

# 보호복 연구 동향 및 비전



**이병선**

• 단국대학교 고분자시스템공학부  
파이버융합소재전공(교수)

## 1. 서 언

크고 작은 화재 진압과 구조 업무를 수행하는 소방관의 안전 확보와 화학물질 취급 중 발생하는 사고의 피해를 예방하기 위한 목적 등 전통적인 보호복에 대한 수요에 더하여, 후쿠시마 핵폐기물 오염수 방류나 전 세계적으로 유행하고 있는 COVID-19과 같이 새로운 안전 위협 요인에 대응하는 보호복의 수요 역시 급격히 증가하고 있다. MarketsandMarkets 보고서에 따르면 보호복 시장은 2020년 현재 88억 USD에서 2025년에 이르면 123억 USD로 연평균 6.9%의 성장률을 기록할 것으로 기대되어 시장 확대에 따른 전문가 양성 및 시장 점유율 확대를 위한 국가적 노력이 필요하다[1].

단국대학교 보호복 연구소는 이와 같은 수요를 뒷받침하는 전문 기관으로, 퇴임하신 윤기중 교수 지휘 아래 2005년 3월 단국대학교 보호복 연구소 발기인 대회를 시작으로 2007년 단국대학교 부설 연구소의 지위를 얻어 현재까지 위상을 굳건히 유지하고 있다. 2010년 국내 유일의 Flash fire testing system을 구축하고[2], 다양한 ISO인증 설비를 보유하고 있으며, 각종 국가 과제 수행 및 산업계 수요에 대응해 왔다. 고내열성 보호복 소재 및 제품 개발사업에서, 국제 표준화 사업, (주) 산청과 산학연계 사업을 통한 경량화 소방복 개발에 이르기까지 보호복에 대한 기초 연구에서 상용화 전반을 아우르는 성과를 창출해왔으며, 당해년도(2021년)에도 신규 연구 과제를 발굴하여 수행하는 등 보호복 분야 발전에 이바지하고 있다. 단국대학교 보호복 연구소 이외에도 경남대학교 의류학과 권정숙 교수 연구팀, 소방방재학과 방창훈 교수 연구팀과 서울대학교 남윤자 교수 연구팀 등이 보호복 연구를 선도하고 있다.

이러한 노력에도 불구하고, 국내 섬유 산업에서 보호복 분야는 기능성 섬유, 산업용 섬유 등 타 섬유 소재 분야에 비해 연구개발이 상대적으로 덜 이루어지고 있는 것이 현실이다. 본 기고문에서는 국내외 보호복 연구 동향을 살펴보고, 변화된 환경과 새로운 위협 요소에 대응하는 유망 보호복 분야에 대해 논하고자 한다.

## 2. 보호복 연구 동향

보호복의 기능성 측면에서 기존의 연구는 방탄, 방검, 절단 보호 등 외부에서 가해지는 기계적 요인에 의한 피해를 보호하는 고강도 섬유(파라-아라미드 (p-Aramid), 초고분자량 폴리에틸렌(ultra-high molecular weight

polyethylene), 폴리피리도비스이미다졸(polypyridobisimidazole)와 화재 및 고온에 의한 피해를 보호하는 내열성/난연성 섬유(메타-아라미드(m-Aramid), 파라-아라미드(p-Aramid), 폴리이미드(polyimide), 멜라민(melamine))을 중심으로 진행되었다[3]. 두 가지 위협 요인의 심각성 비교는 무의미하지만, 2006년 이후의 연구는 주로 열적 요인에 대한 보호복을 중심으로 이루어져왔다.

단국대학교 보호복 연구소에서는 Figure 1과 같이 Flash Fire Simulator를 비롯하여 복사열 통과량(ISO 6942), 열 및 불꽃 차단성(ISO 17942), 불꽃열 통과량(ISO 9151), 연소성: 수직법(ISO 0585), 및 불꽃 확산 속도(ISO 15025) 등 열 보호복 평가 설비를 보유하고 있다. 이를 바탕으로 thermal barrier의 단열효과[4,5], aerogel 첨가에 의한 열 특성 향상[6], Aluminum 층 도입에 따른 복사열 특성 평가[7], 용융금속에 대한 보호복 성능 평가[8], 열 압박에 대한 수분 영향 조사[9] 등 열적 요인에 대한 보호복 성능평가와 함께 화학물질 방호용 장화의 내화학성 평가[10] 연구 성과를 국내외 학술지에 게재하였다.

경남대학교에서는 의류학과 권정숙 교수, 소방방재학과 방창훈 교수 및 기계공학부 이준경 교수가 중심이 되어 소방 보호복의 복사열 노출[11], 공기간극[12], 열유속[13]에 따른 열 보호성능 평가와 함께 착용 만족도[14] 및 피로도[15], 착용이 신체에 미치는 영향[16]에 대해 국내 학술지에 보고하였다. 서울대학교 남윤자 교수 연구팀은 개인보호구 개발을 위한 기초 연구[17] 및 치수체계[18]에 관한 연구 결과를 보고하였다.



Figure 1. 단국대학교 보호복 연구소 보유 열 보호복 평가 설비.

해외에서도 역시 소방 보호복의 열 특성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 화재가 없는 환경에서 작업자가 착용하고 있는 보호복 내부 온도를 측정[19,20], 수증기 보호 특성 모델링[21], 신규 개발된 직물에 대한 열보호 및 착용감 조사[22], 실리카 aerogel 함유 보호복의 방열 특성 평가[23], 아라미드 대체를 위한 silicone resin 코팅층 도입 통한 열안정성 개선

[24], 공기간극에 의한 방열 특성 평가[25], 불꽃 및 복사열 노출에 대한 다층 보호복의 열 특성 모델링[26,27] 등 국내 연구와 유사한 보고를 포함하여 다각적인 연구가 발표되었다.

화학물질 및 생물학적 제제에 대한 보호 목적의 보호복에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 화학물질 보호복에 관하여 화학물질을 흡수하는 활성탄 적용[28], 발수/발유 성능을 아라미드 직물에 부여하여 방오성능 개선[29,30], 세탁에 따른 인장강도 변화[31], 열 특성에 관한 모델링 및 실험[32,33] 등에 관한 연구가 보고되었다. 생물학적 제제에 대한 보호복 관련해서는 흠뻑러진 혈액에 대한 침투 특성 평가[34] 및 바이러스를 포함하는 액상의 침투 특성 평가[35] 등에 대한 보고가 있다. 이 밖에도 주목받고 있는 신소재 graphene과 wearable electronics 기술 기반 유해가스 센서 적용[36], 형상기억합금 스프링을 활용 열에 대한 보호 성능 개선[37], metal-organic framework를 이용한 화학물질 분해 기능성 부여[38], 온도에 감응하여 색이 변하는 소재를 적용[39] 하는 등 신소재와 신기술을 접목하여 보호복의 성능을 개선시킨 사례도 보고되고 있다(Figure 2 참조).

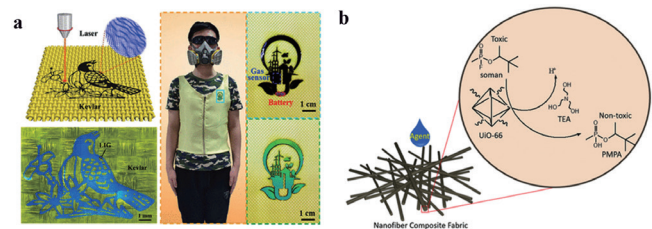


Figure 2. 신소재 접목 보호복 성능 개선 연구 사례: (a) graphene 적용 유해가스 센서 소재[36] 및 (b) metal-organic framework 적용 화학물질 분해 기술[38].

### 3. 유망 보호복 분야

#### 3.1. 바이러스 대응 보호복

2019년 말 발생하여 전세계적으로 유행하고 있는 COVID-19로 인해 이동 제한, 자가격리 및 집합금지 등 대응 정책이 시행됨에 따라 전인류의 지난 18개월은 매우 더디게 흘러왔다. 21세기에 이르러 바이러스에 의한 전염병은 SARS coronavirus (2002.11-2003.07, WHO 통계상 8,096명 감염/774명 사망), MERS coronavirus (2012.04-, WHO 통계상 2,566명 감염/882명 사망),

Ebola virus disease(EVD) (1976-, 대유행시기(2013-2016) WHO 통계상 28,646 감염/11,323명 사망) 등 발생 시기와 지역에 무관하게 산발적으로 유행하며 COVID-19의 전조를 보여왔다.

COVID-19가 유행하며, 2021년 5월 현재 전세계 감염자수는 약 1억 7천만 명에 달하며, 그로 인해 353만 명 이상 사망에 이르렀다. 이와 같이 전 세계적인 COVID-19의 확산을 저지하기 위한 방역 관련 분야의 산업은 그 어느때보다 활발하게 발전해 가고 있다. HIS Markit Global Trade Atlas에 따르면, 2020년 상반기 개인 방역을 위한 마스크 수입시장 규모는 416억 USD, 개인보호장구 181억 USD로 전년 동기 대비 각각 347% 및 50% 성장하였다[40]. WHO는 2020년 3월 COVID-19에 의해 폭증하는 수요에 대응하는 개인 보호구 사용 기준을 발표하였고[41], Energy 학술지에는 마스크 및 개인 보호구 제조에 따른 전력 사용 및 이산화탄소 배출 등 환경에 미치는 영향에 관한 내용을 게재하였으며[42], Marine Pollution Bulletin 학술지에는 사용된 개인 보호구가 해양생태계에 미치는 영향에 관한 내용이 게재되었다[43].

높은 치사율을 보인 SARS 및 MERS 등 지난 신종코로나 바이러스와 COVID-19의 전 세계적인 유행, 바이러스에 의한 인수공통 전염병의 유행 등의 사례로 비추어볼 때, COVID-19 대유행 이후에도 마스크를 포함한 개인 방역물품의 수요는 지속될 것으로 보인다. 따라서, 합리적인 평가 기준에 대한 합의와 낮은 생산 단가, 높은 항바이러스 성능의 달성, 방역물품 폐기물의 친환경적 처분 방법 개발이 요구된다.

### 3.2. 환경 감응형 보호복

앞에서 살펴본 바와 같이 기존의 보호복은 주로 섬유 직물이 가진 강도 및 내열성 등 고유의 특성에 기반을 두고 공기간극 및 기능성 코팅 층 도입 등 성능 개선에 초점을 맞추어 연구개발이 진행되어왔다. 기존의 성과에 더하여, 온도 및 가스 분위기 등 외부 환경에 감응하여 자발적/가역적으로 변화하는 기작을 보호복에 적용할 경우 작업자의 안전을 획기적으로 개선시킬 수 있다. 열에너지에 의한 색변화로 보호성능을 개선시킨 사례[39]와 유사하게 색변화를 통해 위험을 미리 알려 작업자의 안전을 확보할 수 있다. 일례로 한국생산기술연구원에서 개발한 염기성 및 산성에 감응하는 염료를 활용하여 인체에 해로운 기체의 존재를 단시간 내 색변화를 통해 이른 시간에 알릴 수 있다[44-46] (Figure 3 참조). 형상 기억고분자의 경우 100°C 이하에서 온도변화에 의한 형상 변화를 유도할 수 있기 때문에[47], 복사열 등에 의한 급격한 온도 변화를 차단하

는 보호층으로서의 역할을 부여할 수 있다.



Figure 3. 한국생산기술연구원이 개발한 산/염기 감응형 보호복 시제품.

### 3.3. Wearable electronics 적용 보호복

ICT 및 Wearable electronics 구현을 위해 개발된 유연한 이차전지 및 센서, 액추에이터, 발광, 통신 등 저전력 전자 소자를 활용하여 보호복의 기능성을 확대할 수 있다. 발광다이오드(LED)를 적용하여 어두운 작업공간에서 작업자의 위치를 확인시켜 안전성을 확보할 수 있으며, 센서와 통신 소자를 활용하여 체온 및 심박수 등 생체 신호를 모니터링하여 작업자의 건강상태를 수시로 확인하고 이상반응에 대처할 수 있다. 전도성 섬유 패터닝을 활용하여 joule heating 등의 방법을 통해 보호복 표면에 부착된 생물학적 제제 및 유기물을 파괴 및 제거할 수 있을 것으로 보인다.

## 4. 결 언

이 글에서는 보호복의 국내외 연구동향과 유망 보호복 분야에 대해 살펴보았다. 산발적으로 발생하는 대형 화재와 화학 공정상의 사고 발생 등에 의해 보호복의 중요성이 지속적으로 부각되어왔고, COVID-19의 전 세계적 대유행으로 개인보호구의 생산-공급-폐기에 이르는 전주기에 대한 관심이 높아지는

상황이다. 이러한 추세에 발맞추어 해외에서는 새로운 소재와 기술을 접목하여 보호복에 대한 입체적인 연구개발이 이루어지고 있으나, 국내에서는 소방 보호복의 열 특성 개선에 대한 연구를 중심으로 발전되고 있어 영역의 확장 및 신기술 적용 등 세계적 흐름에 발맞추는 노력이 요구된다. 보호복 분야의 획기적인 발전과 글로벌 리더십의 쟁취를 위해 바이러스 대응 기능성, 환경 감응 기작, wearable electronics 기술 적용 등 유망 분야 발굴 및 기술 접목을 통한 활발한 연구개발이 필요할 것으로 보인다.

### 참고문헌

- Protective Clothing Market by Material Type (Aramid & Blends, Polyolefin & Blends, Polyamide, and PBI), Application (Thermal, Chemical, and Visibility), End-Use Industry (Construction, Manufacturing, Oil & Gas, and Mining) – Global Forecast to 2025 2020.
- 윤재건, 김진국, 박상훈, 윤기중. 방화복 시험을 위한 Flash Fire Simulator 의 설계 및 제작. In Proceedings of KOSCO SYMPOSIUM 논문집; pp. 209-212.
- Yun, G.-J. 첨단 보호복 산업과 기술. *Fiber Technology and Industry* 2006, 10, 325-338.
- 윤기중, 홍경아. Spacer 사용에 따른 방화복의 multi layer thermal barrier 의 열적 성질 및 쾌적성에 미치는 영향. *한국섬유공학회지* 2010, 47, 420-425.
- Jin, L., Hong, K.-A., Nam, H., Yoon, K.J. Effect of thermal barrier on thermal protective performance of firefighter garments. *J Fiber Bioeng Inform* 2011, 4, 245-252.
- Jin, L., Hong, K., Yoon, K. Effect of aerogel on thermal protective performance of firefighter clothing. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics* 6, 315-324.
- Jin, L., Park, P.K., Hong, K.A., Yoon, K.J. Effect of Aluminized Fabrics on Radiant Protective Performance of Fire Proximity Suit Materials. *The Annals of Occupational Hygiene* 2014, 59, 243-252, doi:10.1093/annhyg/meu081.
- 박평규, 김로, 윤기중. 용융금속 방호보호복소재의 성능수준 평가. *한국위험물학회지* 2018, 6, 55-61.
- Yoon Kee, J. 소방관의 열 압박에 대한 수분의 영향. *한국섬유공학회지* 2019, 56, 51-58, doi:10.12772/TSE.2019.56.051.
- 박평규, 김로, 김해형, 김영수, 윤병선, 윤기중, 박용환. 국·내외 화학물질 방호용 장화에 대한 화학투과저항성 비교. *한국위험물학회지* 2016, 4, 76-83.
- 방영준, 이준경, 방창훈, 권정숙. 복사열 노출에 따른 소방보호복의 열보호성능 측정. *한국화재소방학회 학술대회 논문집* 2013, 78-79.
- 이준경, 권정숙. 소방보호복 소재의 공기간극이 열보호 성능에 미치는 영향. *한국화재소방학회 논문지* 2014, 28, 97-103.
- 이준경, 방영준, 방창훈, 권정숙. 저열유속 조건의 복사열 노출에 따른 소방보호복의 열보호성능 측정에 관한 연구. *한국화재소방학회 논문지* 2014, 28, 1-8.
- 방창훈, 이준경, 허유섭, 박은주, 권정숙. 현장소방 활동 시 느끼는 소방복 착용만족도 조사. *기초과학지* 2014, 31, 107-115.
- 이윤정, 권정숙, 방창훈, 이준경, 허유섭, 박은주. 소방공무원의 소방방화복과 중량의 보호장비 착용이 신체적, 생화학적 및 인지적 피로요인에 미치는 영향. *한국웰니스학회지* 2016, 11, 195-206.
- 방창훈, 권정숙. 소방용 화학보호복 착용시 신체변화에 관한 연구. *한국방재학회논문집* 2015, 15, 231-236.
- 노유민, 남윤자, 이혜린, 김태한, 김주현, 신상도. 구급대원용 개인보호복 개발을 위한 기초연구. *The Korean Journal of Emergency Medical Services* 2018, 22, 83-97.
- 한설아, 남윤자, 최영림. 한국 소방용 방화복의 치수체계 개발. *한국의류학회지* 2009, 33, 827-839.
- Roossien, C.C., Heus, R., Reneman, M.F., Verkerke, G.J. Monitoring core temperature of firefighters to validate a wearable non-invasive core thermometer in different types of protective clothing: Concurrent in-vivo validation. *Applied Ergonomics* 2020, 83, 103001, doi:https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.103001.
- McQuerry, M., Barker, R., DenHartog, E. Relationship between novel design modifications and heat stress relief in structural firefighters' protective clothing. *Applied Ergonomics* 2018, 70, 260-268, doi:https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.004.
- Mandal, S., Song, G., Grover, I.B. Modeling of hot water and steam protective performance of fabrics used in Firefighters' clothing. *Fire and Materials* n/a, doi:https://doi.org/10.1002/fam.2982.
- Mandal, S., Annaheim, S., Capt, A., Greve, J., Camenzind,

- M., Rossi, R.M. A categorization tool for fabric systems used in firefighters' clothing based on their thermal protective and thermo-physiological comfort performances. *Textile Research Journal* 2018, 89, 3244–3259, doi:10.1177/0040517518809055.
23. Huang, D., Chenning, G. Thermal Protective Performance of Silica Aerogel Felt Bedded Firefighters' Protective Clothing under Fire Conditions. *Materials Science/Medziagotyra* 2017, 23.
  24. Zheng, Z.; Ren, L., Huang, P., Zhao, X. Preparation and properties of silicone coated glass fiber fabrics destined for firefighters' protective clothing. *Pigment & Resin Technology* 2020.
  25. Deng, M., Wang, Y., Li, P. Effect of air gaps characteristics on thermal protective performance of firefighters' clothing. *International Journal of Clothing Science and Technology* 2018.
  26. Puszkarz, A.K., Machnowski, W. Simulations of Heat Transfer through Multilayer Protective Clothing Exposed to Flame. *Autex Research Journal* 2020, 1.
  27. Puszkarz, A.K., Machnowski, W., Błasińska, A. Modeling of thermal performance of multilayer protective clothing exposed to radiant heat. *Heat and Mass Transfer* 2020, 1–9.
  28. Tripathi, N.K., Singh, V.V., Sathe, M., Thakare, V.B., Singh, B. Activated Carbon Fabric: An Adsorbent Material for Chemical Protective Clothing. *Defence Science Journal* 2018, 68.
  29. Yeerken, T., Yu, W., Feng, J., Xia, Q., Liu, H. Durable superamphiphobic aramid fabrics modified by PTFE and FAS for chemical protective clothing. *Progress in Organic Coatings* 2019, 135, 41–50.
  30. Shen, C., Ding, L., Wang, B., Xu, H., Zhong, Y., Zhang, L., Mao, Z., Zheng, X.; Sui, X. Superamphiphobic and chemical repellent aramid fabrics for applications in protective clothing. *Progress in Organic Coatings* 2018, 124, 49–54.
  31. Ijaz, M., Kalsoom, S., Akthar, N.A. Effect of Laundering on Tensile Strength of Chemical Protective Clothing Materials. *Technical Journal* 2019, 24, 63–68.
  32. Xu, X., Rioux, T.P., Pomerantz, N., Tew, S., Blanchard, L.A. Heat strain in chemical protective ensembles: Effects of fabric thermal properties. *Journal of thermal biology* 2019, 86, 102435.
  33. Yang, J., Song, G., Wang, L., Su, Y., Xiang, C. Numerical simulation of heat stress in chemical protective clothing. *J Textile Eng Fashion Technol* 2017, 2, 418–422.
  34. Shimasaki, N., Shinohara, K., Morikawa, H. Performance of materials used for biological personal protective equipment against blood splash penetration. *Industrial health* 2017, 55, 521–528.
  35. Shimasaki, N., Okaue, A., Morimoto, M., Uchida, Y., Koshiha, T., Tsunoda, K., Arakawa, S., Shinohara, K. A multifaceted evaluation on the penetration resistance of protective clothing fabrics against viral liquid drops without pressure. *Biocontrol science* 2020, 25, 9–16.
  36. Wang, H., Wang, H., Wang, Y., Su, X., Wang, C., Zhang, M., Jian, M., Xia, K., Liang, X., Lu, H., et al. Laser Writing of Janus Graphene/Kevlar Textile for Intelligent Protective Clothing. *ACS Nano* 2020, 14, 3219–3226, doi:10.1021/acsnano.9b08638.
  37. He, J., Lu, Y., Wang, L., Ma, N. On the Improvement of Thermal Protection for Temperature-Responsive Protective Clothing Incorporated with Shape Memory Alloy. *Materials* 2018, 11, 1932.
  38. Dwyer, D.B., Dugan, N., Hoffman, N., Cooke, D.J., Hall, M.G., Tovar, T.M., Bernier, W.E., DeCoste, J., Pomerantz, N.L., Jones, W.E. Chemical Protective Textiles of UiO-66-Integrated PVDF Composite Fibers with Rapid Heterogeneous Decontamination of Toxic Organophosphates. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2018, 10, 34585–34591, doi:10.1021/acsaami.8b11290.
  39. Geng, X., Li, W., Wang, Y., Lu, J., Wang, J., Wang, N., Li, J., Zhang, X. Reversible thermochromic microencapsulated phase change materials for thermal energy storage application in thermal protective clothing. *Applied Energy* 2018, 217, 281–294, doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.150.
  40. K-방역, 타깃시장 세분화로 수출활로 개척. *의료기기뉴스라인* 2020.

41. Rational use of personal protective equipment (PPE) for coronavirus disease (COVID-19): interim guidance, 19 March 2020; World Health Organization: 2020.
42. Klemeš, J.J., Fan, Y.V., Jiang, P. The energy and environmental footprints of COVID-19 fighting measures - PPE, disinfection, supply chains. *Energy* 2020, 211, 118701, doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118701>.
43. De-la-Torre, G.E.; Aragaw, T.A. What we need to know about PPE associated with the COVID-19 pandemic in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 2021, 163, 111879, doi:<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111879>.
44. Park, Y.K., Oh, B.M., Jo, A.R., Han, J.H., Lim, J.Y., Oh, H.J., Lim, S.J., Kim, J.H., Lee, W.S. Fabrication of Colorimetric Textile Sensor Based on Rhodamine Dye for Acidic Gas Detection. *Polymers* 2020, 12, 431.
45. Oh, H.J., Yeang, B.J., Park, Y.K., Choi, H.J., Kim, J.H., Kang, Y.S., Bae, Y., Kim, J.Y., Lim, S.J., Lee, W., et al. Washable Colorimetric Nanofiber Nonwoven for Ammonia Gas Detection. *Polymers* 2020, 12, 1585.
46. Park, Y.K., Oh, H.J., Bae, J.H., Lim, J.Y., Lee, H.D., Hong, S.I., Son, H.S., Kim, J.H., Lim, S.J., Lee, W. Colorimetric Textile Sensor for the Simultaneous Detection of NH<sub>3</sub> and HCl Gases. *Polymers* 2020, 12, 2595.
47. Hong, S.J., Yu, W.-R., Youk, J.H. Two-way shape memory behavior of shape memory polyurethanes with a bias load. *Smart Materials and Structures* 2010, 19, 035022, doi:10.1088/0964-1726/19/3/035022.