

소방대원 개인보호용 전자장비 패키징 기술개발

박우태¹ · 전지원¹ · 최한택² · 우희권² · 우덕하³ · 이상엽^{3,+}

Thermal Packaging for Firefighters' Personal Protective Electronic Equipments

Woo-Tae Park¹, Jiwon Jeon¹, Han Tak Choi², Hee Kwon Woo², Deokha Woo³, and Sangyoup Lee^{3,+}

Abstract

While the conventional personal protective equipments (PPEs) covers a variety of devices and garments such as respirators, turnout gear, gloves, blankets and gas masks, several electronic devices such as personal alert safety system (PASS) and heads-up displays in the facepiece have become a part of firefighters personal protective equipments through past several years. Furthermore, more advanced electronic sensors including location tracking sensor, thermal imaging camera, toxic gas detectors, and even physiological monitoring sensors are being integrated into ensemble elements for better protection of firefighters from fire sites. Despite any electronic equipment placed on the firefighter must withstand environmental extremes and continue to properly function under any thermal conditions that firefighters routinely face, there are no specific criteria for these electronics to define functionability of these devices under given thermal conditions. Although manufacturers provide the specifications and performance guidelines for their products, their operation guidelines hardly match the real thermal conditions. Present study overviews firefighter's fatalities and thermal conditions that firefighters and their equipments face. Lastly, thermal packaging methods that we have developed and tested are introduced.

Keywords: Firefighter, Electronic equipments, Sensors, Thermal conditions, Thermal packaging

1. 서 론

건축 및 토목 기술 발달은 현대 사회 기반 시설들의 대형화 및 집중화시키고 있다. 또한, 철도망, 도로망, 정보망과 같은 각종 네트워크는 급속도로 고밀도화 되고 있다. 이에 따라 태풍, 지진, 해일, 홍수 등의 자연재난 및 화재, 붕괴, 폭발, 교통 및 화재방사, 환경오염사고 등의 인적재난 그리고 폭동, 테러, 대규모 시위, 전염병 등의 사회적 재난의 영향이 동시 혹은 연쇄

적으로 파급되어 우리사회는 피해가 예측할 수 없을 정도로 가중되는 사회적 복합재난에 취약한 구조로 빠르게 변화 중이다.

반면, 구난, 구조의 방법론은 현대적인 안전장치들의 적용에도 불구하고 재난환경의 빠른 변화와는 달리 다소 더디게 발전하고 있다. 일례로 미국화재예방협회(National Fire Protection Association, NFPA)의 보고서에 따르면 2014년 임무 중 순직한 소방대원의 수는 64명으로 10여년전인 1992년 75명, 1993년 79명과 비교해서 큰 변화를 찾기 어렵다[1]. 우리나라에서도 매년 10여명의 소방대원이 순직하고 있으며, 공상 소방공무원의 수 또한 연평균 330명에 이른다. 2011년 기준으로 미국과 전체 소방대원수를 비교했을 때 1만명당 순직자 수는 1.85명으로 미국의 1.01명에 비해 매우 높은 수치이다.

소방관이 착용하는 방화복, 방염복, 공기마스크 등 개인 보호 장비들은 기술적 발달과 함께 그 성능이 거듭 향상되고 있다. 이러한 현대적 안전장비들 덕분에 화염, 열, 유독가스와 같은 화재현장의 위험요인들로부터 충실히 보호를 받을 수 있지만, 현장상황에 대한 인지 및 판단은 여전히 소방대원들의 경험에 의존하고 있기 때문에 위험 수준에 달한 화재현장에서의 다양한 위험인자에 노출되어 있다고 할 수 있다.

재난안전에서의 센서기술은 재난현장에서의 위험수준에 대한 정보를 정성적 및 정량적으로 제공하여 소방대원들로 하여금 위

¹ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과(Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

232 Gongneung-ro, Nowon-gu 599, Seoul 01811, Korea

² 에이스웨이브텍(주) (Acewavetech)

#804 Bldg. B, Smart Valley, 214 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea

³ 한국과학기술연구원 (Korea Institute of Science and Technology)

5 Hwarang-ro, 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea

⁺ Corresponding author: sangyoup@kist.re.kr

(Received : Sep. 4, 2015, Accepted : Sep. 17, 2015)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

험상황에 대한 판단을 빠르고 정확히 내릴 수 있도록 할 수 있다. 소방대원의 경우 가스센서, 위치센서, 개인용 알람(Personal Alert Safety System, PASS), 복사열 및 온도센서, 열상카메라, 통신장비 등과 같은 전자장비는 현장상황에 대한 정보를 소방대원에게 제공하고 공유함으로써 위험인자에 대한 능동적 대비를 가능하도록 할 수 있기 때문에 미국을 중심으로 소방대원 개인 보호를 위한 각종 위험요인 감지 센서들에 대한 표준화가 진행되고 있다.

이러한 센서들은 현장에 출동하는 소방대원들에게는 생명보호를 위해서 꼭 필요한 도구이지만, 착용의 편의성 정도에 따라 출동시간의 지연, 장비 중량 증가에 따른 피로감 증가, 유연성 및 운동성 감소, 무게중심변화에 따른 낙상 등의 사고를 초래[2] 할 수 있기 때문에 소방대원 보호용 센서개발에 있어서 경량화와 소형화는 필수적인 설계요소이다. 또한, 이러한 전자장비들은 소방대원의 생명보호와 직결되기 때문에 실제 열환경에서의 안정성 확보는 무엇보다 중요하며[3] 안정성 확보를 위한 전자장비 패키징은 필수적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 소방대원의 주요 사망원인과 소방대원의 생명을 위협하는 위험 요소 및 열환경에 대해 살펴보고 실제 화재 환경에서 소방대원과 각종 위험요인 감지 센서 및 전자장비들이 직면하는 열환경에 대한 리뷰를 수행하였다. 또한, 본 연구에서는 본 연구진이 개발한 소방대원의 방호복 외부에 부착되는 각종 센서 및 경보장치와 같은 전자장비들이 고온 및 다습한 실제 화재환경에서도 신뢰성있게 작동할 수 있는 전자장비 패키징 기술에 대해 소개한다. 방수/내열 기능을 위해 재료선정과 설계인자들을 선정하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 선정된 디자인을 복사열 실험과 고온조 실험을 통하여 평가하였다. 그 결과 선정된 디자인을 지능형 소방복개발 연구에 활용하였다.

2. 소방현장의 위험요인

2.1 소방대원의 순직유형

화재현장은 화염뿐만 아니라 고온의 독성가스와 열복사, 붕괴, 폭발과 같은 위험인자가 존재하는 공간이기 때문에 소방대원이 맞닥뜨리는 위험은 매우 복잡적이다. 소방업무는 높은 직업관련 사망률에서 쉽게 확인할 수 있듯이 수많은 잠재적 위험요인이 도사리는 극도로 위험한 업무이다. 미국의 경우 미국립 방재협회(National Fire Protection Association, NFPA)이 매년 발간하는 미국 소방관 재해 보고서[1]의 2014년 통계에 따르면, 소방대원의 순직 사고유형은 Fig. 1에서 확인되듯이 충돌, 붕괴, 고립, 구격, 낙상, 폭발, 탈진 등 다양한 형태의 사고형태를 포함하며 이러한 다양한 사고 형태는 질식, 내상, 화상, 급성 심장질환에 의한 사망 유형으로 이어진다. 흥미로운 사실은 일반인이 상상하는 것과 달리 폭발, 붕괴, 낙상, 고립 등과 같은 직접적인

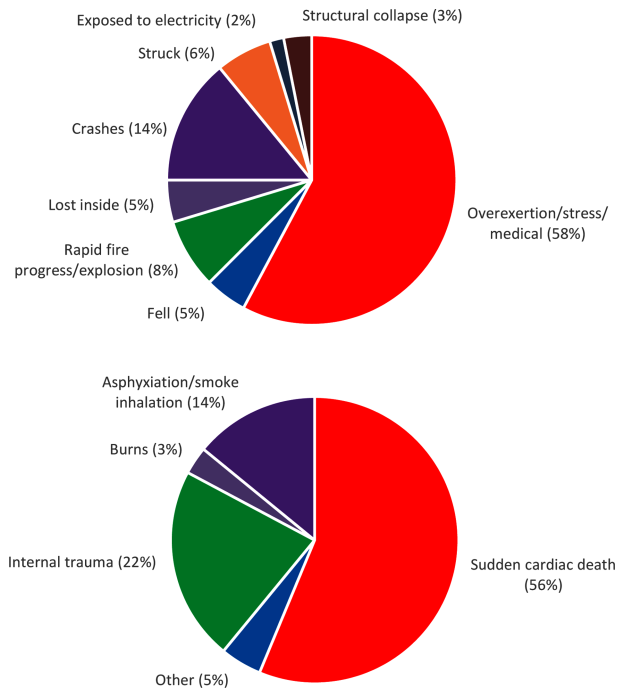


Fig. 1. US Firefighter deaths by cause of injury (a) by nature of injury (b)[1]

외상에 의한 사망보다는 과도한 운동강도와 스트레스에 따른 급성 심장사가 약 60%를 차지하는 것으로 보고되고 있다[1]. 급성 심장마비가 주사망요인인 까닭은 고온하에서 수행되는 격렬한 소화작업, 탈수, 예측 불가능한 출동시기에 따른 긴장감에 의한 심리적 압박, 일상에서의 비운동상태와 극명하게 대비되는 화재 현장에서의 급작스러운 운동부하, 화재 현장에서 주위에 상존하는 위험요인에 대한 인지 기능의 저하에 따른 죽음의 공포로 인한 스트레스, 외상후 스트레스 장애 등이 복합적으로 작용하는 것으로 분석되고 있다[2,4].

현장에 투입된 소방대원의 위치와 위험 수준에 달한 화재현장 온도 및 가연성 가스의 농도와 같은 외부위험요인 및 소방대원의 심박, 호흡, 동작상태와 생리학적 신호와 같은 정보를 감지하여 소방대원 및 현장지휘관에게 실시간 제공하고 플래쉬오버(flashover)로 인한 폭발 및 붕괴 전에 현장에 투입된 대원들이 대피 또는 탈출할 수 있도록 하는 센서와 경보 장비의 개발은 소방대원의 생명을 보다 능동적으로 보호할 수 있을 것으로 믿어지고 있다. 하지만, 서론에서 언급한 바와 같이 이러한 전자 장비의 경량화와 내열성 및 내구성 등 해결해야할 문제가 아직 많은 상황이다. 또한, 이러한 센서 및 경보 기술들이 실용화될 경우 소방대원들이 과거에는 인지할 수 없었던 위험상황이나 응급상황에서 새로운 장비에 과도한 의존도를 보일 수 있기 때문에 소방대원들은 장비들이 가지고 있는 한계에 대한 확실한 이해가 필요한 반면 연구개발자는 소방대원이 직면하는 열 환경에 대한 정보를 면밀히 분석할 필요가 있다.

Table 1. Recommendations for the thermal class[3]

Thermal Class	Max. Time (min.)	Max. Temp. (°C)	Max. Heat Flux (kW/m ²)
I	25	100	1
II	15	160	2
III	5	260	10
IV	< 1	> 260	> 10

2.2 화재현장의 열환경

화재현장에서의 열환경은 발화원, 초기 환경, 가연물의 조합과 공간적 배열, 환기조건 등에 따라 매우 상이하다. 새로운 장비와 시험 프로토콜을 준비하기 위해서는 열환경에 대한 정보가 필요하다. 실제 응급상황에서 소방대원은 구조, 구난활동에 집중해야 하기 때문에 데이터 수집이 어렵기 때문에 열환경 정보는 소방대원이 실증 상황에서 훈련시나리오에 따른 훈련을 수행하는 과정에서 수집되는 것이 일반적이다.

열환경은 온도와 열유속을 바탕으로 분류되고 있다[5-10]. 열환경 등급은 소방대원이 직면하는 위험을 온도, 열유속으로 분류함으로써, 소방대원이 주어진 열환경하에서 견딜 수 있는 시간에 대한 가이드라인으로 사용될 수 있다. 일반적으로 3개에서 4개의 등급으로 나뉘어지게 되는데, 여러가지 열환경 클래스 분류를 통합하여 Donnelly et al.[3]는 열환경 등급에 대한 분류를 Table 1과 같이 제시하였다.

열환경 등급 중 Class I과 II는 소방관이 비교적 낮은 위험하에서 임무를 수행할 수 있는 등급이다. 소방대원이 휴대하는 전자장비는 상당시간동안 이러한 열환경에서 반복적 사용시에도 정상 동작해야 한다. Class III는 소방대원이 상당히 큰 화재에 직면한 경우로 위험한 조건으로 소방대원이 정상적인 작전수행할 수 있는 상한선으로 여겨지고 있다. 일반적으로 화재환경은 Class I 또는 II 하에서 발달하여 Class III에 도달하기 때문에 소방대원이 휴대하는 전자 장비 또한 낮은 등급의 열환경과 높은 등급의 열환경에 연속 노출되어도 정상적인 작동이 가능해야 한다. 온도상승과 열유속 외에도 화재현장에는 높은 습도환경이 조성될 수 있다. 소화를 위해 물을 뿌리는 경우, 상당한 양의 수증기가 발생하며 수증기는 전자장비에 치명적일 수 있다. 하지만 100°C 이상에서는 습도가 급격히 떨어지기 때문에 습도의 영향은 미미해진다. Class IV는 가장 심각한 열환경 조건으로서 소방대원이 Class IV환경을 벗어날 수 있는 시간은 수초에 불과하며 온도 상승과 열유속은 플래시오버 상황에 견줄 수 있다. 이러한 상황은 현장상황이 급격히 나빠지는 경우에 불가피하게 접하게 되는 상황으로 소방대원이 자주 접하는 상황은 아니라고 알려져 있으며, 개인보호용 전자장비는 이러한 상황에서 작동이 불가능하다.

Forster and Roberts[11]는 개인 안전장비인 방화복과 헬멧 그리고 공기호흡기 등에 센서를 부착하고 이를 착용한 소방관이

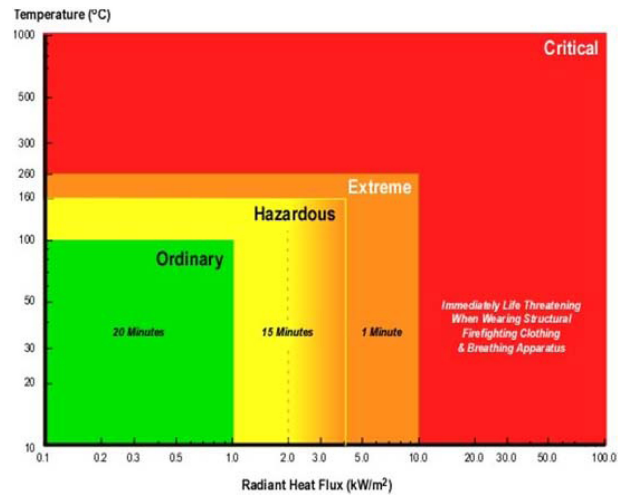


Fig. 2. Thermal Exposure Limits in the Firefighting Environment[11]

열복사와 고온에 노출되어 견딜 수 있는 조건에 따라 소방대원이 노출되는 열환경 등급을 보통(ordinary or routine), 위험(hazardous), 극한(extreme), 임계(critical) 환경으로 분류하였다 (Fig. 1.) 소방대원의 작업환경은 대부분 보통환경에 해당되는데, 고온에 노출되지만 화염으로부터의 열복사는 거의 없는 상태로서 100°C에서 약 25분간 견딜 수 있는 조건이며, 열복사는 1 kW/m² 수준이다. 위험환경은 소방대원이 고온과 열복사로 인해 짧은 시간동안만 작전을 수행할 수 있는 조건이다. 소방대원이 견딜 수 있는 시간은 160°C에서 약 10분 정도이며 열복사는 약 4 kW/m² 수준이다. 극한환경은 플래시오버 환경에 가까운 조건이기 때문에 재빠른 구조가 가능할 수 있으나 철수를 해야 하는 상황이 될 수도 있다. 극한환경은 위험환경 이상의 환경조건 중에서 온도조건과 복사열 조건이 235°C 이하, 10 kW/m² 이하인 경우를 가리킨다. 정상 온도하에서 10 kW/m²의 복사열에서 약 1분 정도의 노출은 소방대원에게는 가능하지만, 10 kW/m²의 복사열은 장비의 손상이 야기되기 때문에 작전수행은 불가능하다. 마지막으로 임계환경은 235°C 이상, 10 kW/m² 이상인 경우를 말하며, 이 조건에서의 소방대원 활동은 불가능하다.

2.3 전자장비의 열환경 조건

NFPA 1971 표준안은 온도와 열유속수준에 따른 개인 보호장비 전반에 대한 가이드라인을 제시하고 있어서 개인 보호용 전자장비의 기준으로도 유용하다. NFPA 1971은 보호복과 헬멧, 두건, 장갑, 장화 및 기타 보호장비와 같은 착용형 보호장비에 대한 상한의 가이드라인을 제시하고 있다. 방화복에 대한 내열 실험에 대한 가이드라인의 경우, 260°C의 온도하에서 5분동안 노출 후 방화복 소재에서 발화, 용융, 적하, 분리현상이 발생되어서는 안되며, 또한, 장갑, 두건 등의 열방호성능 (Thermal Protective Performance, TPP)시험은 플래시오버환경에 가까운 83 kW/m²의 열복사하에서 30초의 노출을 견뎌야 한다고 규정

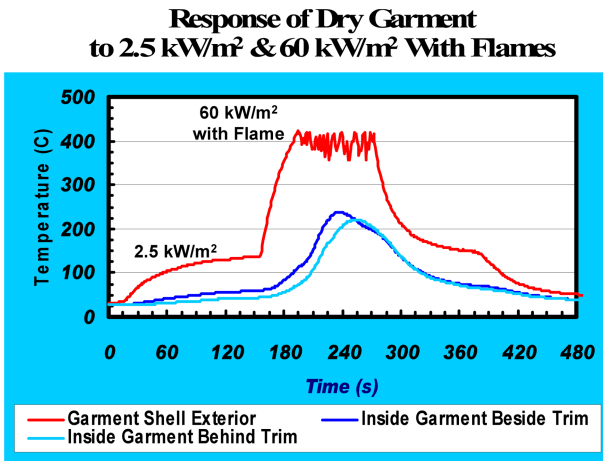


Fig. 3. Thermal protection provided by current firefighter’s thermal protective clothing ensembles[3].

하고 있다.

개인보호용 전자장비는 방화복, 헬멧, 공기호흡기 등의 내부 또는 외부에 위치하게 된다. 열환경 분류법은 방화복의 보호특성에 근거하여 개발되었으며, 이는 전자장비 개발의 기준으로도 권장된다. 개인보호용 전자장비로는 화재현장내 소방대원의 위치를 파악하는데 유용한 위치 추적 장치, 알람을 통해 위급한 소방대원의 위치를 다른 대원에게 알려주는 개인 알람 안전 시스템(Personal Alert Safety System, PASS), 교신과 위치 추적기능을 동시에 가지고 있는 휴대용 양방향 통신장비, 열상 카메라, 가스측정기, 온도 및 열유속 측정기, 음성증폭기 등이 있다. 보다 최근에는 심박 호흡과 같은 기본적인 생체신호측정을 통해 소방대원의 급성 심장사에 대비하는 노력이 이루어 지고 있다. 이러한 전자장비들은 고온, 고습도, 그리고 연기가 많은 환경에 반복적으로 사용해야 하기 때문에 제조 시험평가와 표준을 충족해야 한다. 이러한 장비들은 기본적으로 다른 보호장비와 마찬가지로 생명보호기능을 하는 장비이기 때문에 NFPA 1971 기준 적용을 합리적이라 보고 있다.

일부 PASS는 열감응기능이 포함되어 있어서 소방대원이 극한의 온도에 노출되었거나 있거나 체류시간이 임계점을 도달했을 때 알람을 줄 수 있는데 이러한 장비의 경우 NFPA 1982의 기준을 따르게 되어 있다. NFPA 1982는 PASS 장치에 대한 열저항 기준을 260°C 온도에 5분 노출 후 정상작동으로 제시하고 있는데, 이는 보호복의 성능시험과 동일한 기준이다. 양방향 통신장비나 열상카메라의 경우에는 제조사의 기준을 따르고 있는 상황이며, 기준은 각각 60°C와 70~450°C정도로 설정하고 있다. 가스센서의 경우도 제조사의 기준을 따르고 있는데, 50°C의 기준을 가지고 있어서 실제 상황에 필요한 온도나 열유속 기준에 미치지 못하고 있다.

폭발이 없는 상황에서 가장 심각한 화재환경은 플래시오버 환경이다. 표준 플래시오버 상황(ISO 9750)에서의 열 방출률은 약 1700 kW에 달하며 이때 유통하는 가스의 온도는 400°C를 넘는

고온상태이다. Fig. 4는 현재 NFPA 1971기준을 만족하는 방화복이 어느 정도의 보호기능을 제공하는지 파악하기 위한 실험 결과로서 플래시오버 상황으로 전이되는 과정에서의 열 노출에 따른 방화복 내외부의 온도 변화측정 결과이다[3]. 일반적으로 NFPA 1971은 외피 온도가 300°C에 이를 때까지 내부에 열에 의한 손상이 일어나면 안된다고 제시하고 있다. 실험에서는 2.5 kW/m²의 열복사를 가하고 160초동안 유지 후 60 kW/m²의 화염을 가하여 방화복 내부의 온도변화를 관찰하였다. 복사열만 가해지고 있는 시간동안 방화복의 내외부는 약 100°C의 온도차를 보이다가 화염이 가해졌을 경우 온도차는 150°C에 달하게된다. 방화복 외부의 온도가 약 250°C~300°C 사이에 이르렀을때 내부 온도는 인간이 고통을 느끼거나 화상을 입을 수 있는 온도로 상승하게 되는데, 전자장비가 가진 기능을 정상적으로 제공하기 위해서는 인간이 고통을 느끼거나 화상을 입을 수 있는 온도 조건보다 훨씬 열악한 열환경조건에서도 기능을 만족해야할 것이다.

3. 내열 패키지 실험

3.1 열실험 방법

온도/가스센서 모듈은 소형이지만 소방복 외부에 부착이 되어야 하고, 때로는 500°C 에서 일시적으로는 1000°C 높은 온도에 노출되어도 내구성을 유지하여야 한다. 이러한 이유로 플라스틱 재료로는 다음과 같은 특수 엔지니어링 플라스틱 재료들이 적합하다[12]; Polyimide (PI), Polyphenylene Sulphone (PPSF), Liquid Crystal Polymer (LCP), Polyetheretherketone (PEEK). 이 중 상대적으로 가격이 저렴하고 3D 프린팅 시제품 제작이 용이한 PPSF로 결정하였다. 플라스틱 구조 외부에는 내열성이 더욱 뛰어나며 방수기능을 완수할 수 있는 내열 실리콘 재료를 구조에 맞도록 설계 제작하였다. 그리고 플라스틱 외관이 고온에 견디더라도 내부 전자기판 및 소자들은 120°C 이하에서 정상적으로 작동되기 때문에 내부에 얇고 단열이 잘 되는 재료를 선정하여야 한다. 이중에 가공성이 좋은 코르크 (0.043 W/mK)를 단열재료로 선정하였다. 패키지의 내열성을 평가하기 위해 다음과 같은 단계를 거쳤다.

열시뮬레이션 → 복사열 내부온도 실험 → 고온조 내부온도 실험 → 극한 온도내 통신실험

3.2 열실험 시뮬레이션

열시뮬레이션은 Fig. 4과 같이 내열 실리콘/PPSF/Cork 의 겹구조로 설계하였다. 내열실리콘의 재료특성은 조성과 경도 등 변화할 수 있으나 0.2~0.35 W/(m·K) 정도의 열전도율을 가지고 있다. 본 실험에 사용할 내열 실리콘의 조성은 정확한 정보가 없어서 우선 불리한 조건인 0.35의 열전도율을 사용하였다.

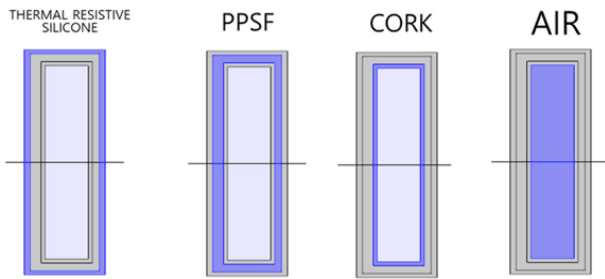


Fig. 4. Layer structure of the package. Thermal resistive silicone/PPSF housing/Cork inner-liner is the three layer structure.

Table 2. Material properties used for the simulation

	Silicone	PPSF Housing	Cork
Density(kg/m ³)	1.16E3	1.28E3	400
Thermal Conductivity (W/(m·K))	0.35	0.35	0.065
Heat capacity(J/(kg·K))	1000	351	1500

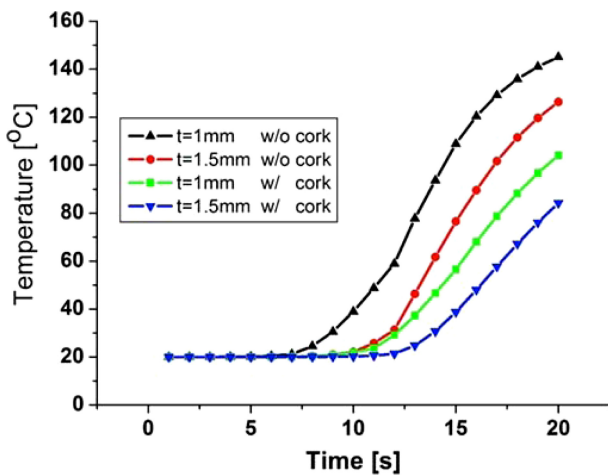


Fig. 5. Thermal simulation of the core temperature of the package. 't' is the silicone thickness.

시뮬레이션에 사용한 물성치는 Table 2와 같다.

경계조건으로는 시작과 동시에 왼쪽벽이 250°C에 놓인다고 가정하고 내열실리콘의 두께와 코르크의 유무로 변수를 주고, 시간에 따른 내부공기의 온도를 추정하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 시뮬레이션 결과 코르크 없이도 전자소자들이 위치한 패키지 내부는 120°C 이하로 15초까지 견딜 수 있고, 코르크 단열재가 있으면 같은 시간동안에 80°C 이하로 견딘다고 추정할 수 있다. 본 시뮬레이션은 실험조건과는 상이하며 좀 더 가혹한 조건이라고 볼 수 있다.

3.3 복사열 및 고온조 실험결과

열실험은 모듈이 소방대원들이 처하게 되는 극한의 화재현장 속에서 제 기능을 발휘하는지의 여부를 판단, 예측하기 위



Fig. 6. PPSF case covered with heat resistant silicone cover(left) and button type temperature logger (right).

Table 3. Radiation heat flux experiment

Condition	Radiation heat flux	Exposure time	Maximum internal temp	Surface temp
Case+Cover	10 kW/m ²	3 min 30 s	51°C	270°C
Case+Cover	20 kW/m ²	4 min	64°C	270°C
Cover only	10 kW/m ²	4 min	93°C	270°C
Cover only	10 kW/m ²	5 min	109°C	270°C

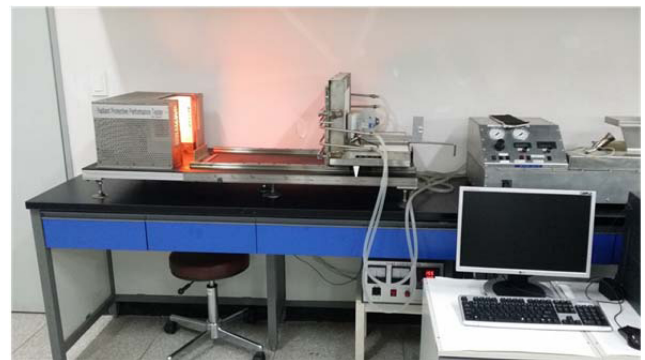


Fig. 7. Radiation heat flux instrument. Higher heat flux is given by reducing the distance between the heat source and subject.

하여 시행되었다. 실험기는 내열성, 단열성이 좋은 PPSF (Polyphenylsufone)를 3d 프린터를 이용하여 제작한 케이스와 내열성이 좋은 실리콘 커버(Fig. 6 left) 속에 실시간으로 온도를 측정할 있는 버튼형 온도 센서(Maxim Integrated iButton Temperature logger, DS1921H)(Fig. 6 right)를 내장하여 온도를 측정하였다.

복사실험은 복사열시험기(Fig. 7)에 모듈을 고정하여 복사열을 모듈에 일정하게 노출시켜 패키지의 표면 온도가 270°C도달하였을 때를 실험의 초기상태로 지정하였고 내부한계온도는 모듈에서 쓰일 기관과 각종 소자들의 한계온도인 120°C로 지정하였다.

실험은 복사 열유속을 10 kW/m²에서 20 kW/m²로 내열성이 강한 full packaging (PPSF case+silicone cover)에서 silicone cover only로 실험 강도를 점점 더 혹독한 조건으로 변화하여 실행하였다. 복사열 실험결과 (Table.3) silicone cover만으로도 표면 온도가 270°C, 열유속 10 Kw/m²에 5분동안 노출 되었을 때 내부 온도가 109°C까지 도달하는 것을 측정하여 NFPA 성능 규격 시

Table 4. Various oven heat flux experiment

Experiment type	Temp condition	Exposure time	Maximum internal temp
Oven	260°C	5 min	43°C
Convection	260°C	5 min	63°C



Fig. 8. Oven for heat flux measurement.



Fig. 9. Convection heat flux instrument.

험을 만족하였고 각종 센서와 소자들을 극한의 화재환경 속에서 작동을 할 것이라고 예상을 하게되었다. 이로서 전자장비의 구조를 이루는 패키징의 재료도 가공성과 경제성이 더 뛰어난 Polycarbonate (PC)로 치환하여도 무방하다는 신뢰가 생겼다.

고온조실험은 오븐(Fig. 8)에 270°C로 온도를 맞췄을 때 패키지를 넣고 모듈의 내부온도를 측정하였다. 대류온도 실험은 대류실험기(Fig. 9)에 270°C로 온도를 고정하고 강제대류를 일으켰을 때의 모듈의 내부온도를 측정하는 실험이다. 고온조내를 강제대류시켰을 때 열전달이 더 높으므로 일반 고온조 실험보다 더 혹독한 실험이다. 위의 Table 4에서 보여지는 것과 같이 각각 5 min 동안 노출 시켰을 때 모듈의 내부 온도는 각각 43°C, 63°C로 극한의 환경 속에서 모듈이 정상 작동을 할 것이라고 예상되어졌다.

4. 결 론

소방대원이 화재현장에서 사용하는 개인 보호용 전자장비가 화재현장의 열환경하에서 본연의 기능을 발휘하기 위해서는 방

화복, 헬멧등과 같은 일반적인 개인보호장비와 같은 기준에서 평가되어야 한다. 현재는 미국에서도 PASS를 제외하면 제대로 된 표준안이 마련되어 있지 않고 현장 상황과는 괴리가 존재하는 제조사의 성능 가이드라인과 사양을 따르게 되어 있기 때문에 전자장비의 우수한 기능에도 불구하고 현장에서의 효용성은 아직 검증해야할 부분이 많이 존재하는 상황이다. 본 연구에서는 현장 상황에서도 전자장비들이 정상기능을 할 수 있는 열패키징 설계 및 실험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 소방대원 보호복에 사용되는 전자장비의 내열 및 방수 패키징을 개발하였다. 내열 및 방수재료를 선정하고, 열 시뮬레이션과 복사열 및 고온조 내열 실험을 통하여 패키지를 평가하였다. 개발된 패키지는 Forster & Roberts[11]의 연구에서 규정하는 ‘Extreme’한 환경(>250°C)에서 5분 이상 견딜 수 있다는 사실이 규명되었다. 본 연구에서 개발된 전자장비 패키지는 새롭게 개발되는 지능형 소방대원 보호복 개발에 바로 사용될 수 있어 소방대원 보호에, 그리고 궁극적으로 화재현장에서의 인명피해를 줄여 안전한 소방환경에 기여할 것이다.

감사의 글

본 과제는 국민안전처 소방안전 및 119 구조 구급 기술 연구 개발사업 (MPSS-소방안전-2012-60)의 지원을 받아수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] R. F. Fahy, P. R. LeBlanc, and J. L. Molis, *Firefighter Fatalities in the United States - 2014*. National Fire Protection Association, 2015.
- [2] D. L. S. et al, *Firefighter Fatalities and Injuries: the Role of Heat Stress and PPE*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
- [3] M. K. Donnelly, B. A. F. R. L. U.S, W. D. Davis, J. R. Lawson, National Institute of Standards and Technology (U.S.), and M. J. Selepak, *Thermal Environment for Electronic Equipment Used by First Responders*, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1474, Jan. 2006.
- [4] S. N. Kales, E. S. Soteriades, C. A. Christophi, and D. C. Christiani, “Emergency duties and deaths from heart disease among firefighters in the united states”, *N. Engl. J. Med.*, Vol. 356, No. 12, pp. 1207-1215, Mar. 2007.
- [5] W. Ordianz, *Work in hot environments and protection against heat*. 1970.
- [6] N. J. Abbott and S. Schulman, “Protection from fire: Non-flammable fabrics and coatings,” *Journal of Industrial Textiles*, vol. 6, no. 1, pp. 48-64, Jul. 1976.
- [7] Arthur D. Little, Inc and G. C. Coletta, *The Development of Criteria for Firefighters' Gloves: Gloves criteria and test methods*. 1976.

- [8] F. J. Abeles, "Project fires. Volume 2: Protective ensemble performance standards, phase 1B," *NASA STI/Recon Technical Report N*, Vol. 80, p. 32586, May 1980.
- [9] U. F. Administration, *Fire In the United States*. FEMA, 1985.
- [10] U. S. F. A. O. O. F. H. A. Safety, *Minimum Standards on Structural Fire Fighting Protective Clothing and Equipment - a Guide for Fire Service Education and Procurement*. 1992.
- [11] J. A. Foster and G. V. Roberts, *Measurements of the Fire-fighting Environment Summary Report*, Fire Engineers Journal, 1994.
- [12] A. Parkes, "The UK plastic heritage (BPF, 2012)," *plastic.org*.