

산업 현장에서 착용하는 화염 및 열 저항성 의복의 최신 동향 및 평가 방법



홍석민

- 2012 송실대학교 유기신소재파이버공학과 학사
- 2024-현재. COSD 섬유분야 기술위원
- 2024-현재. COSD 가족(TC120/IULTCS) 전문위원
- 2012-현재. (재)FITI시험연구원 역학성능 평가팀 팀장



김창성

- 2014. 단국대학교 파이버시스템공학과 학사
- 2013-현재. (재)FITI시험연구원 역학성능 평가팀 선임연구원



김지수

- 2019. 한양대학교 유기나노공학과 학사
- 2021. 한양대학교 유기나노공학과 석사
- 2021-현재. (재)FITI시험연구원 역학성능 평가팀 주임연구원



심연제

- 2020. 숙명여자대학교 의류학과 학사
- 2023. 숙명여자대학교 의류학과 석사
- 2024-현재. (재)FITI시험연구원 역학성능 평가팀 주임연구원

1. 서 론

최근 몇 년간 보호복 안전 규제 및 기준을 제시하는 주요기관(KOSHA¹⁾, OSHA²⁾ 등에서 산업안전 규제를 강화하고 작업 환경의 위험 요소를 최소화하기 위한 기술 발전을 촉진하도록 장려하고 있다. 특히 화염 또는 불꽃이나 고열에 노출되는 산업 현장에서 작업자를 보호하기 위한 의복의 중요성이 점점 더 부각되고 있으며, 이러한 의복은 화재나 고온과 같은 극한 환경에서 작업자의 안전을 지키는 중요한 역할을 하고 있다. 전 세계적으로 보호복 분야의 소재와 기술의 혁신이 지속적으로 이루어지고 있으며, 다양한 산업 분야에 적용을 통해 효율성과 기능성이 개선되고 있다. 국제적으로는 고성능 섬유 및 다층 구조의 보호복 기술 발전을 통해 작업자의 쾌적성과 보호 기능을 동시에 강화하고 있으며, 국내에서도 이러한 국제 동향을 반영하여 화염 및 열 저항성 의복 기술 개발과 적용이 확대되고 있다.

특히 다양한 산업 분야에서 안전 기준을 강화하고, 최신 섬유 기술을 적극적으로 도입하고 있어 보호복 분야의 발전이 더욱 기대되고 있다. 화염 및 열 저항성 의복의 최신 기술 동향과 함께 보호복 분야에서 사용되는 다양한 소재 및 완제품 상태에서의 성능 평가 방법과 최신 연구 개발 동향을 분석하여 향후 기술 발전 방향과 산업의 요구를 예측할 필요가 있다.

¹⁾ 한국산업안전보건공단(Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA) : 근로자 안전을 보장하기 위한 안전 및 보건 기준을 설정

²⁾ 산업안전보건국(Occupational Safety and Health Administration, OSHA) : 미국 노동부 산하의 연방 기관으로, 근로자의 안전과 건강을 보호하기 위해 다양한 규제를 마련하고 시행

Table 1. 국내·외 보호복 시장의 주요 동향 비교[1~4]

구 분	국내	국외
산업안전 규제	산업안전보건법 강화로 보호복 사용 필수화, 열 및 불꽃 차단 보호복 수요 증가.	해외 표준(ISO, ANSI, NFPA 등)에 부합되는 보호 복 사용 강조, NFPA 2112, ISO 11612 등의 표준 준수.
기술발전	아라미드 섬유 등 고성능 소재 활용, 착용자의 편의 성을 고려한 제품 개선.	나노기술, 스마트 섬유, 고성 능 섬유 등 혁신 기술 사용. 스마트 보호복은 센서를 내장 해 온도 변화나 화학물질 노 출 실시간 모니터링 가능.
시장수요 증가	제조업, 건설업, 소방업 등에서 보호복 수요 증가. 대형 화재 사건으로 불꽃 차단 보호복에 대한 관심 증가.	석유 및 가스, 화학, 전기, 자동차, 항공 등 다양한 산업 에서 보호복 수요 증가. 아시 아, 중동 등의 신흥 시장에서 수요 급증.
환경 친화적 제품	친환경 소재를 사용한 보 호복 개발 증가. 재활용 가능 소재와 생분해성 소 재 활용.	글로벌 기업들은 지속 가능 성에 초점을 맞춘 제품 개 발. 친환경 소재와 기술을 활용한 보호복 시장 성장.
경제 및 협력	국내 제조업체들은 아시 아 시장으로의 진출을 모 색. 품질 인증을 통해 글 로벌 시장에서도 경쟁력 확보.	글로벌 기업들은 현지화 전 략을 통해 각국의 규제와 시 장 요구에 부합하는 제품 제 공. 글로벌 유통망을 활용해 신흥 시장에 빠르게 진출.

2. 화염 및 열 저항성 의복의 정책 및 산업 동향

2.1. 정책, 인증 및 규제 현황

2.1.1. 국내·외 보호복 관련 정책 추진 동향

화염 및 열 저항성 의복은 시대에 따라 크게 변화해 왔으며, 시기마다 중요한 기술적, 규제적 변화가 있었다.

국외의 경우, 1960년대 초반에는 석유 및 가스 산업에서 사
용할 수 있는 산업용 방염복이 개발되었다. 이 시기에는 주로
방염제를 첨가한 소재가 사용되었으며, 1960년대 후반에는 아
라미드 섬유가 상용화되어 처음으로 군복에 아라미드 섬유
(Nomex®)가 도입되었다. 이러한 기술적 진보로 아라미드 섬유
는 높은 강도와 내열성을 바탕으로 군용 방탄복과 소방용 의
복에서 산업용 방염복까지 다양한 분야에서 안전을 보장하는
데 적용되기 시작했다[5].

1970년대와 1980년대에 이르러 NFPA(National Fire Protection

Association)와 같은 기관들이 방염복의 성능 기준을 제시
하기 시작하였으며, 이 시기에는 아라미드 섬유 외에도
PBI(polybenzimidazole) 및 PBO(poly(p-phenylene benzobisoxa-
zole))와 같은 고성능 방염 소재가 개발되었다. 이러한 소재는
높은 열 저항성과 낮은 연소성을 특성으로 하여 소방 및 산업
안전에 크게 기여했다[6]. 1990년대와 2000년대 초반에는 새
로운 합성섬유(Basofil®, Kermel® 등)의 등장과 후처리 공정으
로 인해 방염복이 경량화되었으며, 착용감 또한 개선되었다
[7]. 이로 인해 장시간 착용으로 인한 불편함이 감소하였으며,
결과적으로 작업 효율성이 향상되었다.

2010년대 이후에는 지속 가능한 친환경 소재를 사용한
방염복 개발이 활발해졌다. 최근에는 바이오 기반 섬유인
PLA(polylactic acid)와 그래핀 산화물 복합재를 활용한 방염복
개발이 진행되었고, 이는 환경을 보호하면서 동시에 작업자의
안전을 지키는 것을 목표로 하고 있다. 스마트 텍스타일 기술
이 도입되어 온도 변화에 반응하는 소재와 IoT 기술이 결합된
보호복이 등장하여 더욱 정교한 보호 기능을 제공하게 되었다
[8]. 또한, 보호 성능을 유지하면서도 경량화된 소재와 인체 공
학적 디자인을 적용하여 착용감과 이동성 개선에 관심이 집중
되고 지속 가능한 환경 친화적인 소재 개발에도 관심이 높아
지면서 친환경 보호복도 주목받고 있다.

국내의 경우, 초기에는 해외 기술을 참고하여 국내 산업에
적용하기 시작했으며, 주로 천연 섬유를 사용한 단순한 의복
이 대부분으로 보호 성능이 제한적이었다. 면과 울 같은 천연
섬유는 기본적인 보호 기능은 제공했지만, 화염 및 열 저항성
면에서 한계가 있었으며, 이 시기의 보호복은 단일 층 구조로
제작되어 극한 환경에서의 보호 성능이 충분하지 않았다.

1970년대에서 1990년대에 걸쳐 합성 섬유가 도입되면서 보
호복 기술은 크게 발전하였다. 화학적 방염 처리 또는 코팅한
나일론, 폴리에스터 등의 합성 섬유는 천연 섬유에 처리를 한
것보다 뛰어난 내열성과 강도를 제공하여, 보호 성능을 향상
시켰다. 이 시기에 다양한 레이어를 결합한 다층 구조의 보호
복이 등장하여 화염 및 열 저항성이 강화되었다.

2000년대 이후, 보호복 기술은 더욱 발달되었다. 아라미드,
PBI, 카본 섬유, 모다크릴(modacrylic) 등 고성능 섬유가 도입
및 사용되면서 보호복의 내구성과 내열성이 크게 향상되었다.
또한 특정 산업에 맞춘 전문 보호복이 개발되기 시작했는데,
소방복과 아크 플래시 보호복 등이 그 예이다.

이러한 시대적 변화는 각 국가별 정책 추진 동향과도 밀접
하게 연결되어 있다. 미국에서는 OSHA(Occupational Safety

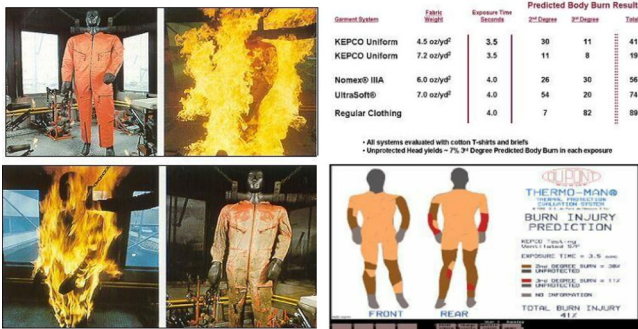


Figure 1. (좌) 한국전력공사, DuPont™ Thermo-Man® 시험 과정, 2022, (우) 시험결과.
(출처 : 한국전력 방염복의 품질향상에 관한 연구, 2007. www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=182)

and Health Administration)와 NFPA(National Fire Protection Association) 등을 통해 화염 및 열 저항성 의복에 대한 엄격한 규제를 시행하고 있다. NFPA 2112와 같은 표준이 보호복의 성능 요건을 명확히 규정하고 있으며, 이를 준수하지 않을 경우 법적 제재를 받을 수 있다. 이러한 규제는 보호복의 품질과 안전성을 높이는 데 기여하고 있다.

유럽연합(EU)에서 CE(Conformité Européenne) 인증은 EN ISO 11612 및 EN ISO 14446 등과 같은 표준을 통해 보호복의 성능과 안전성을 규제하고 있으며, REACH(Registration, Evaluation, Authorisation, and Restriction of Chemicals) 규정을 통해 화학물질 사용에 대한 엄격한 관리를 실시하여 친환경 소재 개발을 촉진하고 있다[9]. 이러한 규제와 표준은 유럽에서 보호복의 안전성과 지속 가능성을 강화하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

국내 고용노동부와 한국산업안전보건공단(KOSHA)은 보호복의 성능 기준과 안전성을 평가하고 이를 준수하는 제품은 KCs 인증 마크를 부여하여 시장에 유통되도록 관리하고 산업안전보건법을 통해 보호복의 착용을 의무화하고 있으며, 고위험 산업군에 대한 엄격한 규정을 적용하고 있다. 최근에는 스마트 보호복과 친환경 소재 개발을 위한 정부의 지원 프로그램이 확대되고 있으며, 개발된 기술을 통해 글로벌 시장에서의 경쟁력을 우위를 차지하고 있다.

이와 같이 화염 및 열 저항성 의복의 기술적 발전은 국내외 강력한 정책과 규제 속에서 이루어지고 있다. 각국의 정책은 보호복의 품질과 안전성을 보장하는 데 중요한 역할을 하며, 산업 현장에서 작업자의 안전을 극대화하는 데 기여하고 있다. 앞으로도 이러한 정책적 지원과 기술적 발전은 지속될 것으로 기대된다.

2.1.2. 보호복 분야 경제 활성화를 통한 각 국가별 전략

미국은 고성능 보호복의 연구개발에 막대한 투자를 진행하고 있다. 연간 약 5억 달러 이상의 예산이 정부와 민간 부문에서 공동으로 투자되고 있으며, 이를 통해 첨단 소재와 스마트 기술을 적용한 보호복 개발이 촉진되고 있다. 엄격한 규제와 인증 제도를 통해 보호복의 품질이 세계적으로 인정받고 있으며, 이러한 규제와 인증 제도는 미국 보호복의 신뢰성을 높이는 중요한 요소이다. 또한, 보호복의 수출을 장려하고 글로벌 시장에서의 경쟁력을 강화하기 위해 다양한 무역 협정과 마케팅 전략을 펼치고 있다. 미국 보호복 산업은 전 세계 보호복 시장의 약 30%를 차지하고 있으며, 연간 약 20억 달러 이상의 수출액을 기록하고 있다. 한편, COVID-19 팬데믹 동안 공급망의 취약성을 극복하고자 자국 내 제조업체의 개인 보호 장비 PPE(personal protective equipment) 생산을 늘려 외국 의존도를 줄이는 것을 목표로 하고 있다[10]. 또한, 스마트 공장과 4차 산업혁명 기술을 도입하여 제조업 생태계를 현대화하고, 이를 통해 더 많은 고임금 기술 일자리를 창출하고 있다. 미국은 이와 같은 전략으로 보호복 산업의 성장을 촉진하고, 글로벌 시장에서의 경쟁력을 강화하고 있다[11].



Figure 2. (좌) Digital Product Passport 데이터 유형의 예, (우) Horizon 2020 대표 이미지.
(출처: (좌) What data goes into a digital product passport, Circularise, 2023, www.circularise.com/blogs/data-in-a-dpp, (우) Horizon 2020 마지막 해 예산안 발표, KERC, 2019. www.k-erc.eu/2019/06/europe-trends/3139)

유럽은 REACH 규정을 통해 친환경 소재 개발을 장려하고 있으며, 지속 가능한 제조 산업을 구축하고 있다. 유럽 보호복 산업은 연간 약 3억 유로를 친환경 소재 연구에 투자하고 있으며, 이는 유럽 보호복의 차별화된 경쟁력으로 작용하고 있다. 또한, 친환경과 관련한 지속가능성을 실천하고자 DPP(digital product passport)를 도입하여 제품의 수명 연장, 수리 및 재활용을 용이하게 하고, 제품의 투명성을 높이기 위해 노력하고 있다. 이를 통해 소비자들은 더 많은 정보를 얻을 수 있고, 지속 가능한 제품을 선택할 수 있을 것이다[12]. EU는

보호복 혁신을 위한 다양한 연구 프로그램과 자금을 지원하고 있으며, 중소기업들도 혁신적인 보호복을 개발할 수 있는 환경을 조성하기 위해 Horizon 2020 프로그램을 통해 연간 약 2억 유로를 지원하고 있다. 또한, 유럽 내 단일 시장을 활용하여 보호복의 통합적 규제와 표준화를 진행하고 있으며, 이를 통해 생산 비용 절감과 시장 접근성을 향상시키고 있다. 유럽 보호복 산업은 약 15억 유로의 시장 규모를 자랑하며, 이는 전 세계 보호복 시장의 약 25%를 차지하고 있다.



Figure 3. 한국의 보호복 시장 규모 및 전망.
(출처 : South Korea Protective Clothing Market on the Rise : Forecasted Growth and Trends through 2028, RESEARCH AND MARKETS, 2024)

국내에서는 보호복 산업을 전략 산업으로 육성하고 있으며, 이를 위해 다양한 지원 프로그램과 인센티브를 제공하고 있다. 스마트 보호복과 친환경 소재 개발을 위한 연구 지원이 대표적이며, 연간 약 1천억 원 이상의 예산이 투자되고 있다. 대학과 연구 기관, 산업체 간의 협력을 통해 첨단 보호복 기술 개발을 촉진하고 있으며, 연간 약 500억 원의 연구 예산을 산학 협력 프로젝트에 투입하여 기술 혁신과 인력 양성을 동시에 이루고 있다. 또한, 글로벌 시장 진출을 위해 보호복의 국제 인증 취득과 해외 마케팅을 적극 지원하고 있다. 국내 보호복 산업은 연간 약 5억 달러 이상의 수출액을 기록하고 있으며, 이는 전 세계 보호복 시장의 약 10%를 차지하고 있다.

이와 같이 각국은 보호복 산업을 활성화하기 위한 다양한 전략을 추진하고 있으며, 이는 산업 현장에서의 작업자 안전을 극대화하는 동시에 경제적 성장을 도모하는 중요한 역할을 하고 있다. 앞으로도 이러한 정책적 지원과 기술적 발전은 지속될 것으로 기대된다.

2.2. 화염 및 열 저항성 보호복 산업의 시장 규모

글로벌 화염 저항성 섬유 및 의복 시장은 안전에 대한 관심 증가와 정부의 엄격한 작업 안전 규정 강화에 따라 빠르게 성장하고 있다. 주요 응용 분야는 군복, 소방 장비, 산업 안전 장비이다. 주요 업체들은 혁신적인 제품 개발과 시장 확장을 통해 경쟁력을 강화하고 있다. 주요 지역으로는 아시아 태평양, 북미, 유럽이 있으며, 특히 아시아 태평양 지역이 빠른 성장세를 보일 것으로 예상된다.

Flame Resistant Clothing Market 보고서에 따르면, 세계 화염 저항성 의복 시장은 2021년에 약 20억 6,650만 달러 규모였으며, 2031년까지 약 30억 3,926만 달러에 이를 것으로 예상된다. 2021년부터 2031년까지 연평균 성장률은 3.9%를 기록할 것으로 전망된다. 북미와 유럽 시장이 전체의 약 55%를 차지하고 있으며, 아시아 태평양 지역은 빠른 산업화와 안전 규제 강화로 인해 가장 빠르게 성장하는 시장 중 하나로 부상하고 있다. 한국의 보호복 시장 규모는 약 1조 원으로, 세계 시장의 약 1.1%를 차지하고 있다[13].

Grand View Research에 따르면, 글로벌 화염 저항성 섬유 시장은 2023년에 약 49억 1천만 달러로 평가되었으며, 2024년에는 약 51억 1천만 달러로 성장할 것으로 예상된다. 2024년부터 2030년까지 연평균 성장률 5.1%를 기록하여, 2030년에는 약 68억 9천만 달러에 이를 것으로 전망하고 있다[14].

시장 성장의 주요 요인으로는 산업 안전 규제 강화, 고성능 소재 개발, 친환경 보호복 수요 증가가 있다. 주요 업체로는 Honeywell, DuPont, Bulwark 등이 있으며, 이들은 혁신적인 제품 개발과 시장 확장을 위해 지속적으로 투자를 확대하고 있다. 특히, 건설, 석유 및 가스, 제조업 등에서 수요가 시장 성장을 견인하고 있다.

이러한 시장 규모는 각국의 보호복 산업 전략과 정책적 지원이 결합되어 이루어진 결과로, 앞으로도 기술 혁신과 국제 규제 준수, 친환경 소재 개발 등의 요인에 의해 지속적인 성장이 예상된다. 각국 정부와 기업들이 협력하여 보호복의 품질을 향상시키고, 새로운 시장을 개척하는 노력이 계속될 것으로 보인다.

2.2.1. 보호복용 섬유 사용현황 및 전망

아라미드 섬유는 2023년에 시장의 60.8%를 차지하며, 높은 내열성과 유연성으로 다양한 산업에서 사용되고 있다. 아라미드 섬유는 주로 광업, 석유 및 가스, 화학 제조업에서 작업자 보호를 위해 사용된다. 특히 높은 강도와 내열성을 가져 군사

및 방위 부문에서 중요한 역할을 한다. 이러한 아라미드 섬유는 아미드 결합의 위치에 따라 메타-아라미드와 파라-아라미드로 분류할 수 있으며, 메타-아라미드는 파라-아라미드에 비해 물성이 떨어지지만 밀도가 높으며, 뛰어난 내화특성과 내열성으로 인해 소방복, 전기 절연복, 고온 작업복 및 산업용 필터에 활용된다. 반면, 파라-아라미드는 물성이 뛰어난 동시에 경량성을 가지며 충격 흡수 능력이 뛰어나 방탄복, 헬멧, 고강도 로프 및 자동차 타이어에 활용된다[15].

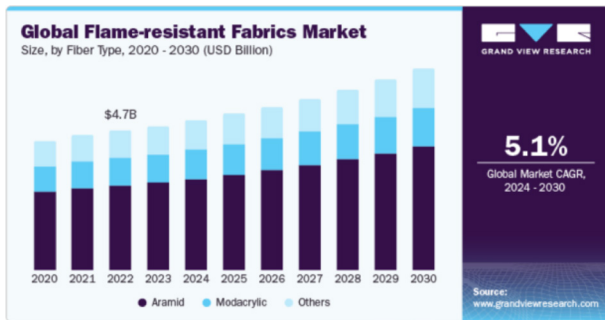


Figure 4. 글로벌 화염 저항성 섬유 시장, 2024-2030.
(출처: Flame Resistant Fabrics Market Size & Share Report, 2030)

현재 아라미드 섬유 시장 규모는 약 43억 9천만 달러이며, 8.1%의 연평균 성장률로 성장하여 2030년까지 약 69억 8천만 달러에 이를 것으로 보인다. 이러한 성장세는 보호복의 수요 증가와 기술 발전에 따른 것이다. 또한, 아라미드 섬유는 높은 강도와 내열성을 가져 군사 및 방위 부문에서 중요한 역할을 하고 있어 군사 비용의 지출이 증가함에 따라 시장이 함께 성장할 것으로 기대된다[16]. 그러나 아라미드 섬유는 폴리에틸렌과 같은 고기능 대체 소재의 등장과 정교한 제조 공정으로 인한 문제와 직면하고 있다. 또한, 아라미드 섬유는 생산 시 정교한 제조 공정이 필요하여 생산 비용이 많이 들며 결과적으로 진입 장벽 또한 높아질 수 있다. 따라서, 이를 해결하기 위한 생산 공정의 단순화 및 비용 절감이 필요하다[17].

모다크릴 섬유는 2024년부터 2030년까지 빠르게 성장할 것으로 예상된다. 모다크릴 섬유는 본질적으로 내화성이 있으며, 리오셀, 아라미드, 폴리아미드-이미드 섬유와 쉽게 혼방될 수 있다. 현재 모다크릴 섬유 시장 규모는 약 5억 6,016만 달러로 예상되며, 2029년까지 연평균 성장률 3.54%로 성장하여 약 6억 6,658만 달러에 이를 것으로 보인다[18]. 이러한 상승세는 미국 및 중국에서 석유 및 가스 산업이 발전함에 따라 보호복에 대한 수요가 증가하여 발생한 현상으로 보인다. 또한, 중국

Table 2. 아라미드 섬유 생산 기업

기업	아라미드 섬유	생산품 내용
Teijin	Twaron®	· 방탄복, 항공 우주, 전기 절연, 타이어 강화 등에 사용되는 파라-아라미드 섬유
DuPont	Kevlar®	· 방탄복, 헬멧, 자동차 부품, 타이어 강화 등에 사용되는 파라-아라미드 섬유
Hyosung	ALKEX®	· 방탄복, 산업용 로프, 광케이블 등에 사용되는 파라-아라미드 섬유
Kolon Industries	Heracron®	· 방탄복, 고강도 로프, 타이어 코드 등에 사용되는 파라-아라미드 섬유
Toray Chemicals South Korea	ARAWIN®	· 내열성 보호복 및 보호구, 컨베이어 벨트의 보강재 등에 사용되는 메타-아라미드 섬유

및 인도와 같은 아시아 국가에서 섬유 산업이 급속하게 발전함에 따라 모다크릴 섬유의 수요가 증가한 것도 주요 원인으로 볼 수 있다.



Figure 5. (좌) GS칼텍스 작업복(아라미드/모다크릴 혼방) 화염 마네킨 3초 화염 노출 전/후 외관. (우) 시험결과.

그러나, 모다크릴 섬유는 잔류 모노머와 관련한 EPA³⁾ 규제와 직면하고 있다[19]. 모다크릴 섬유는 아크릴로니트릴과 다른 모노머의 중합 반응으로 생성되는데, 이때 일부 모노머가 반응하지 않고 잔류할 수 있으며, 이러한 잔류 모노머가 방출될 때 인체 및 환경에 해로운 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해 친환경적인 생산 공정 개발 및 잔류 모노머 최소화 방안이 필요한 상황이다.

³⁾ 미국 환경 보호청(Environmental Protection Agency, EPA) : 잔류 모노머의 허용 기준을 설정하고, 이 기준을 초과하지 않도록 관리

Table 3. 모다크릴 섬유 생산 기업

기업	모다크릴 섬유	생산품 내용
Fushun Rayva Fibre	Rayva Modacrylic Fiber	보호복, 산업용 필터 및 안전성, 내구성용 모다크릴 섬유로 사용
Aksa Akrilik Kimya Sanayi AŞ	Armora®	보호복, 실내 장식, 가구 등에 사용되는 모다크릴 섬유
Kaneka Corporation	Kanecaro®	보호복, 방화복에 사용되는 모다크릴 섬유
Taekwang Industrial	Modabon®	보호복 및 내열성을 갖춘 모다크릴 섬유

Table 4. PBI 섬유 생산 기업

기업	PBI 섬유	생산품 내용
PBI Performance Products	PBI Gold®, PBI Matrix®	소방복, 군사 장비, 산업용 보호복, 우주 항공 장비 등
Toyobo	ZYLON® (PBO 섬유와 혼합 사용)	소방복, 산업용 보호복, 전자 장비 등
Ube Industries,	PBI (Polybenzimidazole)	화학물질 보호용, 소방용, 군복, 우주복 외피 등

PBI 섬유는 소방복, 군사 장비, 산업용 보호복 등에서 널리 사용되며, 높은 내열성과 내화학성 덕분에 극한의 환경에서도 안전성을 제공하며, 연평균 성장률 6.5%로 2023년 약 2억 달러 규모에서 2030년 약 3억 2천만 달러에 이를 것으로 예상된다. 나노 기술 등의 첨단 기술을 적용한 성능 향상 연구가 활발히 진행 중이며, 환경 규제 강화에 대응하여 환경 친화적인 생산 공정과 재활용 가능한 소재로서의 장점도 가지고 있어 다양한 고부가가치 산업에서의 수요 증가가 예상된다[20].

아라미드와 PBI 섬유를 혼방하면 내열성과 내화학성이 극대화되어 극한의 환경에서도 뛰어난 보호 성능을 제공하고, 아라미드의 높은 강도와 PBI의 편안함을 결합하여 내구성과 착용감을 동시에 확보할 수 있다. 경량성과 강도의 균형을 맞춰 방탄복, 소방복 등 다양한 산업에서 효율적으로 활용될 수 있다는 장점도 있다.

또한, 혼방 섬유(아라미드, PBI)는 현재 국내 소방용 특수방화복에 적용되어 그 성능을 입증하고 있으며 여러 응용분야에

적용가능하므로 보호복 분야에서 다양한 고부가가치 산업 관련 수요가 증가할 전망이다. 그러나 이러한 혼방 섬유는 생산 비용이 증가하고 제조 공정이 복잡해지는 단점이 있으며, 이는 생산 과정에서의 경제성과 효율성을 저하시킬 수 있다. 따라서, 비용 절감과 생산 효율성을 향상시키기 위한 기술 개발이 필요하다.



Figure 6. 화염마네킨 8초 화염 노출 후 외관 (좌) 결감 : 아라미드100%, (우) 결감 : PBI 40%+아라미드 60%.

군사용 분야에서는 군인들을 보호하기 위한 고성능 화염 저항성 섬유의 수요가 증가하고 있으며, 군사비 지출 증가와 고급 방위 장비에 대한 수요가 시장 성장을 견인하고 있다. 군사 장비 및 훈련에서 화염 저항성 섬유는 필수적이며, 이는 군인의 안전을 보장하는 중요한 요소이다.

이러한 세부 시장 동향은 각국의 보호복 산업 전략과 정책적 지원이 결합되어 이루어진 결과로, 앞으로도 기술 혁신과 국제 규제 준수, 친환경 소재 개발 등의 요인에 의해 지속적인 성장이 예상된다. 이에 따라, 각국 정부와 기업들이 협력하여 보호복의 품질을 향상시키고, 새로운 시장을 개척하는 노력이 계속될 것으로 보인다.

3. 화염 및 열 저항성 의복의 주요 시험 표준과 평가방법

3.1. 작업 환경 및 산업 분야에 따른 의복 관련 표준 및 기준

석유 및 가스, 전기 기술자, 라인 작업자, 화학 공장 근로자 및 기타 유사한 산업에 종사하는 사람들은 모두 작업 중 화재에 노출될 위험이 있다. 작업 환경에 따라 고온 및 고열, 화염 노출 상황이 다양한 만큼 적합한 보호복 착용이 요구된다. 예

를 들어, 방열복은 높은 온도에 노출되는 작업에서 열을 반사하고, 열 전도를 줄이는 재질로 제작되어 작업자의 안전을 보장한다. 전기안전복은 전기 아크로 인한 화상을 방지하기 위해 설계된다. 한편, 화기작업용 산업안전복은 불꽃이나 고온의 금속에 노출될 위험이 있는 작업 환경에서 사용된다. 각 보호복은 특정 작업 환경의 열적 위험 요소를 고려하여 설계되며, 보호복의 성능과 적합성을 검토하고 올바르게 착용하는 것은 작업자의 안전을 지키는 데 필수적이다. 보호복의 적합성과 성능 기준에 대한 표준은 다음과 같다.

3.1.1. 불꽃 및 열 유형에 대한 보호복 평가(ISO 국제 표준)

ISO/TR 2801:2007 Clothing for protection against heat and flame — General recommendations for selection, care and use of protective clothing에 따르면 관련 보호복 표준으로는 (KS K) ISO 14116, ISO 11611 및 ISO 11612가 있으며, 보호를 위해 선택할 의복과 열/불꽃 위험 유형 사이 관계의 예시 또한 제공하고 있다.

(1) (KS K) ISO 14116 : Protection against flame — Limited flame spread materials, material assemblies and clothing

해당 표준은 작은 불꽃에 순간적으로 노출될 때 보호복이 불에 타거나 이로 인한 위험을 최소화하기 위해 재료, 재료 어셈블리 및 보호복의 한계 불꽃 확산 특성에 대한 요구 사항을 명시한다. 한계 불꽃 확산 지수(index) 1, 2, 3으로 보호복을 분류하며, 숫자가 클수록 한계 불꽃 확산 시험(KS K) ISO 15025 결과에 대한 요구 사항이 추가된다. 불꽃 노출 시 구성 재료에 대한 연소 거동만이 평가 대상이므로, 고열 노출에 대한 위험에 대해서는 포함하지 않는다[22].

(2) (KS K) ISO 11611 : Protective clothing for use in welding and allied processes

용접 또는 금속 열처리 공정에서는 스파터(용접할 때 튀는 작은 용융 금속 비말), 불꽃, 전기로(electric arc)에서 발생하는 복사열 등 다양한 고온, 고열 환경에 작업자가 노출될 뿐만 아니라, 일반적으로 약 100 V 이하의 직류 전압을 사용하여 용접을 진행하기 때문에 전류가 통하고 있는 전도체와 단기간 접촉 시 감전의 위험성 또한 존재한다. 따라서 이 표준에서는 용접 작업과 연관된 공정에서 착용자의 몸을 보호하기 위해 고안된 후드, 에이프런, 토시, 각반을 포함한 보호복의 최소 기본 요구 사항과 시험 방법을 규정하고 있다. 전기 저항에 대한 시

Table 5. 보호를 위해 선택할 의복과 열/불꽃 유형 사이 관계[21]

위험도 저 : 열 및/또는 불꽃에 대한 국부적인 노출		
위험	위험의 예	제안된 보호복
작은 불꽃—우연한 접촉	분젠 버너의 불꽃에 접촉할 위험성이 있는 실험실 작업	(KS K) ISO 11612, 수준 A
더 큰 불꽃과 대류열	a)작은 불 옆에서의 작업 보기: 제조 과정에서 b)소화기 훈련	(KS K) ISO 11612, 수준 A,B1,C1
복사열	제조 과정에서 용광로 근처의 작업	(KS K) ISO 11612, 수준 A,C1 또는 (KS K) ISO 15538, 유형1
의복이 불꽃을 전파	험한 날씨나 낮은 가시성 등 다른 유형으로부터의 보호를 하며 열과 불꽃에 대한 보호복 위에 입는 의복	(KS K) ISO 14116, 수준2
불꽃과 작은 용융 금속 방울	a)용접 및 절단 b)알루미늄 및 철의 주조 작업	(KS K) ISO 11611 (KS K) ISO 11612, 수준 D1 및 E1
위험도 중 : 상당한 열 및/또는 불꽃에 대한 노출		
위험	위험의 예	제안된 보호복
복사열	용광로 근처에서의 작업	(KS K) ISO 11612, 수준 A,B2,C2 또는 (KS K) ISO 15538, 유형2
복사열과 가깝스치는 불꽃	실내 가마	(KS K) ISO 11612, 수준 A,B2,C2
대류열, 복사열, 작은 용융 금속 방울	단락 전기 아크	(KS K) ISO 11612 수준 A,B2,C1
불꽃, 복사열, 연소 잔여물	탁 트인 시골 지역에서의 임야 화재 진압	(KS K) ISO 15384 또는 (KS K) ISO 11612, 수준 A,B1,B2,C1
위험도 고 : 즉시 목숨을 빼앗을 수 있는 열 및/또는 불꽃에 노출될 가능성이 있음		
위험	위험의 예	제안된 보호복
강한 열과 불꽃	화재 건물 진입	(KS K) ISO 11613
불꽃에 둘러싸임	a)경주 운전자 충돌 b)화재 진압시 플래시오버	a)(KS K) ISO 14460 b)(KS K) ISO 11613 또는 (KS K) ISO 15538, 유형3
복사열과 다량의 금속 파편	제강 공장	(KS K) ISO 11612, 수준A,B2,C3(C4), D1~D3E1~E3)
큰 불 근처에 둘러싸임	a)항공기 충돌 b)석유화학제품 저장 탱크의 화재	a)(KS K) ISO 11613 b)(KS K) ISO 15538, 유형3

험을 요구함과 동시에 용융 금속 비말과 복사열 노출 발생 강도에 따라 낮은 위험 노출 상황에 대한 1종과 높은 수준인 2종으로 보호복을 분류한다[23].

(3) (KS K) ISO 11612 : Protective clothing — Clothing to protect against heat and flame — Minimum performance requirements

해당 표준에서는 불꽃 확산 제한 속성을 열 및 불꽃에 대한 보호복의 기본적인 성능으로 요구하고 있으며, 그 외에 다양한 열 투과 요구 성능을 보호복 용도에 따라 적용사항으로 규정하고 있다. 보호복은 1)열 저항, 2)한계 불꽃 확산, 3)치수 변화, 4)물리적 요건 등의 일반적인 최소 요구 성능과 더불어 열 투과 성능 코드 중 하나 이상을 충족해야 한다. 완비된 구성품 또는 다층의 의복 어셈블리에 대해서는 화염 마네킨 시험을 선택적으로 제시하고 있으며, 최소 4초 이상 노출 시 전체 의복의 보호 성능에 대해 가장 완벽한 정보가 주어진다고 제시하고 있다[24].

Table 6. 열 투과 성능(KS K) ISO 11612

문자 코드	열 투과 성능	시험 방법
A1 또는 (A1 및 A2)	한계 불꽃 확산	(KS K) ISO 15025
B1~B3	대류열	(KS K) ISO 9151
C1~C4	복사열	(KS K) ISO 6942
D1~D3	용융 알루미늄 비말	(KS K) ISO 9185
E1~E3	용융 철 비말	(KS K) ISO 9185
F1~F3	접촉열	(KS K) ISO 12127-1

3.1.2. 화염 및 열 저항성 의복 평가(NFPA 표준)

NFPA(미국화재예방협회)에서 제정한 화염 및 열 저항성 의복 관련 표준에는 NFPA 70E, NFPA 2112가 있다. NFPA 70E는 전기 작업 중 단락으로 발생하는 아크 플래시(Arc Flash)로부터 작업자의 피해를 최소화하기 위한 보호복 표준이며, 의복 재료에 대한 실 용융 저항, 수직 화염 저항, 아크 테스트가 요구된다. NFPA 2112는 산업용 화염 저항 보호복에 대한 표준으로 가연성 물질의 혼합물이 점화되어 발생하는 갑작스럽고 강렬한 화재, 즉 플래시 화재 노출 위험을 최소화하기 위한 보호복 성능 기준을 규정한다. NFPA 70E와 유사하게 아크 테스트를 제외한 소재에 대한 실 용융 저항,

수직 화염 저항 성능이 포함되며, 추가적으로 소재의 내열성과 대류 및 복사열 방호 성능이 요구된다. 또한, 완제품에 대해서도 평가가 진행되는데 화염마네킨 시험에서 모의 플래시 화재에 3초간 노출 시 2도 및 3도 화상 예측 면적이 50% 미만이어야 한다. 해당 기준은 사람이 신체의 절반 이상에 2도 또는 3도 화상을 입었을 때의 생존율을 고려하여 결정된 수치이다[25].



Figure 7. 인증 표준별 보호복에 부여되는 마크

3.1.3. 국내 기준(산업안전보건법, KOSHA Guide)

산업안전보건 기준에 관한 규칙에서는 고열에 의한 화상 등의 위험이 있는 작업자에게 방열복을 지급하도록 명시하고 있다. 여기서 방열복이란 내열 원단으로 구성된 보호복을 명칭하며, 내열 원단은 내열 섬유에 유연접착제를 바르고 알루미늄이 증착된 필름을 접착시켜 주름이 생기지 않도록 한 원단이다. 방열복의 성능 기준은 고용노동부의 보호구 안전인증 고시를 통해 규정하고 있으며, 요구되는 내열 원단의 성능으로는 1)난연성, 2)절연저항, 3)인장강도, 4)내열성, 5)내한성, 6)열전도율 등의 항목이 있다[26].

한국산업안전보건공단이 제정한 기술적 권고 지침인 KOSHA Guide(안전보건기술지침)에서는 난연성 전기작업복 선정에 관한 기술 지침을 통해 전기작업을 0에서 4까지의 위험등급으로 분류하여 각 등급별 난연성 작업복의 요구사항을 안내하고 있으며[27], 작업용 방열복에 관한 일반 지침으로 안전작업복에 관한 시험법과 평가 기준을 제시하고 있다.

3.2. 화염 및 열 저항성 의복 성능 평가 관련 표준

화재에서 살아남은 근로자들 사이에서 가장 심각한 화상은 노출된 머리와 손보다는 방열소재가 아닌 의류로 덮여 있던 부위에서 발견되며, 불타는 의류가 피부와 접촉하여 불꽃이 사라진 후에도 계속해서 불타면서 가장 심각한 화상을 유발한다. 또한 타지 않고 녹는 의류도 상당한 화상 피해를 입힐 수 있다[25]. 따라서 화염 및 열 저항성 보호복은 불꽃 및 고온, 고열 노출 시 물리, 화학적 변화에 대해 평가되어야 하며, 여기서 그치지 않고 해당 소재의 열 투과와 연소 거동이 착용자에

게 어느 정도의 화상 피해를 입히는지도 예측되어야 한다. 방염 보호복의 성능 평가는 1)소재의 내열 및 난연성, 2)소재의 열 방호 성능, 3)완제품의 모의 화재 평가(화염 마네킨)로 구분된다[28]. 국제 표준인 ISO표준을 주로 하여 해당 성능 평가를 정리해보았다.

3.2.1. 소재의 내열성 및 난연성 평가

불꽃 및 고온, 고열 환경 노출 시 소재의 반응 특성인 내열 및 난연성은 일차원적으로 보호복 착용자에게 가해질 위험을 판별할 수 있는 육안 관찰 요소이다. 소재의 변형이 생긴다면 단열 효과를 내는 공기층이 줄어들어 신체에 화상 위험을 높일 뿐 아니라 전기 화재의 경우 의복에 생성된 구멍으로 전류가 통해 감전의 위험성 또한 존재한다. 따라서 내열 및 난연성 평가는 방염 보호복의 기본적인 성능시험으로 요구되고 있다.

(1) 내열성 (KS K) ISO 17493 : Clothing and equipment for protection against heat — Test method for convective heat resistance using a hot air circulating oven

보호복 재료, 항목 및 장비가 순환하는 뜨거운 공기에 노출될 때 내열성을 평가하는 시험이다. 특정 노출 온도에서 재료의 물리적 변화를 측정하기 위해 수축 측정을 포함하여 정의된 가시적 변화를 기준으로 재료를 평가한다. 180 °C 또는 260 °C의 열풍 순환식 항온기에서 대상 시료를 5분간 노출시킨 후 연소 및 수축 양상을 육안으로 확인한다[29].



Figure 8. (좌) 내열성 시험 장치. (우) 장치 안 거치된 시험편 모습.

(2) 한계 불꽃 확산 (KS K) ISO 15025 : Protective clothing — Protection against flame — Method of test for limited flame spread

천 형태의 단층 또는 다층 어셈블리 소재에 작은 불꽃을 적용하여 불꽃 확산 특성을 측정하는 시험으로 표면 점화(A법) 또는 하단 점화(B법), 두 가지 방법으로 진행한다. 해당 시료

를 연소시험 장치에 넣고, 규정된 가스 버너 장치로 10초 동안 가열한 후 잔진 시간, 잔염 시간을 측정하고 용융 및 잔해 발생 등의 연소 거동을 확인한다. 단, 해당 시험 결과는 공기 공급이 제한되거나 거대하고 강한 열원에 노출되는 상황에는 반영되지 않는다[30].



Figure 9. (좌) 난연성 평가 버너 장치. (우) 장치에 거치된 시험편 모습.

3.2.2. 소재의 열 방호 성능 평가

고온의 물체를 다루는 작업 환경에서 일하는 작업자는 화재의 위험은 물론 다양하고 복합적인 고열 환경으로부터 신체의 화상 피해 위험을 겪는다. 화상은 열에 노출되었을 때 피부 온도가 44 °C 이상으로 올라가면 발생하는데 피부의 손상 깊이가 정도에 따라 1도, 2도, 3도 화상으로 분류된다. 1도 화상은 통증을 느낄 정도이며, 2도 및 3도 화상은 장기간 치료가 필요한 치명적인 피해로 구분된다. 소재의 열 방호 성능 평가는 소재를 투과한 열이 피부의 온도를 얼마나 빨리 상승시키는지 열량계를 사용하여 예측하는 시험이며, 다양한 산업 분야에서 작업자가 마주할 수 있는 여러 고열 환경에 맞추어 가열원이 분류되어 있다.

(1) 대류열(불꽃열) (KS K) ISO 9151 : Protective clothing against heat and flame — Determination of heat transmission on exposure to flame

보호복에 사용되는 재료 혹은 재료 어셈블리에 불꽃을 노출시켜 대류열전달 특성을 확인하고 열전달 지수를 측정해 비교하는 시험이다. 메커버너를 이용하여 섬락 수준의 불꽃(80 kW/m²)에 수직 방향으로 시험편 표면을 노출시키고, 이 면의 온도가 초기 온도로부터 특정 온도(12 °C, 24 °C)만큼 상승하는데 소요되는 시간을 측정하며, 이때 시간이 열전달 지수(HTI)로 평가 요소가 된다. 여기서 초기 온도가 12 °C에서 24 °C 상승하기까지의 시간은 착용자가 열에 의한 통증을 느끼고 화상 피해를 입지 않기 위해 대피할 수 있는 시간으로 간주된다[31].

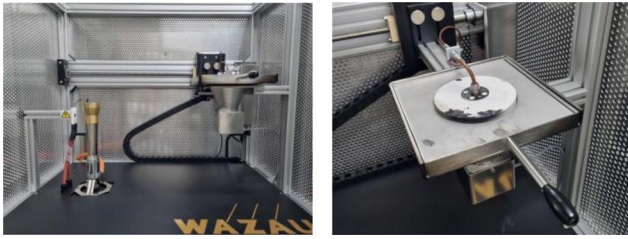


Figure 10. (좌) 불꽃열 방호성능 시험장치, (우) 장치에 거치된 시험편.

(2) 복사열 (KS K) ISO 6942 : Protective clothing — Protection against heat and fire — Method of test: Evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat

복사열은 연료 연소로 인한 화재 및 대형 화재에서 발생하는 열 대부분을 차지하며, 화재 전파와 화상 피해에 가장 큰 원인이 된다. 복사열 방호 성능 평가에서는 열원과 거리를 조정해 다양한 세기의 복사열 조건에서 보호복의 안전성을 확인한다. 1,100 °C의 발열원에 수평 방향으로 시험편의 표면을 노출시켰을 때 시험편의 외관 변화(A법) 시험편을 통과하는 열량 및 이면의 온도가 특정 온도(12 °C, 24 °C)만큼 상승하는데 소요되는 시간(B법)으로 평가한다. 이때 시간이 복사열전달 지수(RHTI)가 된다[32].

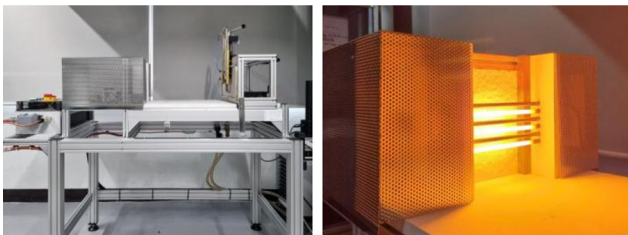


Figure 11. (좌) 복사열 방호성능 시험장치, (우) 가열 중인 복사열원 장치.

(3) 용융 알루미늄/철 비말 (KS K) ISO 9185 : Protective clothing — Assessment of resistance of materials to molten metal splash

큰 용융 금속 파편에 대한 보호복 재료의 열 투과 저항성을 평가하는 방법이다. 핀 틀에 수평으로 고정된 시험편에 적절한 양의 용융 금속을 주입하여 재료를 시험한다. 손상 평가는 시험편 바로 뒤에 위치시킨 엠보싱 처리된 열가소성 PVC 센서 필름에 나타난 손상을 관찰하여 이루어진다. 또한, 시험편 표면에 달라붙은 금속도 기록된다. 센서 필름에 손상을 일으키는 최소량이 관찰될 때까지 적절한 양의 금속을 사용하여 결과에 따라 시험을 반복한다[33].

(4) 접촉열 (KS K) ISO 12127-1 : Clothing for protection against heat and flame — Determination of contact heat transmission through protective clothing or constituent materials — Part 1: Contact heat produced by heating cylinder

화재 현장에서 금속 파이프 등 타지 않는 물체는 높은 온도로 가열되어 물리적으로 접촉할 경우 화상 피해를 입을 수 있다. 접촉열 방호성능 평가에서는 다양한 온도 조건의 가열 실린더를 일정한 압력($(49 \pm 0.5) \text{ N}$)으로 접촉시켜 보호복 재료의 안전성을 평가한다. 100 ~ 500 °C의 가열 실린더를 시험편의 표면에 접촉시켰을 때 이면의 온도가 특정 온도(10 °C)만큼 상승하는데 소요되는 시간으로 평가하며, 이를 측정 기준 시간(t_i)이라 한다[34].

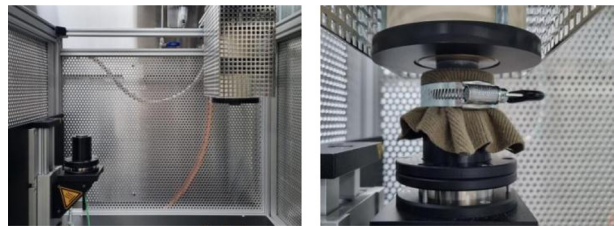


Figure 12. (좌) 접촉열 방호성능 시험장치, (우) 접촉열 방호성능 평가 모습.

3.2.3. 완제품의 모의 화재 평가 - 화염 마네킨

화염 마네킨 시험은 화재 환경을 모사하여 실제 상황에서의 화염 및 불꽃에 대한 완제품의 복합적인 거동과 인체의 피해 정도까지 평가할 수 있다. 착용 상태에서 완제품의 보호 성능은 잠재적인 수축률과 공기층의 두께와 분포의 영향을 받기 때문에 소재 단계에서의 성능 평가 결과와 다른 양상을 보일 가능성이 있다. 이와 더불어 소재 샘플만으로는 지퍼와 심, 주머니와 같은 보호복 디자인 특성의 영향을 평가하기 어렵다는 한계가 존재한다. 따라서 화염 마네킨 시험은 소재 평가만으로는 완전히 파악할 수 없는 방염복의 보호 성능을 평가하기 위해 요구되며 최근에 그 필요성으로 인해 (재)FITI시험연구원을 필두로 하여 한국섬유소재연구원 등 국내 시험연구기관에서도 활발히 시험을 진행하고 있다. 화염 마네킨 시험 관련 국제 표준으로는 (KS K) ISO 13506-1 와 (KS K) ISO 13506-2가 있으며, 전자는 화염 마네킨 요구 조건을 규정하고 후자는 화염 마네킨 시험으로부터 얻은 열 전달 에너지 데이터를 활용한 화상 면적 예측 계산에 대해 설명하고 있다.

(1) 완비된 의복에 대한 열전달 에너지 측정 (KS K) ISO 13506-1 : Protective clothing against heat and flame — Part 1: Test method for complete garments — Measurement of transferred energy using an instrumented manikin

화염 마네킨 시험은 실제 착용 상태에서 방염복의 성능을 평가하기 위해 사용되는 시험으로, 열 유속 센서가 부착된 인체 모형에 방염복을 착용시킨 후, 화염을 분사하여 열이 전달되는 과정을 확인한다. 최소 100개 이상의 열 유속 센서를 사용해야 하며 인체모형의 각 부위에 가능한 균등하게 분포시켜야 한다. 84 kW/m²의 열 유속 밀도를 가지는 불꽃을 특정 노출 시간 동안 노출시켜 실제 크기의 인체 모형에 전달되는 열 전달 에너지(열류량)를 측정하며 열에 노출되는 동안과 노출 후의 시험편 특성도 사진 또는 영상으로 기록하여야 한다[35]. 따라서 의복 재료 비교, 디자인 비교, 특정 목적의 의복 성능 판정 등에 유용할 뿐만 아니라 실착용 환경을 반영하는 조건을 부가한 실험 및 연구에도 활용될 수 있다. (재)FITI시험연구원에서는 보호복의 겉감 또는 안감에 수분을 가하여 화염마네킨을 활용한 실증평가를 진행하여 소방복의 보호 성능에 유의미한 영향을 주는 것을 확인한 바 있다.



Figure 13. 화염마네킨 8초 화염 노출 후 소방복 외관 및 화상 예측. (좌) DRY 상태, (우) 겉감 WET100% 상태, 국립소방연구원 화염마네킨 실증평가 진행

(2) 피부 화상 예측 계산 (KS K) ISO 13506-2 : Protective clothing against heat and flame — Part 2: Skin burn injury prediction — Calculation requirements and test cases

인체의 피부는 표피, 진피, 피하조직으로 구성되어 있는데, 각 층의 두께 및 구성 성분의 차이로 인해 열전도도와 용적 열용량에도 차이가 존재한다. 따라서 해당 표준에서는 피부 모형을 설정하여 실제 인체 피부의 구성 요소에 의한 영향을 고려한다. 피부 화상 예측 계산은 (KS K) ISO 13506-1에서 측정된 열류량 값을 입력 데이터로 활용하며 화상 정도를 파악하기 위해서 해당 데이터를 이용하여 피부의 온도를 구하는 과

정이 선행된다. 피부 및 피하 조직의 내부 온도를 결정하기 위해 깊이와 시간에 따른 1차원 열전도식을 풀이하며 (0, 75, 1200) μm 같은 피부 모형 깊이와 시간에서의 피부 온도를 구한다. 여기서 얻어진 온도 값은 Henriques의 손상 적분 모델식에 반영되어 피부화상계수 Ω가 산출된다. 1도 화상 시작 예상 시간은 표피/진피 경계면 깊이(75 μm)에서 Ω=0.53일 때이며, 2도 화상은 75 μm에서 Ω=1, 3도 화상은 진피/피하 경계면(1200 μm)에서 Ω=1일 때 시작된다고 예측한다. 예측된 데이터를 통해 신체의 다양한 부위에서 발생할 수 있는 화상의 정도를 평가하고, 시간에 따른 화상 정도의 변화를 그래프로 시각화할 수 있다. 100개 이상의 센서를 사용하여 전달 에너지, 에너지 전달 계수, 통증 발생 시간, 평균 흡수 열류량, 최대 흡수 열류량을 측정할 수 있다. 이 데이터를 바탕으로 2도 및 3도 화상 면적이 방염복의 보호 성능을 평가하는 주요 요소로 활용된다[36].

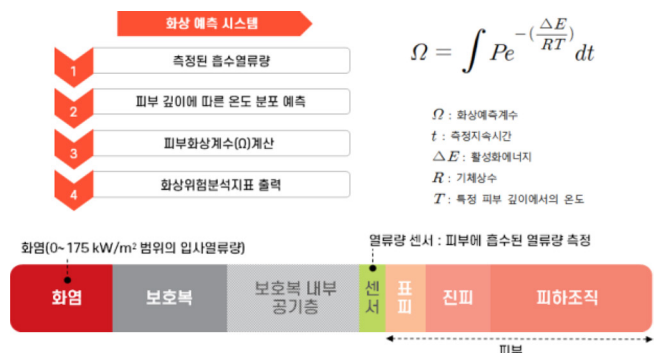


Figure 14. 화염마네킨 평가 시스템을 활용한 화상 예측 시스템 도식화.

4. 결 론

화염 및 열 저항성 의복은 극한 환경에서 작업자의 안전을 보장하기 위해 필수적인 보호 장비이다. 최근 몇 년간 전 세계적으로 보호복의 중요성이 강조되어 관련 기술과 소재가 빠르게 발전하고 있으며, 이러한 발전은 보호복의 효율성과 기능성을 향상시키고 있고 다양한 산업 분야에서의 적용을 통해 그 효과가 입증되고 있다.

주요 국가들의 보호복 관련 정책과 규제는 안전 기준을 강화하는 방향으로 나아가고 있으며, 이는 보호복의 품질을 높이고 작업자의 안전을 극대화하는 데 기여하고 있다. 미국의 OSHA와 NFPA, 유럽의 CE 인증과 REACH 규정, 한국의 산업안전보건법과 KOSHA의 역할 등은 모두 보호복의 성능과 안

전성을 보장하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 최신 기술 동향을 반영한 스마트 보호복과 친환경 소재의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 기술적 발전은 향후 보호복 시장의 주요 트렌드로 자리 잡을 것이다.

화염 및 열 저항성 의복의 성능 평가 방법 또한 지속적으로 발전하고 있다. 내열성, 한계불꽃전파, 대류열, 복사열, 용융 금속 비말, 접촉열 등의 다양한 열 투과 성능 평가가 이루어지고 있으며, 화염 마네킨 시험을 통해 완제품의 실질적인 보호 성능을 평가하는 방법도 중요하게 다루어지고 있다. 이러한 평가 방법들은 보호복의 성능을 객관적으로 측정하고, 실제 작업 환경에서의 안전성을 보장하는 데 필수적인 요소이다.

앞으로도 화염 및 열 저항성 의복 분야는 지속적인 연구와 개발을 통해 더욱 발전할 것으로 기대된다. 특히 다양한 고성능 소재와 첨단 기술을 활용한 보호복의 개발이 활발히 이루어질 것이며, 이러한 기술적 진보는 작업자의 안전을 더욱 강화하고 산업 현장에서의 사고를 최소화하는 데 기여할 것이다. 또한, 글로벌 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해 각국의 정책 변화와 규제 동향을 주시하고, 이에 맞춘 전략을 수립하는 것이 중요하다. 보호복 산업은 앞으로도 안전과 기술의 균형을 맞추며 지속 가능한 발전을 이루어 나갈 것이다.

참고문헌

1. Global and Domestic Protective Clothing Market Trends, Market Data Forecast, 2024.
2. Global Protective Clothing Market Insights, Research and Markets, 2024.
3. Protective Clothing Market Analysis, Future Market Insights, 2024.
4. Protective Clothing Market: Industry Analysis and Forecast, Maximize Market Research, 2024.
5. DUPONT Nomex® For Military Clothing: Protecting When Danger Flares Up, www.dupont.com/knowledge/protecting-when-danger-flares-up.html
6. Polymer Fabric Protects Firefighters, Military, and Civilians, NASA SPINOFF, 2008.
7. Inside Basofil: The making of an FR fiber, Furniture Today, 2003.
8. Shah, M. A., Pirzada, B. M., Price, G., Shibiru, A. L., & Qurashi, A. "Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review", *Journal of Advanced Research*, 38, 55-75, 2022.
9. EUR-Lex, [eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52018XC0327\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:52018XC0327(01))
10. Jessica Tagliafierro, PPE Supply Chain: Challenges and Opportunities, 2020.
11. U.S. Manufacturing Ecosystem Key to Economic Growth, Innovation, Competitiveness, Devon Bistarkey, 2022.
12. European Commission(EC). EU strategy for sustainable and circular textiles. URL : https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en
13. Flame Resistant Clothing Market Report Overview, Business Research Insights, 2024.
14. Flame Resistant Fabrics Market Size & Share Report, 2030, Grand View Research, 2024.
15. Aramid Fibers : Types, Properties, Manufacturing Process and Applications, Textile learner, 2015.
16. Aramid Fiber Market Size And Share Analysis Report, 2030, Grand View Research, 2024.
17. Aramid Fiber Market Size To Reach \$6.98 Billion By 2030, Grand View Research(GVC), 2023.
18. Modacrylic Fiber Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 – 2029), Mordor Intelligence, 2024.
19. Modacrylic Fiber - Market Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts 2019–2029, RESEARCH AND MARKETS, 2024.
20. High-performance Fiber Market Outlook from 2023 to 2033, Future Market Insights, 2024.
21. ISO/TR 2801:2007 Clothing for protection against heat and flame — General recommendations for selection, care and use of protective clothing.
22. ISO 14116:2015 Protective clothing — Protection against flame — Limited flame spread materials, material assemblies and clothing.
23. ISO 11611:2024 Protective clothing for use in welding and allied processes.
24. ISO 11612:2015 Protective clothing — Clothing to protect against heat and flame — Minimum performance requirements.
25. Understanding NFPA 70E and NFPA 2112 FF Standards, Occupational Health & Safety, 2020.
26. 산업안전보건기준에 관한 규칙, 국가법령정보센터, 2024.
27. 난연성 전기작업복 선정에 관한 기술지침, 한국산업안전보건공단, 2011.
28. 화재진압 시 착용하는 소방용 개인보호구 성능평가를 위한 국내외 시험기준 및 개선방향, 한국생활환경학회지, 김도희, 2018.

29. ISO 17493:2016 Clothing and equipment for protection against heat —
Test method for convective heat resistance using a hot air circulating oven.
30. ISO 15025:2016 Protective clothing — Protection against flame —
Method of test for limited flame spread.
31. ISO 9151:2016:2016 Protective clothing against heat and flame —
Determination of heat transmission on exposure to flame.
32. ISO 6942:2022 Protective clothing — Protection against heat and fire
— Method of test: Evaluation of materials and material assemblies
when exposed to a source of radiant heat.
33. ISO 9185:2007 Protective clothing — Assessment of resistance of
materials to molten metal splash.
34. ISO 12127-1:2015 Clothing for protection against heat and flame —
Determination of contact heat transmission through protective clothing
or constituent materials — Part 1: Contact heat produced by heating
cylinder.
35. ISO 13506-1:2024 Protective clothing against heat and flame — Part
1: Test method for complete garments — Measurement of transferred
energy using an instrumented manikin.
36. ISO 13506-2:2024 Protective clothing against heat and flame — Part
2: Skin burn injury prediction — Calculation requirements and test
cases.