

## 현장 소방활동 중 소방공무원 화상사고 사례 분석 연구

최신웅\* · 이소연\*\*†

# Case Studies of Firefighter Burns Safety Accident during Fire-fighting Activities

Sin-woong Choi\* · So Yun Lee\*\*†

### †Corresponding Author

So Yun Lee

Tel : +82-41-559-0583

E-mail : soyun2@korea.kr

Received : October 26, 2022

Revised : November 26, 2022

Accepted : December 7, 2022

**Abstract** : The purpose of this study is to analyze four cases of firefighter burns in various fire scenes and to find prevention measures to decrease firefighter injuries. Among the analysis reports prepared by the National Fire Research Institute of Korea from 2016 to 2020, four burn-related accidents are summarized and the main causes are conveyed. The four accidents include second-degree burns from using extinguishers during containment of fires; nine firefighters burned due to re-ignition in the LPG car repair shop; two firefighters injured with third-degree burns from using fire extinguishers during life-saving events in residential housing; and injuries from the radiant heat of the tank BLEVE near the factory fire. These cases are comprehensively investigated in their respective scenes and analyzed based on the fire site investigation reports from the fire department and related theoretical explanations of risk for each accident scene. In the third case study, some experimental research is conducted to evaluate the risk involved with the use of safety gloves. This is evaluated by reviewing Fire Tactics and Standard Operational Procedures (SOP) to determine improvements and recommendations for an efficient firefighting response. Results show that the main causes of burn accidents are the insufficient use of personal protective equipment (PPE), such as safety gloves, and the failure to follow firefighting tactics or SOPs. Through the accident investigation and assessment, it is concluded that to reduce the frequency of burn accidents, the performance of firefighting equipment, SOPs, protection tactics, and safety policy systems require improvement.

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : firefighter, fire-burn, firefighter injury, accident investigation, reduction of accident

## 1. 서론

일반적으로 화상의 좁은 의미는 직접적인 화염이나 고열에 의해 피부가 손상된 상태를 말하며, 넓은 의미로는 전기, 화학물질, 자외선, 방사선, 레이저 등 어떠한 이유에서 피부의 단백질이 변성되어 입은 손상 또는 특수 화상으로 정의하고 있으며, 화상부위 깊이에 따라 1~3(4)도 화상으로 분류된다<sup>1)</sup>. 소방공무원의 안전사고는 다양한 재난현장에서 현장 소방활동 중에 화상을 포함하여 원인, 장소, 부상 부위, 정도에 따라 직·

간접적으로 종종 발생되고 있다.

미국방화협회(National Fire Protection Association, NFPA)의 미국 소방관 부상자 통계자료에 의하면, 부상자 중 화상인원은 2015년도 2,020명, 2018년도에 1,550명으로 보고되고 있으며 각각 전체 부상자의 3.0%를 차지하고 있는 것을 알 수 있다.

소방청(소방정책과 안전계)에서 2020년 1분기 중 현장 소방활동 중 반복적으로 발생하는 화상사고를 경감하기 위한 안전정책을 마련하고자, 전국 소방공무원(50,527명)을 대상으로 임용 시부터 2020. 4. 17.까지 개

\*소방청 보건안전담당관 소방위 (Health & Safety Division, National Fire Agency)

\*\*국립소방연구원 소방정책연구실 공업연구사 (Fire Policy Laboratory, National Fire Research Institute of Korea)

인이 경험한 화상사고에 대한 인식조사를 하였다<sup>2)</sup>. 이 조사에서 취합된 총 242건의 화상사고 분석 결과, 화상 당시 대원의 연령대는 30대(46.3%), 근무경력과 현장 근무경력은 10년 미만인 많았으며, 화상정도는 2도 화상이 66.5%로 가장 많았고, 1도 18.2%, 3도 15.3%의 비율을 차지하였다. 발생부위는 손 부분이 28.5%로 가장 많았으며, 머리(24.8%), 귀(10.3%), 목(10.3%), 다리(8.7%), 어깨(6.6%) 순으로 상체부위가 91.3%로 대부분 차지한다고 보고하고 있다. 이는 2007~2011년 미국 소방관 화상 통계에서도 머리 부근이 38%, 손 또는 팔 30%, 목 또는 어깨 16%, 다리 또는 발 8%로 국내 통계와 유사하게 상체에서 화상이 많이 발생하는 것을 알 수 있다<sup>3)</sup>. 화상 당시 개인보호장비(Personal Protection Equipment, PPE) 착용 유무에서 착용이 81.0%였음에도 손, 머리, 귀 부분에서 많이 발생한 것으로 보아 현장 활동 시 PPE 한계성이 잠재되어 있다고 판단하였다<sup>2)</sup>. 한편 화상 경험 대원이 ‘공무상 재해’로 인정받기 위해 신청한 경우는 74.8%로, 신청 건수의 97.8%가 승인되었으므로, 화상경우 ‘공무상 재해’ 신청을 적극 독려해야한다고 서술하였다<sup>2)</sup>.

화상이 발생하는 메커니즘과 온도와 관련한 국외 연구결과에 의하면, 1도 화상 온도는 48°C, 2도 화상 온도는 55°C에서 15초 노출 시 발생하며, 온도와 노출시간은 중요한 변수다<sup>4)</sup>. 손의 경우 주수하면서 화원으로 방향을 향하고 있어 일반적으로 높은 열유속(High Heat Flux)에 노출되기 쉬우며, 머리 부근의 화상비율이 높은 이유는 열기는 위로 향하는 특성 때문에 상대적으로 높은 위치에 있는 얼굴이나 머리 부근에서 화상이 많이 발생하는 것으로 해석된다<sup>5)</sup>. 화재진압 장갑이 습기의 영향에 따라 화상 가능성을 보여주는 연구<sup>6)</sup>에서는 복사열에 의한 실험에서는 젖은 경우가, 전도열에 의한 실험에서는 마른 경우가 화상을 덜 당하는 결과가 도출되었다. 화상치료 및 연구저널에 의하면, 2005~2009년 화상환자를 분석한 결과, 불꽃화상 20%, 접촉화상 20%, 증기화상이 65%였고, 순간적으로 화상을 입게 되는 증기화상의 위험성은 화재현장에서 소방관들이 항상 인지해야할 요소이다<sup>7)</sup>.

국내 연구결과<sup>8)</sup>에 의하면, 80 kW/m<sup>2</sup> 이상 고열유속(돌발화염) 환경에서의 인체 피부의 온도변화를 예측하였다. 저열유속 10 kW/m<sup>2</sup> 일 때 온도가 완만히 상승하고, 진피 및 피하조직까지 열전달이 이루어져 각 조직의 기저에서 온도가 서서히 상승함을 알 수 있으며, 그로 인해 열유입 후 10.4초 후에 피부에서의 최고온도가 60°C가 되며 손상함수 값이 1이 되어 2도 화상이 발생한다. 만일 고열유속인 80 kW/m<sup>2</sup> 일 경우 소방관이

PPE를 착용하지 않고 화염에 노출된다면, 단 0.5초의 노출로도 2도 화상에 이를 수 있다고 설명한다.

화재를 진압하는 소방활동 현장에는 화상사고가 빈번히 발생하고 있는데, 이는 대부분 PPE를 착용함에도 불구하고 소재 자체의 성능이나 사용편의성 등의 문제로 발생하는 것으로 추정되고, 현장에서 적용되는 소방전술과 현장지휘 및 안전관리와 관련된 표준작전절차의 미진한 점이 직·간접적 원인이 되었을 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구는 소방공무원 화재현장 소방활동 중 반복적으로 발생하는 화상사고를 사례분석을 통해 PPE의 한계와 관련된 현장 위험성을 상황 분석과 연계하여 공학적으로 고찰하고, 소방전술 및 재난현장 표준작전절차(Standard Operating Procedure, SOP)를 검토하여 효율적 현장대응 및 안전정책 개선·권고사항을 도출하는데 목적이 있다.

## 2. 연구대상 및 방법

### 2.1 연구대상

국내·외 화상 통계분석 결과 및 발생 메커니즘을 바탕으로 현장 소방활동 중 발생한 화상사고 중 국립소방연구원이 직접 조사한 대표적 사례(2016~2020년) 4건을 심층 분석하였다.

### 2.2 연구방법

중앙소방학교 소방과학연구실(현, 국립소방연구원)에서는 2016년 6월부터 지방 전문인력 등의 인프라와 미국 NIOSH의 소방관 사망재해 조사 및 예방프로그램(Fire Fighter Fatality Investigation and Prevention Program, FFFIPP)을 벤치마킹하여 현장 안전사고 업무를 시작하였다. 현행 「소방공무원 현장 소방활동 안전관리 규정」(소방청 훈령 제119호, 2020. 1. 23. 제정) 제5조에 따라 대원안전사고를 조사 및 원인분석의 담당부서는 국립소방연구원으로 지정되어 있으며, 소방공무원 순직 등 사고의 조사 시 조사단 편성·운영은 국립소방연구원 소속 연구직을 포함한 2명의 팀원으로 구성되어 사고를 조사·분석·연구하고 있다. 2016년부터 현재까지 직접 현장 조사 및 작성된 분석보고서 중 화상에 관한 사고 4건을 요약, 주요 사고원인 등을 기술하였고, 당시 언론보도, 수행 연구과제 등과 연계하여 최대한 부분적으로 공개하였다. 각 사례는 관할 소방관서의 화재현장조사서, 현장대원사고 조사보고서, 관계자 및 목격자 진술, CCTV, 현장 사진 등을 바탕으로 종합적으로 조사·분석하였고, 필요 시 재현실험으로 검증하였다.

### 3. 연구 결과(사례분석)

#### 3.1 사고 사례 1 : 컨테이너 화재진압 중 2도 화상

2020년 2월 23일 17시 2분경 강원도 ○○시 주택화재 신고로 출동한 선착대인 ○○119지역대 펌프차량이 현장에 도착하였을 때, 주택부지 내 창고 용도의 컨테이너는 화재 최성기였으며 맞닿아 있는 주택으로 연소 확대 중인 상황이었다(Fig. 1).

대원 I 은 개인안전장비를 착용 후 차량에서 하차하여, 방수포를 이용하여 약 40초 간 방수 후 호스 3본을 전개하여 주택마당으로 진입하여 화재진압을 실시하였다.

화재진압 18분 뒤 대원 I 은 손가락 통증을 감지하였고, 초기진압 후 진압장갑을 벗어 부상(화상)을 확인하고 현장에 출동한 구급대에서 응급조치 후 병원으로 이송되었으며, 병원진료 결과, 양측 손가락 마디 5군데 2도 화상으로 3주의 진단을 받았다.

당시 복사열에 의해 훼손된 방화장갑의 손등 부분과 대원 I 의 화상부위 5군데 부위를 비교 확인할 수 있다(Fig. 2). 당시 착용했던 방화장갑 확인 결과, 2017년 11월에 제조되었으며 한국소방산업기술원으로부터 2014.7.14. 기준 「소방용 안전장갑의 KFI 인정기준」으로 시험항목에 합격한 것으로 추정되며, 이는 2019.11.13. 기준, 「방화장갑의 KFI 인정기준」으로 개정되었다.

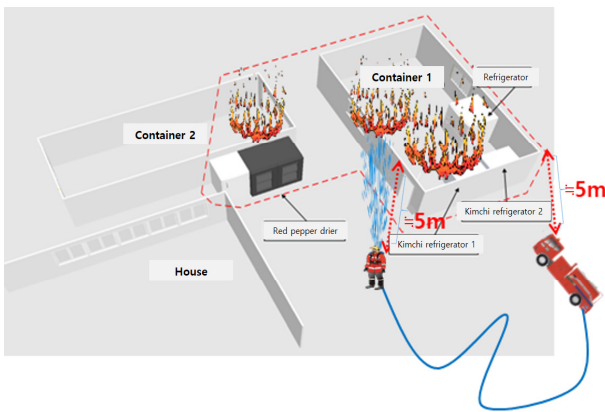


Fig. 1. The fire scene and the response situation.



Fig. 2. The damaged firefighter I's fire gloves and burned hands.

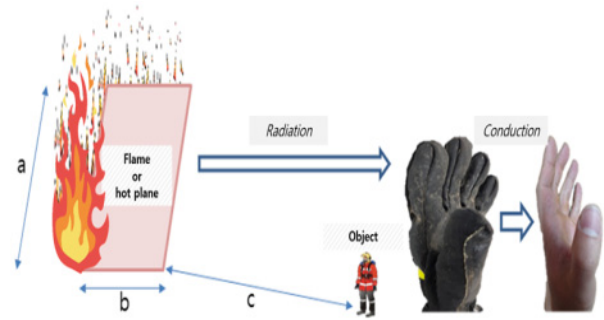


Fig. 3. Heat transfer steps for the firefighter I's hands burn.

상기 화재 대상물로부터 대원 I 이 받는 열유속(Heat flux)의 추정치를 계산하여 현장에서 필요한 방호전술 등 개선·권고사항의 도출로 소방활동 중 화상 관련 안전사고를 예방하기 위해 열전달 메커니즘에 기반한 열유속 계산이 필요하였다. 본 사고 현장은 1차로 최성기에 이르는 뜨거운 열표면과 대원 I 의 방화장갑은 열전달 중 복사와 관련되며, 2차로 방화장갑과 대원 I 의 맨손은 전도와 관련되어 Fig. 3과 같은 열전달이 일어났을 것으로 판단하였다.

열전달(Heat transfer)은 온도차이로 발생하는 에너지의 전달로 단위 면적당 열전달량( $kW/m^2$ )로 표현하고 전도, 대류, 복사의 3가지 형태가 있다. 방사율( $\epsilon$ )은 실제 표면의 방사에너지와 흑체의 에너지의 비를 의미하며, 변형요인(The view factor,  $F_{12}$ )은 방사체로부터 일정 거리에 있는 한 점에서 복사강도 계산 변수로 거리, 열원의 크기, 열유속을 받는 물체의 방향에 따라 결정된다<sup>9)</sup>. 변형요인  $F_{12}$ 를 찾기 위해,  $x$ 는  $a/c$ 로,  $y=b/c$ 로써 계산하는데<sup>9)</sup>,  $a$ 는 Fig. 1의 컨테이너 1의 높이로써 2.6 m,  $b$ 는 폭으로 9 m,  $c$ 는 화염 또는 뜨거운 표면과 대원 I 의 떨어진 거리 5 m를 대입하여 그래프 매칭을 시키면 0.11이 된다. 여기서 방화장갑과 대원 I 의 맨손과의 거리인 장갑의 두께와 동일하므로 일반적 화재진압용 장갑 두께인 약 5 mm로 간주하였다. 당시 화재온도를 추정하면, 일반적으로 완전히 발전된 최성기의 온도는 약  $800 \sim 1,000^\circ C$ 이며, 컨테이너 1의 재질인 Stainless Steel의 용융점은  $1,427^\circ C$ , Fig. 1에서 현장 도착 직후 불꽃색(Orange deep)으로 종합적으로 판단할 때 약  $1,100^\circ C$ 로 추정하였다. 그러나, 화점 방수로 인한 열전달 현상 중 대류, 방화장갑의 내열성, 사용 횟수에 따른 내구성, 습기, 유무, 공기층, 화상을 입은 부분이 전체가 아니라 부분인 점 등은 정확한 수치로 표현되지 못하는 한계가 있어 본 계산에서는 제외하였다. 첫 번째 복사열에 의한 대원 I 이 받는 열유속은 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma T^4 F_{12} = 8.87 \text{ kW/m}^2 \quad (1)$$

$\dot{q}$  : Heat flux

$\varepsilon$  : A emissivity of stainless steels(Typical, lightly oxidized), 0.4

$\sigma$  : Constant of Stefan-Boltzmann,  $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$

T : Kelvin temperature,  $1,100 + 273 = 1,373 \text{ K}$

$F_{12}$  : The view factor, 0.11

수식(1)에서 계산된 열유속 결과를 ‘맨살에 미치는 사고 방사열류의 영향’에 매칭하면 약 12초의 시간에 해당하며, 즉 8.87 kW/m<sup>2</sup>의 열유속(Heat flux)은 약 12초만에 2도 화상에 이를 수 있다는 것을 알 수 있다(Fig. 4).

열유속은 물체의 가열, 손상, 점화 등을 유발하며, 기준점으로써 지표면에 이르는 태양의 복사열류는 약 1 kW/m<sup>2</sup>이며, 화재 조건에서 피해를 유발할 수 있는 열유속의 한계치(최솟값)들은 맨살 고통 ~ 2 kW/m<sup>2</sup>, 맨살 화상 ~ 4 kW/m<sup>2</sup>, 물체 점화 10 ~ 20 kW/m<sup>2</sup>로 참고할 수 있다<sup>9)</sup>. 상기 계산 결과는 복사열에 대한 맨살에 미치는 영향이며, 맨살과 방화장갑 사이의 열침투 시간은 열전달 현상 중 전도와 관련된다. 온도가 1% 증가하는데 걸리는 열침투 시간은 대략  $x^2/12\alpha$  정도이며, 온도가 50% 증가 또는 물질의 표면온도가 갑자기 증가할 때, 물질 내 온도가 어느 정도 거리(x)에서 증가하는데 걸리는 시간은  $x^2/\alpha$ 에 비례한다. 따라서, 방화장갑을 착용한 상태를 고려한 열침투 시간은 아래와 같이 두 가지 공식으로 계산할 수 있다.

$$Time(1\%) = \frac{x^2}{12\alpha} = 24.22 \text{ sec.} \quad (2)$$

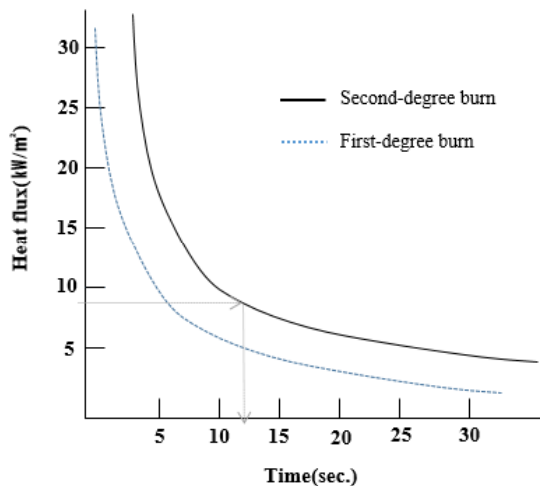


Fig. 4. The effect of radiant heat flow on the skin<sup>9)</sup>.

$$Time(50\%) = \frac{x^2}{\alpha} = 290.7 \text{ sec.} \quad (3)$$

$\alpha$  : A thermal diffusivity( $k/\rho C$ ) of the glove's textile plate

x : The thickness of the glove's textile, 0.005 m

수식 (1)의 계산결과에 의해 8.87 kW/m<sup>2</sup>의 열유속(Heat flux)은 약 12초 경과 후 맨살에 이르는 2도 화상에 노출된다면, 전도에 의해 온도가 1% 증가하는데 열침투 시간은 수식 (2)의 결과와 같이 24.22초이며, 온도가 50% 증가하는데 열침투 시간은 수식 (3)의 결과와 같이 290.7초로 각각 계산되었다. 따라서, 이론적으로 대원 I 이 당시 방화장갑을 착용한 상태에서 화재진압 활동 시 장갑과 맨살 사이의 열이 도달하는데 걸리는 시간은 최소 24.22초 후 발생한다. 또한, 대원 I 의 화재초진 전까지 실제 활동시간은 약 18분(1,080초)으로 상기 계산 결과와 비교했을 때 2도 화상에 이르기엔 충분한 시간임을 알 수 있으며, 급격한 화염으로 인한 복사열과 방화장갑과 맨살 사이의 전도현상으로 내부의 뜨거운 열기가 축적되어 2도 화상을 입은 것으로 추정된다.

사고발생 주요 원인은 급격한 화염으로 인한 복사열과 방화장갑과 맨살 사이의 열전도에 의한 장갑 내부 뜨거운 열기의 축적, PPE(방화장갑) 한계성 인식 부족, 선착대인 119지역대 소방력의 안전 확보 한계 및 전담 현장안전점검관의 부재로 볼 수 있다.

### 3.2 사고 사례 II : LPG 재발화로 소방관 9명 화상

2016년 12월 7일(수) 10:21경 경기도 ○○시 (개인택시 정비센터)에서 정비 중이던 택시를 리프트에 올려놓고 트렁크를 연 후 정비사가 장비를 가지러 가는 중 “평” 하는 소리와 동시에 택시 트렁크 부위에서 화염이 치솟으며 1차로 화재가 발생하였다. 선착대인 A소방서 현장대응단이 LP가스 용기에서 분출되고 있는 화염을 진압하였고, 후착대인 B소방서 ○○119안전센터가 현장 도착하여 완전진화하였다. 이후 B소방서 지휘차가 현장 도착하여 화재발생 차량 주변으로 현장정리 및 인수인계 과정 중 주변 바닥에 체류된 LP가스가 이동식 폐유난로에 인하여 또다시 급격하게 연소 확산되어 현장업무 수행 중이었던 15명의 소방공무원 중 9명(A소방서 5명, B소방서 4명)이 부상(화상)을 입은 사고이다.

당시 15명 소방공무원들의 위치를 분석한 바, Fig. 5에서 처럼 숫자로 표시했고, CCTV 영상을 복원하여

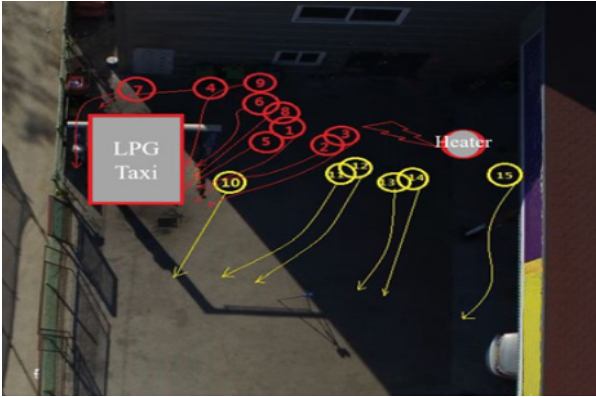


Fig. 5. Evacuating directions of the fifteen number of firefighters at the re-ignition.



Fig. 6. The expansion direction of the explosive combustion.

폭발적 연소확대로부터 대피하는 방향을 각각 표시하였다. 빨간색으로 표시한 ①~⑨ 대원들은 모두 안면부 2도 화상이었으며, 철수단계의 관할 소방서에 인수인계하는 과정이었기 때문에 SCBA를 제외한 기본적인 PPE만 착용하고 있어, 바닥으로부터 연소확대되는 화염을 방호할 수 없었다. 또한 미연소 누설가스와 착화원인 폐유난로와 가까운 앞쪽에 위치하고 있어 더욱 화상을 당할 확률이 높았던 것으로 판단된다.

Fig. 6은 미연소 누설가스에 의해 폐유난로가 2차 착화, 발화되어 약 5초간 폭발적으로 연소가 확대되는 시간대의 CCTV영상에서 이동 방향을 표시하였다.

Fig. 5와 Fig. 6을 함께 검토해보면, ①~⑨ 대원들은 대부분 LPG 차량 방향으로 대피하여 ⑩~⑭ 대원들보다 화상정도가 더욱 심각한 결과를 가져왔다.

사고 당시, 겨울철 상당히 추운 날씨였고 현장에 방문했을 때에도 가스(부취제) 냄새를 인지할 수 있을 정도로 외부 정비 공간에도 LPG가 누출되어 있음을 알 수 있었다. 이로써 LPG의 주요성분에 해당하는 부탄과 프로판이 연소범위 내 조성으로 외부공간 바닥에서부

터 깔려 존재했다는 것으로 볼 수 있다. 주성분인 부탄은 실온, 대기압 상태에서 연소하한계가 1.8%, 연소상한계가 8.4%인 것<sup>10)</sup>으로 볼 때, 외부 공간의 넓은 범위가 연소범위 안에 들어왔을 것이고, LPG연료가 고농도로 누출되었을 만한 위치인 화재발생 차량 리프트 인근에는 연료-공기 혼합물이 조성되었을 것이다.

이 연료-공기 혼합물에 폐유난로에서 불티가 튀면서 인화가 되어 화염전파가 시작되었을 것인데, 화염전파 속도는 전형적인 층류 상태에서 0.1~0.5 m/s가 되고 난류가 발생하면 주름상 화염으로 더 큰 표면적을 가지므로 더 많은 에너지를 가져 더욱 빠르게 연소확대가 이루어졌을 것이다<sup>11)</sup>. 화염이 시작되자마자 현장대원들의 대피움직임이 이를 더 극대화시켰을 것이고, 외부 정비 공간에서 대원들의 동선을 따라 수초만에 화염이 확산되어 이를 피할 수 없었을 것이다. 화재발생 차량 주변에서 대화를 통해 인수인계를 하던 현장대원들은 화재진압이 완료된 상태였기에 안면창을 올린 채 헬멧을 쓰고 있었고, 이는 아래에서 위쪽으로 화염전파가 일어났던 상황에서 안면부에 화염이 돌며 머무르게 하여 화상피해를 극대화시켰던 것으로 판단된다.

따라서 사고 발생 주요원인은 출동 이유였던 화재발생 차량-내부 LPG 연료통에서 누출된 가연성 가스가 바닥에 체류하고 있었고 인근 폐유난로에서 튄 불씨로 인해 발화된 화염확산인 것으로 보인다. 아울러 LPG 연료통의 회수장치를 이용하여 안전하게 회수한 이후 작업을 실시해야 하는 안전수칙을 지키지 않은 것으로 추정된다. 또한, 택시정비업소의 특성 상 LP 가스 체류 등의 상존하는 가연성 분위기 속에 폐유난로를 사용하는 등의 안전불감증이 존재했고, 현장대응 측면에서는 재발화의 점화원이 될 수 있는 이동식 폐유난로의 미제거로 발생한 재발화 사고라고 할 수 있다.

### 3.3 사고 사례 III : 주택화재 인명구조 중 3도 화상

2017년 3월 11일(토) 23:06경 서울시 ○○구 다세대주택 3층 301호 화재현장으로 출동한 구조대원 4명은 인명구조 활동을 위해 현장도착 즉시 2인 1조로 다세대주택 내부로 진입하였다. 먼저 4층 401호에서 구조대상자를 옥상으로 대피시킨 후, 3층 302호의 어린이 2명을 지상으로 구조하였다. 302호에 남아있는 구조대상자 2명을 구조하기 위하여 2조 대원 I, II는 302호에 진입한 후, 301호와 302호 거실 격벽 상부의 이격된 공간(천장으로부터 약 20 cm)을 통한 연소 확대로 퇴로가 차단되어 안방(House #302, Room 1)으로 대피하였다(Fig. 7). 이어서 대원 I은 침대 매트리스로 화염의

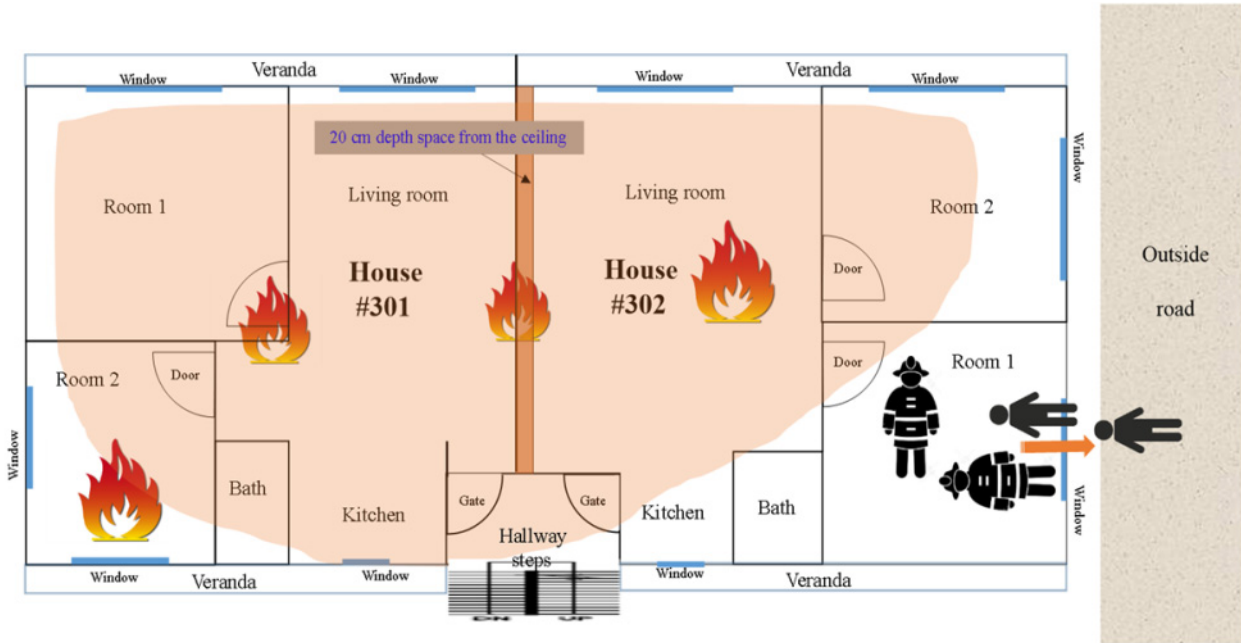


Fig. 7. Structure drawing for lifesaving activities of the first-come rescue team #2 in the fire scene.



Fig. 8. The personal protection equipments used by the two firefighters.

열기를 막고, 대원 II는 안방 창문을 통하여 구조대상자 2명을 탈출시킨 후 창문으로 뛰어내려 탈출하여 허리가 골절되었고, 대원 I은 화염을 뚫고 계단으로 탈출하는 과정에서 목, 손 등에 3도 화상을 입은 사고이다.

당시 대원 I의 PPE 상태는 Fig. 8과 같이 그을음 뿐 아니라, 방화복 어깨 부분이 찢어져 있었고, 안전장갑의 손상도 관찰할 수 있다. 당시 손과 손목에는 3도 화상을, 머리와 목에는 2도 화상을 입었는데 당시 열통과 상황을 재현하고자 「소방용 안전장갑의 KFI인정 기준」을 참고하여 간단히 구현할 수 있는 「열통과시험」을 선택하여 유사한 시험환경을 조성하여 시험하였다. 방법은 시험실 온도를 25℃로 유지하고, 전기로(입구크기 : 가로 20 cm, 세로 25 cm)의 온도를 1,000 ± 30℃로 유지시킨 후, 열전대(K-type)를 전기로 입구에서 100 cm 수평거리에 놓이도록 안전장갑 속 정중앙(몸체부분)에 위치시키고 전기로 문을 개방하였다.

「KFI 열통과시험」과는 다르게 전기로 크기가 상대적으로 커서 장갑에 닿는 열유속이 더욱 클 것으로 판단되어, 장갑의 거리를 인정기준보다 약 2배 되는 100 cm 거리로 설정하였다. 그럼에도 불구하고, 실험실 보유 전기로의 입구크기(면적)가 시험기준에서 제시하는 조건보다 2.5배 크고 전기로의 열용량이 다르므로, KFI 시험방법보다 더 가혹한 조건의 실험이라는 전제하에 실험하였음을 밝힌다. 또한, 장갑의 손목 부분을 묶은 상태를 적용하였는데 이는 장갑을 착용한 상태와 유사한 조건을 만들기 위한 것으로 장갑 입구를 통한 열전달(대류)을 배제하는 효과를 기대하였다. 장갑은 손바닥 면과 손등 면에 대하여 각각 시험하였고, 5분(300초) 경과 동안의 온도 분포를 측정하였다.

Fig. 9에 손바닥 방향 실험 결과(a)와, 손등 방향 결과(b)를 표기하였는데, 300초간 열에 노출된 기간을 그래프 바탕에 음영으로 나타내었다. ‘구조장갑’은 A사

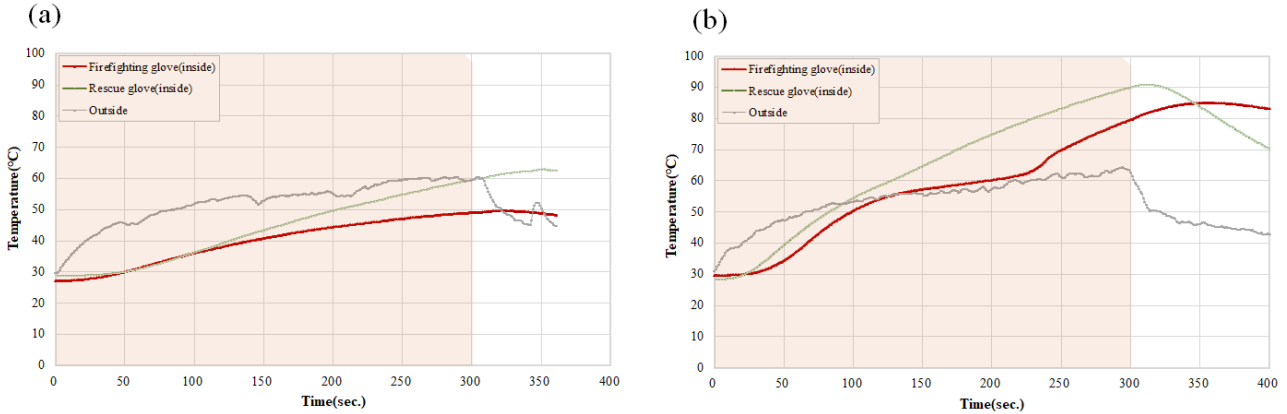


Fig. 9. Temperature change inside the gloves according to the heat-exposure time of the safety gloves. (a) the palms of hands (b) the back of hands.

제품을, ‘진압장갑’은 B사 제품을 명명한 것이며, 손바닥이 전기로 입구와 마주보는 방향으로 위치시킨 경우, 즉 Fig. 9-(a)는 장갑 내부 온도가 5분 경과시 50~60°C에 도달하였다. 이 경우, 150초 경과한 후부터 장갑 내부온도가 장갑 종류에 따라 달라지기 시작하여 300초 지났을 때는 진압장갑이 구조장갑보다 10°C 더 높은 온도가 되었다. Fig. 9-(b)의 손등 실험결과는 손바닥보다 높은 온도(80 ~ 90°C)까지 도달하여, 진압, 구조장갑 모두 손등보다 손바닥면이 단열성능이 높음을 알 수 있다. 손등 방향 실험에서는 100초만 경과하여도 장갑 속 온도가 50°C 이상을 나타낸다. 손등 실험에서 진압장갑의 경우는 50 ~ 60°C 온도에서 상승속도가 줄어드는 경향이 있는데, B사 제품(진압장갑)의 겉감(손등)의 재질이 가지는 열특성에 따른 영향으로 추정된다. 앞서 언급한 연구결과<sup>4)</sup>에 근거하여 2도 화상을 유발하는 조건(55°C에서 15초이상)과 비교해보면, A사 제품(구조장갑)의 손등면은 103초 경과 후에 55°C에 도달하므로 120초 이상 노출되었을 시 이 장갑을 착용한 손(등)에 2도 화상을 입을 수 있음을 알 수 있다. B사 제품(진압장갑)의 손등면은 125초 경과 후에 55°C에 도달하므로 140초 이상 노출되면 손(등)에 2도 화상을 입을 수 있다. 손바닥 경우는 B사 제품(진압장갑)이 253초 경과 후 55°C에 도달하고 A사 제품(구조장갑)은 300초(5분) 경과 시점에 49°C를 나타내었다. 5분 동안의 열통과 실험 후 장갑의 상태는 외면적으로는 별다른 변화가 보이지 않았다.

사고 당시 타임라인에 의하면, 대원 I은 23시 16분부터 약 2분간 화염과 가까이 있었을 뿐 아니라, 구조대상자의 보호를 위해 손등이 화염 쪽으로 향하는 상태로 고열에 노출되었을 것으로 추정된다. 결과적으로 대원 I은 손등에 3도 화상을 입었으므로, 이 실험을 통

해 장갑의 손등 방향의 단열 성능이 취약하여 생겼다고 볼 수 있으며 위 실험을 통해 2도 화상 이상 입을 수 있는 상황이었음을 알 수 있다.

사고발생 주요 원인은 건물 관계자의 초기 화재대응 미흡, 도로상 현장 출동 환경 애로, 화재에 취약한 거주지 구획으로 인한 급격한 화재 확대로 볼 수 있으며, 초기 화재상황에서 진압대와 구조대와의 원활한 의사소통 부족 등 현장지휘관의 상황판단(size-up) 미흡도 작용한 것으로 판단된다.

### 3.4 사고 사례 IV: 공장화재 가스폭발로 2명 화상

2017년 9월 21일(목) 17:07경 경기도 ○○시 공장(충격완화 시트지 생산공장) 화재진압 중 17:17경 대응1단계가 발령되어 긴급구조통제단 가동하여 현장지휘소에 지원 활동 중 17:53경 공장 내 LP가스탱크(1.9 ton)가 폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)하면서 파편 및 복사열 등으로 소방관 3명, 의용소방대 1명이 부상을 입은 사고이며, 일반인 피해도 22명(중상1, 경상 21) 발생하였다(Fig. 10).

액화석유가스(Liquified Petroleum Gas, LPG)는 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이나 부탄(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)을 주성분으로 한 가스를 액화한(기화한 것을 포함) 것을 말하며, 가정용은 프로판, 택시와 같은 차량은 대부분 부탄으로 되어있다. LPG의 물리적 특성은 액화 및 기화가 용이하고, 기화시 공기보다 약 2배(부탄 기준) 무거워 바닥으로 가라앉으며 액화 시 물보다 가벼우며, 특히 연소하한계가 낮아(1.8%) 누출되면 화재, 폭발의 위험이 큰 가연성 가스이다. BLEVE는 비등액체팽창증기폭발로써 인화점이나 비점이 낮은 인화성 액체(유류)가 가득 차 있지 않은 저장탱크 주위에 화재가 발생하여 저장탱크 벽면이 장시간 화염에 노출되면 윗부분의 온도가 상승하여 재질의 인

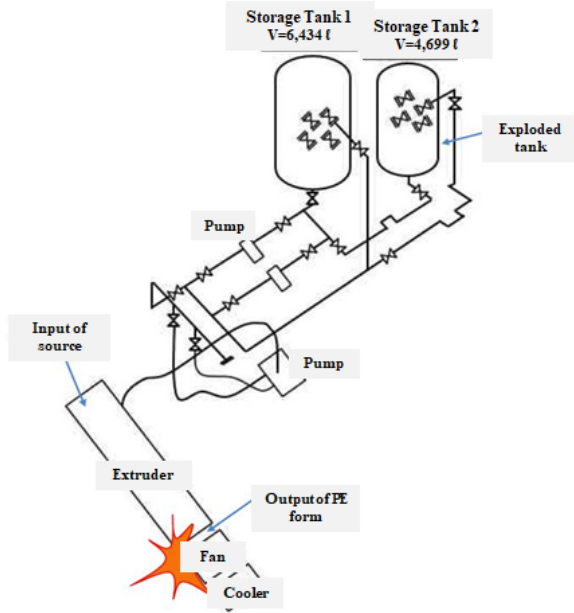


Fig. 10. Gas tank facility system diagram and the scene of the accident after BLEVE.

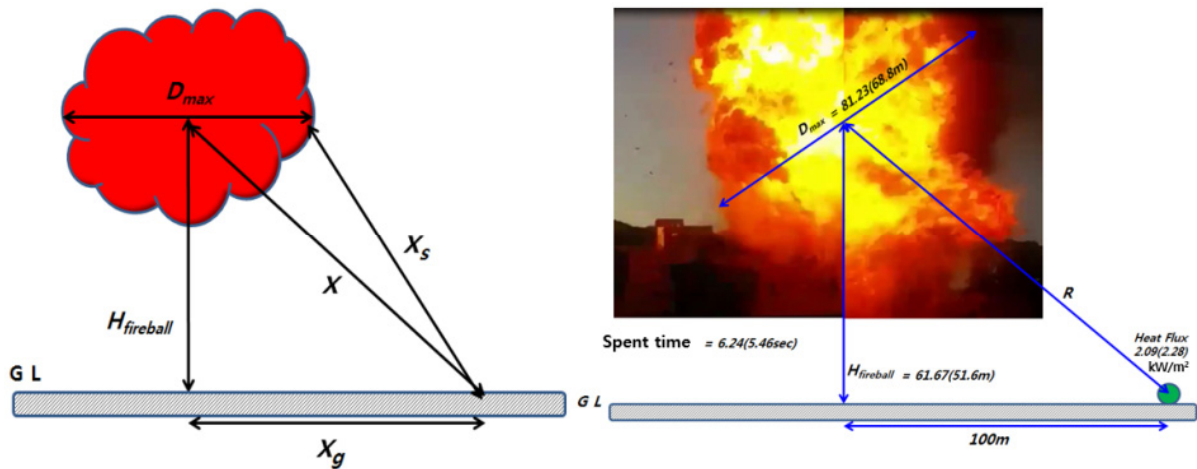


Fig. 11. The model of fire ball for LPG tank and its numerical calculation for the real situations.

장력이 저하되고 내부의 비등현상으로 압력상승되어 저장탱크 벽면이 파열되는 현상으로 그 메커니즘은 액온상승, 연성파괴, 액격현상, 취성파괴, Fire Ball로 구분해 설명할 수 있다<sup>9,12,13</sup>.

BLEVE에 의한 fire ball이 발생할 수 있는 피해를 예측하는 방법은 일반적으로 화구에서 발생하는 복사열에 의한 영향력을 고려한다<sup>9,12-18</sup>. 이때 화구에 의한 복사열 관계식을 이용하여 fire ball의 최대직경( $D_{max}$ ), 연속 지속시간, 중심부 높이를 각각 계산하여 fire ball의 중심 지면으로부터 수평거리 100 m 지점에서의 최대 heat flux는  $2.09 \text{ kW/m}^2$  임을 알 수 있다(Fig. 11). 한편, TNT 당량은 어떤 물질이 폭발할 때 내는 에너지와 동일에너지를 내는 TNT 중량을 비교할 때 많이 사용하

는 척도로, 901.78 kg이 폭발한 것과 동일하다고 볼 수 있다. Hopkinson 삼승근법칙은 폭발의 영향범위 산정 및 폭풍파의 특성을 결정하는데 사용하여 환산거리가 같으면 폭발물의 양에 관계없이 충격파 등 특성값이 같아 환산거리와 과압과의 관계도표에서 과압을 추산하여 10.35를 표시하면 폭풍압은 약 15~16 kPa이 되고, 폭풍피해는 심각한 수준의 구조적 손상이라고는 것을 확인할 수 있으며(과압 68.95 kPa은 모든 건물이 파괴), 그 계산 관계를 Table 1에 정리하였다.

상기 계산결과를 유해물질 비상대응 핸드북(ERG book)<sup>19</sup>의 BLEVE Capacities 단위환산을 통해 재구성하여 비교한 결과, 가스탱크 저장량 100% 충전 시 가스량 2,392.5 kg은 2,000 kg로 가장 유사한 값에서 비교



**Table 1.** The physical properties calculated in the phenomenon of Fire Ball Comparisons

The conditions for Fire Ball	The numerical formula	Results of properties
Storage mass of the gas (M) <sup>1)</sup>	0.85 d <sup>2</sup> V	2,392.5 kg
The maximum diameter of fire ball (D <sub>max</sub> )	6.48M <sup>0.325</sup>	81.23 m
The continuing time of fire ball (T)	0.825M <sup>0.26</sup>	6.24 sec.
The height of fire ball core (H)	0.75 D <sub>max</sub>	61.67 m
The maximum heat flux (q <sub>max</sub> ), at the distance of approximately 100 meter horizontally from fire ball core point	$(828 \times 100^{0.771}) / R^2$ , where R is $\sqrt{H_{fireball}^2 + X_g^2}$	2.09 kW/m <sup>2</sup>
The mass of TNT (W)	$(\frac{\Delta H_c \times W_c}{1000 \text{ kcal/kg TNT}} \times \eta)^3$	901.78 kg
The conversion distance by Hopkinson Tristimulus Law (Z <sub>c</sub> ) (Under overpressure)	$(\frac{R}{W^{1/3}})^4$	10.35 m (15.86 kPa)
The prediction of the blast damage	Structural damage with a serious level	

<sup>1)</sup> On the assumption that the tank with the capacity of 1.9 ton butane was fully filled up; <sup>2)</sup> d is the density of the butane at 4°C, 0.599;  
<sup>3)</sup> Where ΔH<sub>c</sub> is the heating value of the explosive material, 12,564 kcal/kg for LPG; W<sub>c</sub> is the weight of the explosive material (kg); η is the explosive efficiency, 0.03.  
<sup>4)</sup> R is the distance from the explosion point; W is the mass of the explosive material (kg)

하면 최단탱크 파열시간은 5분 이내, 화염 시 탱크내부 소진시간은 21분, fire ball의 반경은 37.5 m로 가스량 차이 값인 392.5 kg을 감안하면 최대직경(D<sub>max</sub>) 81.23 m와 거의 유사하고, 나머지 계산 값들도 예측하기에 충분한 것을 알 수 있다.

사고발생 주요 원인은 가스탱크 폭발(BLEVE) 위험성의 조기 인지 등 안전조치의 부족, 특정소방대상물의 주요 위험 정보파악 · 제공 부족, 긴급구조통제단(현장지휘소) 지원활동 대원 PPE 착용(보급) 부족으로 판단된다.

#### 4. 예방 대책 고찰

##### 4.1 컨테이너 화재진압 중 2도 화상 사고(사례 I)

화상을 입은 현장대원은 화재진압활동 18분 경과 후에 손가락 통증을 감지하여 구급조치를 시행하였다. 따라서 현장 소방활동 시 소방관은 자신이 착용하고 있는 PPE의 성능한계를 인지해야 한다. 미국(FEMA) 자료<sup>20)</sup>에 의하면, PPE가 특정 기준에 충족되는지를 확인하기 위해 시험을 한다는 점을 유의해야 한다고 권고하고 있다. 이는 PPE가 표준 한계를 벗어나면 제 역할을 할 수 없다는 것을 의미하며(예를 들어, 보호장갑의 두께는 다양하며, 방화복에는 온도에 대한 제한이 있음), 보호복의 유지관리 또한 중요하다고 한다. 보호복과 장비가 제대로 관리되지 않을 경우 사고 및 부상이 발생할 수 있으며, 의류 및 장비의 세척과 수선을 하는데 있어 제조업체의 권고에 따라야 한다고 표현하고 있다. 또한, 소방관에게 화상이 가장 빈번히 발생하는 부위 및 위험이 높은 부위는 신체 말단 및 각 장비

들간 경계면인 것을 알 수 있었다. 따라서, 소방공무원은 화재현장 활동 시 작은 화염에도 6분 이상 연속 노출 시 안전장갑 내부온도가 55°C 이상 도달하여 2도 화상을 입을 수 있다는 것을 항상 인지해야 하며, PPE를 완벽하게 착용하였다 하더라도 개별적인 성능 한계를 인지하여야 한다.

둘째, 당시 현장에는 전담 현장안전점검관(현장지휘관 포함)이 부재하여 현장안전관리와 대응전술 대책이 미진하였다. 따라서 선착대 소방력을 고려한 상황평가 및 전술을 검토해야 한다. 현장지휘관은 현장 안전평가 후 대응방법을 결정하고 재난현장의 종합적 정보를 취득하며 대원과 구조대상자 안전을 고려하여 대응방법을 결정해야 한다(SSG 2)<sup>21)</sup>. 또한 현장안전점검관은 현장지휘관을 보좌하며 현장 소방활동 전반의 위험요인 관측, 보고 및 전파의 임무가 있지만 현실적으로 1~2명 정도로 구성된 지역대 단위에서 안전을 담보한 선착대 임무를 수행하기 곤란하다. 따라서, 2명 이하의 선착대는 현장지휘절차(SOP 100)<sup>22)</sup>를 고려하여 화재현장 상황을 지휘부 및 후착대에 전파하고, 방어적 전략을 선택하여 돌발화재와 같은 극한 고온 상황이 소방력보다 우세할 경우 후착대 도착 전까지 일정한 안전거리를 유지하여 연소확대 방지에 주력하도록 권고한다.

##### 4.2 LPG 재발화로 소방관 9명 화상 사고(사례 II)

현장 임무 인수인계 과정에서 발생한 재발화 화재로 인한 화상사고사례에서는 표준작전절차(SOP) 중 재난 현장 내 · 외부 위험요소 판단이 현장활동 전반에서 철저히 지켜지지 않았음을 알 수 있다. 그 중에서도 화재진압 임무만이 아닌, 현장활동 전 과정에 존재하는 위

협요소를 찾아내고 제거하는 일이 얼마나 중요한 일인가를 보여주는 사례라고 할 수 있다. 현장안전관리지침 SSG 2<sup>21)</sup>에서 제시한 것처럼 현장 안전평가를 선행한 후에 PPE 수준을 결정하는 것이 실행되어야 한다. 예를 들어, 현장 위험요소가 모두 제거조치되고, 화재진압대원이 자급식 호흡보호 장치(Self-containing Breathing Apparatus, SCBA) 면체를 벗어도 되는 상황인지 등을 판단하여 지휘해야 하는 것이다. 이러한 역할은 현장대원 중에서 대원의 안전도 점검하는 임무 담당자(현장안전점검관)에게 있고 이는 주로 현장지휘관의 책무로써 철저히 수행되어야 유사한 2차 사고를 예방할 수 있을 것이다.

한편, 현장맞춤형 PPE 착용 기준 개선과 PPE 개발이 지속적으로 요구된다. 일반적으로 소방대원은 화재진압을 모두 수행한다는 오해가 있지만, 실제로 다양한 역할을 하는 각각의 현장대원이 있으며 그 중 화재진압을 하지 않고 활동하는 화재조사관을 포함한 현장지휘관이 있다. 이들 또한 현장 유해인자에 노출되고 있으며<sup>23)</sup>, 화염에 노출되는 진압대원에 비해 PPE 착용기준이 완화될 수 밖에 없지만 현실적으로 종류가 다른 위험에 대한 개인안전을 확보할 수 있는 PPE 착용수준이 결정되어야 한다. 이 현장지휘관(현장안전점검관, 화재조사관 포함)이 화재현장에서 안면부 등을 보호함과 동시에 무전기를 활용한 의사소통이 가능하게 착용할 수 있는 SCBA가 필요할 것이다. 현장에서 발생하는 사고 중 지휘관의 PPE(특히, SCBA) 미착용으로 안전사고가 종종 발생하고 있으며, 이는 현장 지휘관의 역할 특성상 SCBA 면체를 착용하게 되면 각종 무전지시나 상황보고 등 지휘관으로서의 역할 수행에 방해가 되기 때문이다.

#### 4.3 주택화재 인명구조 중 3도 화상 사고(사례 III)

이 화상사고는 현장대원이 PPE를 철저히 착용했음에도 불구하고 발생한 안전사고로써, 소방공무원의 PPE 성능개선 및 기준 마련이 필요하다. 현장대원의 임무별로 적합한 안전장갑에 대한 명확한 착용기준이 미흡한 실정이고, 해마다 공무상 재해 인정 건 수의 5% 내외가 화상으로 인해 발생하므로 소방대원 PPE의 성능기준을 재검토 필요가 있다. 특히 안전장갑에 대한 성능기준과 시험항목을 현장대원의 임무별(구조, 진압, 구급, 생활안전활동 등)로 적합한 기능 및 형태로 세분화하여 규정하거나 공신력 있는 자료를 마련해 현장대원이 노출되는 극한 고열에 대한 기술적인 방호 대책을 수립하여야 한다. 화상을 예방하는 방호장갑의 성능기준을 현장 맞춤형 조건, 예를 들어 ‘화염과 1 m

거리에서, 장갑의 손등 내부 온도는 수분 흡수 여부와 관계없이, 47°C 이하를 최소 30초 이상 유지할 수 있어야 한다’는 식으로 개정하기 위한 성능평가 방식을 채택하고, 방호장갑 구매 규격에 적용하여야 한다. 보다 현실적인 접근으로는, 주로 사용하는 방호장갑의 성능한계를 명확히 인지하도록, 구매 시 고열현장 조건에서의 열방호성능에 대한 리포트를 요구·확보하는 방법도 고려해볼 수 있다.

한편, PPE는 사용자의 착용방법에 의해 성능에 영향을 받는 면이 있으므로 대응장비의 구조적 개선방안도 고려해볼 수 있다. Kim<sup>2)</sup>은 관창수의 손 화상이 많은 통계조사 결과에 착안하여 관창에 가드를 도입하는 것으로 복사열로 인한 화상을 직접적으로 차단하는 대응장비 개선을 제안하기도 하였다.

아울러, 현장지휘관은 화재진압대원의 화상사고를 포함한 열피로 예방을 위해서 적정시간 교대투입을 적극적으로 고려해야 한다. Lawson et al.<sup>4)</sup>은 낮은 열기에도 장시간 작업을 하게 되면 언제든지 화상의 위험에 노출될 수 있다고 발표했고, 56°C에서 10초간 노출이 되면 2도 화상의 위험이 있고, 53°C에서 약 35초간 피부노출이면 2도 화상 위험이 있다고 보고하였다. 이에 대한 현장대원이 착용하는 구조장갑 등의 안전장갑은 그 성능이 확인되지 않은 상황이므로 현장 활동대원의 교대투입과 후속조치를 수행해야 할 것이다. 예를 들어 대응 1단계 이상의 장시간 소방활동이 수행되는 현장이라면 대원 개별 현장활동시간을 제한하여 교대투입을 실시하고, 소방공무원 회복차를 운영하여 활동 후 휴식절차로써 열피로 예방절차 수행을 통해 회복탄력성을 확보하는 현장안전관리 방법이 있다<sup>24)</sup>.

#### 4.4 공장화재 가스폭발로 2명 화상 사고(사례 IV)

해당 사례와 같은 폭발 위험시설에서라면 전술적 방호활동을 철저히 해야 한다. 소방전술(유류 및 가스 화재진압)<sup>20)</sup>에 의하면, 소방대원들은 심각한 화재 상황에서 초과된 압력을 릴리프밸브가 안전하게 해제시킬 수 있다고 과신해서는 안되며, BLEVE는 액체 윗부분의 탱크 표면에 불꽃이 닿거나 혹은 탱크 표면을 냉각시키는 물이 부족할 때 가장 흔히 발생하므로 화재진압 시 물을 탱크 윗부분에 뿌려야 하며, 가능한 무인 대량 방수장비의 사용을 권고하고 있다<sup>20)</sup>. 따라서, 탱크(유류, 가스 등)에 대한 「집중전술」을 통하여 최초 발화지점에서 연소 확대된 가스탱크를 여러 대의 펌프차 방수포 등으로 탱크 기상부를 냉각시키는 전술을 권고한다.

또한 대응1단계가 발령된 상황에서 긴급구조통제단

이 가동되었지만 철저한 현장통제가 이루어지지 않아 일어난 2차 사고라는 점을 기억해야 한다. 이는 총괄 지휘관의 상황판단(size-up) 절차를 현장활동 전과정 및 전방위 영역에서 철저히 수행해야 한다는 것을 보여준다. 특히 현장활동 대원의 안전관리를 보장하는 것은 지휘관의 중요한 임무이며 책임이다. 소방전술 I, 지휘이론에 따르면, 상황판단은 직감, 선입감 및 희망적 관찰을 피하고 가능한 한 정보에 따라서 객관적으로 숙고할 필요가 있으며, 현장은 항상 변화하며, 일 방면의 작은 일에 사로잡히지 않고 넓은 면을 보는 것이 중요하다<sup>25)</sup>.

#### 4.5 현장사고 예방을 위한 공통적 개선방안 제언

첫째, 현장에 출동한 모든 소방대원 각각의 PPE 착용과 지휘를 철저히 해야 한다. 대원의 생명과 직결되는 가장 기본적이면서도 중요한 절차이며, 현장활동 전 재난 특성을 파악 후 적응성 PPE 착용을 권고한다.

둘째, 현장안전점검관(담당)의 전담 역할을 강화해야 한다. 현장안전점검관은 현장지휘관을 보좌하고, 위험요인의 관측, 보고 및 전파 등 소방활동의 전반적인 안전관리 시스템을 제대로 작동시켜야 한다. 이 시스템에는 현장대원 임무별 PPE 수준 정립 및 착용실태 관리 등이 포함되어야 하고 대원안전 확보가 최우선으로 고려되어야 한다.

셋째, 사고사례를 고려하여 표준작전절차 SOP를 지속적으로 검토하고 보완해야 한다. 현대사회 재난현장은 급변하고 있으며, 현장에 상존하는 위험은 사고사례를 통해 드러나고 있다. 이에 따라 SOP는 각종 재난 현장에서 대원의 안전을 포함한 국민의 안전을 지키고 신속·효율적으로 현장을 대응하기 위해 가장 기본적으로 숙지해야 하며, 완벽한 절차가 아니라는 점을 인지하고 개별적 지침서 등을 참고하여 정례적으로 보완하고 전파되어야 한다.

마지막으로, 재난현장에서 활동하는 극한상황에 사용되는 PPE의 기술적 진보를 위해 연구개발 투자가 확대되어야 한다. 예를 들어, 화재현장에서 젖은 장갑이 마른 장갑보다 화상에 취약한 현상이 관찰되므로, 장갑의 수분함량이 화상에 미치는 영향과 그 메커니즘 규명을 통해 이를 극복할 수 있는 PPE 기술개발을 위한 연구와 실증이 이루어져야 할 것이다.

이 연구의 한계점은 소방활동에 사용하는 PPE는 안전장갑에 집중되어 있고 일부 실제 화상사고 사례와 연관된 것으로서 방화복을 비롯한 PPE 전체 문제점에 대한 고찰이 아니라는 점에 있다.

## 5. 결론

본 연구를 통해 현장 소방활동 중 소방공무원의 화상 통계와 사고사례 4건을 사고특성에 따라 재현실험, 계산식을 활용한 예상 시나리오 설정을 통해 분석하고, 현장 화상사고 저감 방안을 고찰하였다. 화재현장에서 활동하는 소방공무원에게 화상사고 위험은 상존하므로, PPE 착용 철저 뿐 아니라 임무에 맞는 적절한 PPE 착용 기준 고도화가 필요하고, 급변하는 재난현장에서의 상황판단 및 현장안전 지휘체계가 작동하도록 SOP 실행 및 현실적 SOP 제·개정이 지속적으로 이루어져야 화상사고를 비롯한 현장대원 안전사고가 예방되고 현장대응 역량이 강화될 것이다. 더불어 보호장비 소재 기술개발을 통한 기능개선과 소방현장 맞춤형 PPE 연구개발 투자는 지속적으로 확대되어야 하며, 이를 통해 국민의 생명과 재산을 보호하는 소방대원의 원천적 안전 확보에 기여할 수 있을 것이다. 더욱이 소방활동 현장에서 지속적으로 발생하는 현장대원 안전사고를 예방하기 위해서는 발생사고에 대한 소방조직의 현장조사 분석 기능이 활성화되어 과학적인 사고원인조사에 기반한 효과적인 개선대책 도출과 제도반영이 이루어져야 할 것이다.

**Acknowledgement:** This research was supported by the Research Funds of National Fire Research Institute of Korea, 2017~2020.

## References

- 1) Korea Disease Control and Prevention Agency, "Portal of Public Health Information", 2022.
- 2) T. O. Kim, "A Case Study on Cause of Fire and Responsibility of the Relevant Parties", *Fire & Safety Res.*, Vol. 1, pp. 59-78, 2020.
- 3) NFPA, "U.S. Firefighter Injuries", 2012.
- 4) J. R. Lawson, "Fire Fighter's Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting", NISTIR 5804, National Institute of Standard and Technology, 1996.
- 5) NFPA, "U.S. Firefighter Injuries on the fireground", 2013.
- 6) J. H. Veghte, "Effect of Moisture on the Burn Potential in Fire Figther's Gloves", *Fire Technology*, 23, pp. 313-322, 1987.
- 7) S. A. Kahn, J. H. Patel, C. W. Lentz and D. E. Bell, "Firefighter Burn Injuries : Predictable Patterns Influenced

- by Turnout Gear”, *J. Burn Care Res.*, Vol. 33, No. 1, pp. 152-156, 2012.
- 8) J. K. Lee and C. H. Bang, “Numerical Study on Skin Burn Injury due to Flash Flame Exposure”, *Fire. Sci. Eng.*, Vol. 26, No. 5, pp. 13-20, 2012.
  - 9) S. Y. Kim, H. J. Kim, S. E. Lee, Y. J. Lee, C. Y. Lee and H. G. Jeon, “Principles of Fire Behavior (2nd. ed.) in Korean”, GooMiSeoGwan Press, pp. 84-90., 2018.
  - 10) C. L. Beyler, “Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames”, Chap. 2-9 in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd., edited by P. J. DiNenno, Quincy, MA. National Fire Protection Association, 1995.
  - 11) G. H. Oh, U. H. Kim, K. O. Kwon, Y. S. Kim, H. J. Kim, H. J. Park, I. S. Oh, S. E. Lee, S. K. Lee, Y. J. Jung and D. M. Choi, “Principles of Fire Behavior in Korean”, Dong Hwae Tech. Press, 2015.
  - 12) S. K. Lee, G. H. Oh, K. C. Jung and J. W. Choi, “Gas Safety Engineering”, Dong Hwae Tech. Press, 2009.
  - 13) K. W. Kang, G. C. Song and H. J. Yoo, “Professional Fire Protection Engineering”, Dongwha Technology Press, 2015.
  - 14) J. D. Chung, S. M. Whang and K.H. Oh, “A Measurement of Flame Propagation Velocity for the Reduction of Air Pollutants”, *J KSEE*, Vol. 25, No. 6, pp. 665-669, 2003.
  - 15) Y. Huo and W. K. Chow, “Flame of Propagation of Premixed Liquefied Petroleum Gas Explosion in a Tube”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 891-901, 2017.
  - 16) BLEVE Video. Plant officials nearby, 2017
  - 17) BLEVE Video. <https://www.youtube.com/watch>
  - 18) S. H. Lim and Y. J. Huh, “A Study on the Quantitative Analysis for Explosion of LPG Storage Tank”, *J. the Korean Gas Institute*, Vol. 17, No. 3, pp. 1-7, 2013.
  - 19) U.S. Department of Transportation and Transport Canada, “Emergency Response Guidebook”, 2016.
  - 20) FEMA, “Emergency Management - Person Protective Clothing and Equipment”, U.S. Fire Administration, 2020.
  - 21) National Fire Agency, “SSG #2 of Standard Operational Procedures and Standard Safety Guidelines”, 2018.
  - 22) National Fire Agency, “SOP #100 of Standard Operational Procedures and Standard Safety Guidelines”, 2018.
  - 23) D. H. Han, S. W. Choi and S. Y. Lee, “Hazardous Gas Analysis during Fire Investigation”, *Fire Sci. Eng.*, Vol. 34, No. 6, pp. 94-103, 2020.
  - 24) FEMA, “Safety and health considerations for the design of fire and emergency medical services stations”, U.S. Fire Administration, 2018.
  - 25) National Fire Service Academy, “Fire Tactic I (Fire 1, Rescue 2)”, National Fire Service Academy, 2019.