GF Trellechem	Heat Protective/ HTI	ISO 17492
AF/GF Xcape CO.	Heat Protective/ HTI	ISO 17492
IIR + Fluoro rubber/ aramid	Heat Protective/ HTI	ISO 17492
AF/GF	Heat Protective/ HTI	ISO 17492
AF/SLN	Heat Protective/ HTI	ISO 17492
AF/NPN	Heat Protective/ HTI	ISO 17492

여기서, HTI: Heat-transfer Index($\text{kw} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)

F: Exposure Heat Flux(kw/m^2)

t_x : Heat-transfer Time, 12°C와 24°C일 때 시간

을 말한다.

Table 3은 열방호 및 열전달지수시험에 사용된 원단 소재들의 목록을 나타낸 것이다.

2.4 ASTM F 1358의 실험방법

난연성실험방법으로 ASTM F 1358방법⁴⁾에 준하여 다음과 같이 진행하였다. 시험편(가로 75cm × 세로 40cm)은 프로판가스버너에 공기를 공급하며 불꽃의 높이가 38mm되게 하고 버너의 꼭대기의 19mm 위에 시료의 접힌 모서리를 위치시키기 위해 시료 홀더 바를 조절한다. 캐비닛의 문을 닫고 시료의 모든 연소가 끝날 때 까지 닫아 놓는다. 3초간 노출시킨 후 시험편에 불이 붙으면 타는 시간, 탄화거리 등을 기록한다. 반면, 시험편에 불이 붙지 않으면 12초간 화염에 노출시킨 후 타는 시간, 탄화거리 등을 기록한다.

Table 4. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
PB/NW/PB	Flame Retardant	ASTMF 1358
FE/PE	Flame Retardant	ASTMF 1358
IIR/Lipstop	Flame Retardant	ASTMF 1358
Ny/IIR/Ny	Flame Retardant	ASTMF 1358
PE/Ny	Flame Retardant	ASTMF 1358
PE/Nomex	Flame Retardant	ASTMF 1358
Al/Nomex	Flame Retardant	ASTMF 1358

한국화재소방학회 논문지, 제24권 제2호, 2010년

Table 5. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
LDPE/Nylon/MDPE	Flame Propagation	ISO 5658-2
MDPE/LDPE	Flame Propagation	ISO 5658-2
IIR/Nylon	Flame Propagation	ISO 5658-2
Nylon/Lipstop	Flame Propagation	ISO 5658-2
Aluminized Film/ Nomex	Flame Propagation	ISO 5658-2

Table 4는 난연성 시험에 사용된 원단소재들의 목록을 나타낸 것이다.

2.5 ISO 5658-2의 실험방법

ISO 5658-2⁵⁾를 이용한 화염전파실험은 화재복사열에 노출되었을 때 연소거동을 평가하는 방법으로 화염전파성 시험 장치는 평균 연소지속열(실험체가 초기 화염에 노출된 후 불꽃선단이 50mm 간격의 전파거리 간격별로 표시된 지점에 도달할 때까지의 걸리는 시간과 그 위치에 시험 장치에 의해 정해진 열유량을 곱한 값의 평균) 및 소화시 임계복사열유량(실험체 표면에서 화염전파가 진행을 멈추고 꺼진 지점의 입사 열유량)을 측정하는 장치로 메탄가스가 주열원, 아세틸렌가스가 보조열원, 시험체 홀더, 지지대 등으로 구성되어 있다. Table 5는 화염전파시험에 사용된 원단소재들의 목록을 나타낸 것이다.

2.6 ISO 4589-2의 실험방법

산소지수실험을 위해 ISO 4589-2⁶⁾의 실험방법을 사용하였으며 세부방법으로는 산소와 질소가 혼합한 상승 기류 속에서 작화된 물질의 연소를 지속하는데 필요한 최저 산소농도를 측정하여 재료의 상대적인 연소성을 평가하는 방법으로서 시험장치는 연소부, 가스공급부, 측정부 및 점화기로 구성되어 있으며 산소지수량은 다음 계산식에 의해 산출하였다.

$$\text{산소지수량}(\%) = (\text{O}_2 / (\text{O}_2 + \text{N}_2)) \times 100 \quad (3)$$

여기서, O_2 : 산소의 유량(L/min)

N_2 : 질소의 유량(L/min)

이다.

Table 6은 산소지수시험에 사용된 원단소재들의 목

Table 6. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
LPDE/Nylon/MPDE	Oxygen Index	ISO 4589-2
MDPE/LDPE	Oxygen Index	ISO 4589-2
IIR/Nylon	Oxygen Index	ISO 4589-2
Nylon/Lipstop	Oxygen Index	ISO 4589-2
Aluminized Film	Oxygen Index	ISO 4589-2
Flame Retardant Fluoro Elastomer/LDPE	Oxygen Index	ISO 4589-2

를 나타낸 것이다.

2.6 ASTM E 662의 실험방법

연기밀도실험을 위한 ASTM E 662⁷⁾의 실험방법은 광원과 광량감지기 사이에 연기가 통과하는 공간을 두어 연기에 의해서 차단되는 광투과율을 측정하는 방법으로서 연기상자속에 시험체를 설치하고 Non-Flaming mode, Flaming mode에서 연소시 형상으로부터 결정되는 G값과 PM(Photo Multiplier) 마이크로 광도계에 감지되는 투과율 T에 의해서 연기밀도(Ds)를 다음식에 의해 계산한다.

$$Ds = G[\text{Log}10(100/T)] \tag{4}$$

- G: 연기밀도 챔버의 기하학적 요소 = V/AL)
- V: 챔버용적
- A: 시험체면적의 크기
- L: 광선로
- T: PM(photo multiplier)마이크로 광도계 투과율

이다.

또한 맑은 광선(clear beam)투과율 값(Tc)을 사용하여 Dc값을 계산하며, Dm(보정값)은 Dm(corr) = Dm - Dc에 의해 계산한다.

Table 7은 연기밀도시험에 사용된 원단소재들의 목록을 나타낸 것이다.

2.7 ISO 5659-2의 실험방법

독성가스실험은 ISO 5659-2⁸⁾를 적용하였으며, 분석은 FTIR(Fourier Transform Infrared) Spectrometer를 사

Table 7. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
AF/GF	Smoke Density	ASTM E 662
AF/NPN	Smoke Density	ASTM E 662

Table 8. List of Experimental Fabric

Fabric Name	Test Name	Test Method
AF/GF	Toxic Gas	ISO 5659-2
AF/NPN	Toxic Gas	ISO 5659-2

용하였다. 실험방법으로는 연기 발생 장치 내에서 시험체에 복사열 25kw/m²을 가하여 발생되는 연소가스를 FTIR Spectrometer를 사용하여 독성가스를 측정하고 다음 식으로 독성지수를 계산 하였다.

$$\text{독성지수}(R) = \sum_{i=1}^n \frac{C_{\theta i}}{f_{x i}} + \frac{C_{\theta 2}}{f_{x 2}} + \frac{C_{\theta 3}}{f_{x 3}} + \dots + \frac{C_{\theta n}}{f_{x n}} \tag{5}$$

여기서, f_x: 독성가스농도에 30분 노출시 치사 농도(g/m³)

C_θ: FT-IR spectrometer에 측정된 독성가스(g/m³)

여기서, 1, 2, 3, ...n: 각 독성가스

이다.

Table 8은 독성가스시험에 사용된 원단소재들의 목록을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화학보호복의 파괴시간 및 농도측정 시험

네오프렌은 단독으로 사용시 침투제로 아세톤에 대해 UV monitor 270nm로 분석한 결과 내화학성이 약 9분 정도로 매우 빨리 파괴되었으며 Figure 2에 나타난 바와 같이 유량이 증가하므로 NBT(Normal Break-through Time)는 거의 8.9~9.2분을 나타냈으며, SSPR(Steady State Permeation Rate)은 증가하는 경향을 보였다. 이는 유량증가가 확산을 가속화시키는 것으로 보

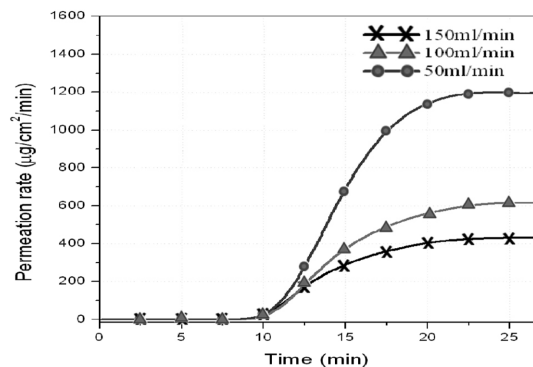


Figure 2. Behavior of permeation according to various flow rate.

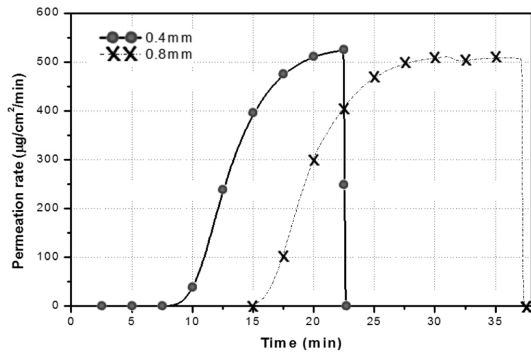


Figure 3. Behavior of permeation according to various thickness.

이며 아울러 유량증가에 따라 투과율은 감소하는 경향을 보였다. 이는 Mellstrom¹¹⁾ 등이 보고한 결과인 유량증가가 BT에 영향을 주지 못하며 이에 따라 SSPR의 증가도 없다고 한 결과와 일치되는 것이다. 일반적으로 유량변화는 포집매체 내에 균일한 상태를 만들어 주는 역할을 할 뿐만 아니라, 유량증가는 파과검출 할 수 있는 분석기기의 민감도를 낮추는 결과를 가져온다.

Figure 3에서 나타난 바와 같이 원단 두께 0.4mm와 0.8mm로 시험을 진행한 결과 두께가 두꺼운 쪽이 6분 정도 지연되어 15분경 파과 되어 BT는 증가하였다. 따라서 두께가 증가할수록 저항성은 증가하는 반면, 일반적으로 착용성은 떨어지는 문제점도 있어 향후 이에 대해 여러 인사들을 고려한 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

Figure 4에서 나타난 바와 같이 Lipstop원단에 이소부틸고무도포의 경우를 보면 시험시작부터 원단의 고무부분에 기포가 발생하는 화학반응이 진행되어 20분

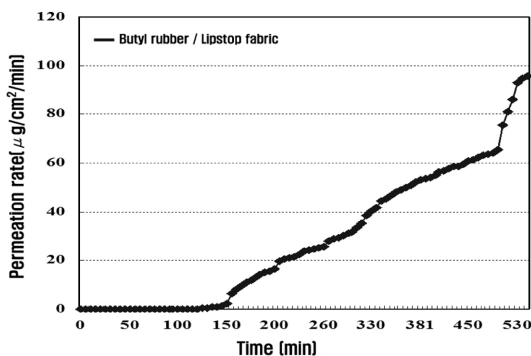


Figure 4. Permeation test according to isobutyl rubber/lipstop fabric.

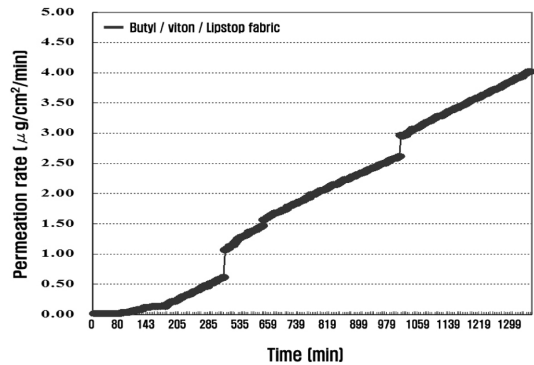


Figure 5. Permeation test according to isobutyl/viton/lipstop fabric.

경과시 챔버 밑 부분부터 밤색으로 색 변화가 나타났으며 100분경과 후에는 시편 전체가 밤색으로 나타났다. 또한 그 이상의 시간에서는 시험화학물질이 급격히 투과되는 것을 볼 수 있었으며, 시편에 붙은 기포는 없었지만 시편 표면이 변색이 되고 돌출하는 용기 현상(Swelling)이 발생하였고, 시편원단이 천공되어 침투되는 현상을 보였다.

이와 같은 현상은 내화학성이 약화되는 현상으로 판단되었다. 파과시간은 116분으로 나타나 이소부틸고무 단독으로 적용시에 유기화학물이 피부를 통하여 인체에 흡수되는 것을 방지하기에 짧은 시간으로 사료되어진다. 따라서 본 결과로 보아 화학보호복은 단층의 원단구조보다는 다층의 원단 구조여야 적합할 것으로 사료되어진다.⁹⁾ 또한 이소부틸/Lipstop에 불화탄화고무를 1회 코팅하여 시험한 결과인 Figure 5를 살펴보면 이소부틸 단독으로 코팅했을 경우보다 파과시간이 148분으로 30분가량 시험화학물질로부터 지연되는 결과를 보였다.

이는 불화탄화고무인 바이톤(Viton, Dupont)이 내화학성이 있는 것으로 보이며 코팅 횟수에 따라 침투성이 달라질 수 있음을 시사한다. 또한 반응시작 후 5분 후에 챌린저 화학물질 챔버의 표면에 기포발생과 밤색으로 변색되어 화학반응이 일어남을 알 수 있었으며 120분쯤엔 시험화학물질의 챔버 상층부에 녹색을 띠었다. 따라서 이 또한 다양한 유기화학물질을 차단하기 위해서는 단층 코팅보다는 다층코팅이 필수적임을 실험 결과 알 수 있었다.

3.2 화학용액투과에 대한 저항성 시험

Figure 2에서와 같이 유량증가에 따라 투과율은 감소하는 경향을 보였고 본 시험에서도 유량증가가 BT

Table 9. Permeation Test of Challenger Chemical

Chemical Substance	Sample	Results		
		Time (min)	Permeation Rate ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Sample Thickness (mm)
H ₂ SO ₄	PE/Lipstop	> 480	0.02	0.28
	PE/Fluoro/Lipstop	> 600	0.02	0.74
NaOH	PE/Lipstop	> 640	0.06	0.28
	PE/Fluoro/Lipstop	> 640	0.07	0.74

에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 이는 H. Anna,¹⁰⁾ Mellstrom¹¹⁾ 등이 보고한 결과인 유량증가가 BT에 영향을 주지 못하므로 SSPR도 증가도 없었다고 발표한 것과도 일치되는 것이다. Table 9는 폴리머(Polymer)필름에 Lipstop과 불화탄화고무를 라미네이팅한 샘플의 내화학성을 파악하기 위해서 97% H₂SO₄와 50%의 NaOH의 투과정도를 조사한 결과로서 약 8~10시간 이상에서도 파괴 되지 않아 유기화합물이 전혀 투과되지 않는 것으로 보여 H₂SO₄와 NaOH의 내화학성이 우수함을 알 수 있었다.

또한 사용된 폴리에틸렌(PE, Polyethylene) 즉 MDPE (Medium Density Polyethylene)의 내화학성이 높은 것을 보였으나 문헌상^{11,12)}에서는 Amyl acetate, Aromatic hydrocarbons, Camphor oil, Chloroform, Gasoline, Fluosilicic acid, Mineral oils, Nitric acid, Turpentine 등과 같은 유기화합물질에는 저항성이 없는 것으로 보고하고 있어 다층 구조를 고려해야 할 것이다.

3.3 ISO 17492에 의한 실험결과

본 실험은 열방호성능 및 열전달지수의 비교를 목적으로 한 것으로 화학보호복은 난연성과 열방호 성능이 중요한 인자로 고려되어지는데 ISO 17492 기준³⁾에 따라 난연성시험을 수행하였다. 그 결과를 살펴보면 알루미늄 필름을 제외한 단독의 SLN(스핀레이스 부직포, Spunlace Nonwoven)의 경우 중량은 110g/m², 두께는 2.2mm이며 이때 TPP(Thermal Protective Performance) 값이 7.1cal/cm²로 측정되었고, NPN(니들펀칭 부직포, Needle Punching Nonwoven)은 SLN과 동일중량이며 두께는 1.0mm로서 이때의 TPP(Thermal Protective Performance)가 9.4cal/cm²의 값을 보였다. 또한 알루미늄 박막필름을 접착한 SLN 및 NPN의 경우 TPP가 10.6cal/cm² 및 11.8cal/cm²로 측정되었다. 부직포상태나 알루

Table 10. Experimental Results by Heat Transfer Index of ISO 17492³⁾

No	T ₁₂ (sec)	Average (s)/HTI (kW · s/m ²)	T ₂₄ (sec)	Average (s)/HTI (kW · s/m ²)	Experimental Material
1	5.8	5.8/464	8.3	8.3/664	AF/GF Trellchem
	5.8		8.2		
	5.8		8.4		
2	3.9	3.9/312	6.3	6.3/504	AF/GF Xcape CO.
	4.4		6.8		
	4		6.6		
3	3.8	3.8/304	5.8	5.8/464	IIR + Fluoro Rubber/ Aramid
	4		5.8		
	4.2		6.2		
4	3.0	3.0/240	5.0	5.0/400	AF/GF
	2.6		4.2		
	3.4		5.2		
5	3.8	3.8/304	6.2	6.2/496	AF/SLN
	4.2		6.6		
	3.6		6.0		
6	6.2	6.2/496	9.4	9.4/752	AF/NPN
	5.4		8.6		
	5.8		9.4		

미늄 박막필름을 붙였을 때 모두 NPN쪽이 열방호성능이 다소 우수하였다. 이러한 결과는 부직포를 기본 베이스로 하고 각각 첨가된 소재의 영향 및 시험에 사용한 원단의 두께 즉 NPN의 두께가 SLN 보다 약 2배 이상 높아 열 차단 능력이 뛰어난 결과로 사료된다. 하지만 일반적으로 유연성은 NPN 보다 SLN이 더 좋은 것으로 나타났으며, 재질이 동일한 경우 두께가 두꺼운 것이 열방호성능이 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.

이의 근거로는 Bengi 등¹¹⁾이 언급한 것처럼 “단층의 원단보다 다층원단이 높은 TPP Rating의 증가를 가져오며” TPP Rating의 증가의 원인으로 원단의 공기투과도(Air Permeability), 중량, Dimensional 등의 변화와 관련 있다고 언급한 내용이 있다. Table 10은 원단별로 HTI(Heat Transfer Index)를 측정된 결과를 나타낸 것으로 측정은 Heat Flux를 사용하여 $80 \pm 2 \text{kw/m}^2$ 의 열원을 제공하여 원단내부온도가 12°C 와 24°C 일 때의 시간을 측정하여 식 (2)로 계산하였다. HTI값은 두께 1.25mm인 AF/NPN가 가장 높았고 두께 0.3mm인 AFL/GF, AFX/GF, AF/SPN 및 AFS/GF 순으로 나타났다. 원단의 이면온도가 12°C 일 때 AF/NPN과 AFL/GF는 큰 차이를 보이지 않았으나 24°C 상승 시 약 1분의 차이를 보였고 HTI값도 AF/NPN이 높았다. 반면, GF의 두께가 감소하는 순서에 따라 AFX/GF와 AFS/GF의 경우가 다소 감소함을 보였다. 또한 Table 10을 살펴보면 시편 1~6번까지 각각 3회 실험하여 평균시간과 그에 대한 HTI평균값을 산정한 것으로서 시편 1의 경우

는 T_{12} 일 때 평균시간은 5.8초 및 그에 대한 HTI는 $464 \text{kw} \cdot \text{s/m}^2$ 이었으며, T_{24} 일 경우는 평균시간이 8.3초 및 HTI는 $664 \text{kw} \cdot \text{s/m}^2$ 이었다. 시편 3의 경우는 T_{12} 일 때 평균시간은 3.8초, HTI는 $304 \text{kw} \cdot \text{s/m}^2$ 이었으며, T_{24} 일 경우는 평균시간 5.8초, HTI는 $464 \text{kw} \cdot \text{s/m}^2$ 이었다. 시편 6의 경우는 T_{12} 일 경우 평균시간 6.2초, HTI는 $496 \text{kw} \cdot \text{s/m}^2$, T_{24} 일 경우는 평균시간 9.4초, HTI는 $752 \text{kw} \cdot \text{s/m}^2$ 이었다.

3.4 ASTM F 1358에 의한 시험결과

화확보호복 원단의 난연성여부는 ASTM F 1358방법 및 기준⁴⁾을 사용하였고, 이에 따른 난연성의 기준은 “3초 이내에 스스로 소화성을 가져야하고 12초 노출 시 탄화거리가 100mm 이하를 보여야한다”라고 기술되어 있다.

시험결과인 Table 11을 살펴보면 난연성이 있는 것은 시편 2와 7이다. 시편 2의 경우는 난연 처리된 불소고무에 플라스틱필름을 라미네이팅한 원단으로 Post Ignition은 3초, 탄화길이는 20mm, 탄화거동은 녹거나 떨어짐이 없어서 시험기준에 합격이었다. 아리미드직물에 알루미늄 코팅처리된 시편 5의 경우는 Post Ignition은 1초, 탄화거리 10mm, 탄화거동은 합격이었다. 반면, 난연 처리되지 않은 Lipstop 위에 IIR코팅 처리된 원단의 경우 3초 노출 후 계속 타는 경향을 보여 고무로 코팅된 원단에 난연제를 부여해야함을 알 수 있었다. 특히 시편 1의 경우 3초 노출시 계속 타는 결과와 탄화거리가 200mm를 보여 난연성을 확보하기

Table 11. Experimental Calculation Results by ASTM F 1358⁴⁾

Classification	1	2	3	4	5	6	7
Experimental Material	PB/NW/PB	FE/PE	IIR/Lipstop	Ny/IIR/Ny	PE/Ny	PE/Nomex	Al/Nomex
Post Ignition (sec)	9	3	9	9	9	9	1
Char Distance (mm)	200	20	120	200	200	200	10
Char Behavior	Fail	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Pass

Table 12. Experimental Results of Fire Spread Test of Flame

Experimental Substances	Average for Sustained Burning (Q_{sb} , MJ/m^2)	Critical Flux at Extinguishant (CFE, Kw/m^2)	Extent of Burn [mm]
LDPE/Nylon/MDPE	0.248	1.5	750
MDPE/LDPE	0.417	2.8	670
IIR/Nylon	0.173	1.0 이하	800
Nylon/Lipstop	0.216	2.5	700
Aluminized Film/Nomex	7.6	25.9	348

위해서는 겹옷(Cover garment)형태의 알루미늄에 코팅된 원단이 필수적으로 요구된다. 또한, 이중겹감(Dual skin)으로는 알루미늄필름 층과 폴리머 베리어성 필름이 가장 좋은 것으로 보이며 단일겹감(Single skin)으로는 FKM(Viton Co, Dupont)에 난연성물질이 포함된 원단이 적합할 것으로 사료된다.

3.5 ISO 5658-2 실험방법에 의한 결과

화염전파실험의 방법으로서 평균연소지속열이 클수록 화염전파 속도가 느리고 소화점 임계복사 열류량은 값이 클수록 난연성이 우수함을 나타낸다. 소화점 임계열류량은 연소거리로 표현할 수도 있으며 이때 난연성이 클수록 연소거리가 작게 나타난다. Table 12의 시험결과에 의하면 알루미늄나이지드 필름의 경우 우수한 난연성을 보여 주었고, IIR/Nylon의 경우가 화염전파 속도가 빠르고 난연성이 취약한 것으로 평가되었다.

3.6 ISO 4589-2의 실험방법에 의한 결과

실험결과인 Table 13을 보면 첫째, 둘째, 셋째 번의 원단은 난연성이 부족하여 난연재료로 분류하기 어려움이 있었다. 그러나 실험결과 알루미늄나이지드 필름의 난연성이 가장 우수한 것으로 분석되었다. 또한 난연 불소고무/PE의 경우는 23.6% 산소농도 조건에서 불소고무는 연소하지 않았으나 PE 필름면은 연소가 진행되었다.

3.7 ASTM E 662의 실험방법에 의한 결과

화학보호복 소재의 발연성 및 복사열 노출시 발생되

는 연소가스를 측정하여 그 결과를 Table 14에 나타내었다.

복사열량이 25kw/m² 일 때 분석된 결과는 AF/GF와 AF/NPN 모두 기준치 이하를 보였고 시험소재 두 가지를 상대적으로 비교 하였을 때 AF/NPN이 AF/GF보다 2배 많은 연기밀도가 발생하였다.

3.8 ISO 5659-2의 실험방법에 의한 결과

ISO 5659-2⁸⁾ 연기발생장치 내에서 실험체에 복사열 50kw/m²을 가하여 발생되는 연소가스를 FT-IR(Fourier Transform Infrared) spectrometer를 사용하여 분석한 결과인 Table 15에서 CO가 가장 높은 수치를 보였고 NOx, HCl 및 HCN 순서로 발생됨을 확인하였다. 특히,

Table 14. Experimental Results of Specific Optical Density of Smoke

	Radiation Heat	25kw/m ²	Baseline Value
AF/GF	Mean value (D _m)e of the maximum specific optical density of smoke (D _s)	26.7	① 격벽, 천정, 내장재 < 200 ② 1차 갑판 피복재 < 400 ③ 표면 바닥재 < 500 ④ 플라스틱관 및 전선 < 400
AF/NPN		56.2	

Table 15. The Lethal Concentration Result which Follows in the Substance (f_x)

Adiation Heat (50kw/m ²)	Gas Concentration (ppm)		Baseline Value	Fatal Concentration (g/m ³)	
	AF/GF	AF/NPN			
Gas Item	CO	80.9	372.1	≤ 1,450	280
	HBr	0	0	≤ 600	29
	HCN	0.9	3.2	≤ 140	11
	HCl	7.7	7.3	≤ 600	15
	HF	0	0	≤ 600	4.9
	NO _x	15.7	14.9	≤ 350	7.6
	SO ₂	0	0	≤ 120	53

Table 13. Experimental Results of Limiting Oxygen Index

Experimental Substances	Oxygen Index
LPDE/Nylon/MPDE	19.2
MDPE/LDPE	19.9
IIR/Nylon	19.1
Nylon/Lipstop	21.4
Aluminized Film	27.3
Flame Retardant Fluoro Elastomer/LDPE	23.6

Table 16. Toxic Index of Combustion Gases at Carbonization (f_x)

Classification	CO	HBr	HCN	HCL	HF	NOX	SOX	Toxic Index (R)
AF/GF	0.30	0	0.08	0.51	0	2.10	0	2.99
AF/NPN	1.34	0	0.29	0.49	0	1.96	0	4.08

AF/NPN은 CO가 AF/GF에 비해 4.6배로 높은 수치를 보였다. 이는 GF는 무기물질인 반면, NPN은 방향족고리사이에 직접 붙은 아미드 결합으로 유기물질로서 분자 내에 탄소, 수소, 산소, 질소가 포함된 폴리머로 연소 시 불완전연소 등에 기인한다고 본다. Table 16의 독성가스 실험결과인 Toxic Index(R)는 Table 15의 각 독성가스농도에 30분 노출 시의 치사농도(f_s)를 이용하여 식 (5)에 의해 계산된 결과이다.

4. 결 론

이상과 같은 시험결과를 종합적으로 판단한 결과 폴리에틸렌계의 플라스틱타입의 원단 모두 불에 노출되었을 때 타는 현상을 보여 전혀 난연성이 없는 것으로 분석되었고, 고무류도 타는 현상을 보이고 있지만 30~40%의 데카트롬이 포함된 불소고무는 난연성이 있는 것으로 분석되었다. 하지만 난연제인 데카브롬등을 폐기할 때 문제점이 있어 이의 개선을 위한 연구가 좀 더 있어야 할 것으로 판단된다. 특히 현재 소방용 방열복으로도 사용되고 있는 알루미늄 필름에 아라미드 원단을 라미네이팅한 원단이 가장 뛰어난 난연성을 보였지만, 내화학성에 있어 알루미늄은 4% NaOH에 부식되는 결과를 보이고 있어 이를 극복하기 위한 방안으로는 다층의 베리어성 필름을 사용하는 것이 필수적이다 할 수 있겠다. 또한 이중겔감(Dual skin)으로는 알루미늄필름과 폴리머 베리어성 필름이 난연성 측면에서도 가장 좋은 것으로 보이며 단일겔감(Single skin)으로는 불소고무에 난연성물질이 포함된 원단이 적합할 것으로 사료된다. 향후 화학보호복의 화재위험성 및 내화학성에 관한 지속적 연구와 보완이 적절한 화학보호복 원단소재의 성능개선에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 환경부, 유해화학물질사고통계, 국립환경과학원(2006).

2. ASTM F 739-99a, "Standard Test Method for Resistance of Protective Clothing Materials to Permeation by Liquids or Gases Under Conditions of Continuous Contact"(1999).
3. ISO 17492, "Clothing for Protection Against Heat and Flame-Determination of Heat Transmission on Exposure to Both Flame and Radiant Heat"(2003).
4. ASTM F 1358, "Standard Test Method for Effects of Flame Impingement on Materials Used in Protective Clothing Not Designated Primarily for Flame Resistance"(2005).
5. ISO 5658-2, "Reaction to Fire Tests. Spread of flame. Lateral Spread on Building Products in Vertical Configuration"(1996).
6. ISO 4589-2, "Plastics. Determination of Burning Behaviour by Oxygen Index. Ambient-Temperature Test"(1999).
7. ASTM E 662, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials"(2009).
8. ISO 5659-2, "Title Identifier, Plastics. Smoke generation. Determination of Optical Density by a Single Chamber Test"(1999).
9. DuPont: Permeation Guide for Dupont Tychem & Dupont Stasafe Protective Fabrics; DuPont Suit Smart: Interactive Tool for The Selection of Protective Apparel. DuPont. Wilmington, DE(1999).
10. D.H. Anna, E.T. Zellers, and R. Sulewsk, "ASTM F 739 Method for Testing the Permeation Resistance of Protective Clothing Materials: Critical Analysis with Proposed Changes in Procedure and Test-cell Design", American Industrial Hygienists Association of Journal, Vol.5, pp.547-556(1998).
11. G.A. Mellstrm, L. Landersjand, and A.S. Boman, "Permeation and Destructive Effects of Disinfectants on Protective Gloves", Contact Dermatitis, Vol.26, pp.163-170(1992).