

# 화재현장 대원 화상사고 분석 및 안전관리 방안

## 현 실태 및 사고사례

■ 최근 3년간 화상으로 인한 대원안전사고 총 109명\*(연평균 36.3명) 발생

\* '20년 33명, '21년 33명, '22년 43명 / 10일에 1명 발생하며 증가 추세

■ 화재현장은 화염(복사열), 고온, 증기 등으로 인하여 화상사고 위험은 상존하며, 개인보호장비로 소방대원을 완벽하게 보호하는 것은 불가능

■ 최근 화상 안전사고 및 순직사고 사례



- ① ('23년 부산, 3명) 호텔 지하 6층 반밀폐공간인 주차장 내 화재진압 중 복사열에 의해 3명 2도 화상
- ② ('23년 서울, 2명) 오피스텔 7층 화재진압 및 구조활동 과정에서 면체와 피부사이 틈이 생겨 열에 노출 1도 화상
- ③ ('22년 경기, 5명) 대형 물류창고 신축공사장 화재진압 중 화재가스발화로 고립 3명 순직, 탈출과정 2명 화상
- ④ ('21년 울산, 1명)<sup>사례1</sup> 상가건물 3층 미용실 인명검색 및 화재진압 중 급격히 화염이 확산(복사열)되어 1명 순직
- ⑤ ('21년 충남, 1명)<sup>사례2</sup> 공장 2층 인명검색 중 반자(샌드위치패널)가 붕괴되면서 고열에 노출되어 1명 중증 화상

## 주요 화상사고 분석 ⇒ 최근 3년간 화상 발생 통계

### 신체부위 중 손(33%) > 머리(16%) > 목(9%) 순 화상으로 부상 발생

- ✓ (손 부위 화상) 화재진압 활동(주수) 중 손은 불(화원)을 향하고 가까워 높은 열에 노출됨, 전체 화상사고 109명 중 33% 가장 많이 발생
- ✓ (머리·목 화상) 열은 위로 이동하는 특성, 신체부위 중 상부에 위치한 머리·안면 등 부위가 하반신 부위에 비해 상대적으로 많이 발생
- ※ (비교 연구) 2020년도 소방공무원 화상사고 경험자 대상 조사분석 결과(총 242건 화상사고)
  - ↳ 10년미만 근무경력(52.9%) / 2도화상(66.5%), 3도화상(15.3%) / 손(28.5%), 머리(24.5%), 귀(10.3%), 목(10.3%)
  - ↳ 현장활동 당시 개인보호장비 착용에도 불구하고 화상 81%



### 개인보호장비 미착용 시 화상 발생 위험 최소 약 60배 이상 증가

⇒ (미착용) 온도 43°C 이상 노출 시 피부 통증 발생, 44°C 이상 표피 손상, 48°C 1도 화상

- ✓ 저열유속 10kW/m<sup>2</sup>\* 노출 ⇒ 진피 및 피하조직 열전달 10.4초 후 ⇒ 2도 화상 발생
- ✓ 고열유속(돌발화염) 80kW/m<sup>2</sup>\* ⇒ 개인보호장비 미착용 상태 0.5초 노출 ⇒ 2도 화상 발생

\* (단위면적당 열전달) 지구 지표면에 이르는 태양의 복사열류는 약 1kW/m<sup>2</sup>

↳ (열유속·복사열 강도 비교값) 맨살 고통 2kW/m<sup>2</sup>, 맨살 화상 4kW/m<sup>2</sup>, 물체 점화 10~20kW/m<sup>2</sup>

▶▶ (착 용) 화상사고 발생 지연 및 부상 경감 효과는 있으나, 완벽한 보호는 불가능

- ✓ 화상사고는 전도, 대류, 복사, 불꽃 형태의 열전달이 개인보호장비 내부로 진행되어 발생
  - **불꽃열 방호성능** ① 약 1,000°C 불꽃에 노출됐을 때 17초간 2도 화상이 발생하지 않는 보호 수준  
② 열에 의해 통증을 느끼는 순간부터 6초간은 2도 화상이 발생하지 않는 보호 수준
  - **복사열 방호성능** ① 약 1,000°C 복사열 존재 환경에서 26초간 2도 화상이 발생하지 않는 보호 수준  
② 열에 의해 통증을 느끼는 순간부터 8초간은 2도 화상이 발생하지 않는 보호 수준
- ▶▶ 특히 직접적으로 화염 접촉이 없는 **복사열**은 화상 발생 **예측 어려움**

### 【 화상사고 사례 ▶▶ 열전달 유형별 개인보호장비 상태 비교 】

#### ① (전도·불꽃열) 체표면적 60% 3도 화상

#### ② (복사열) 체표면적 50% 2도 화상 순직



- ✓ (충남) 공장 2층 인명검색 중 반자(샌드위치패널)가 붕괴, 고열에 직접 노출되어 1명 중증 화상
- ✓ 방화복이 화염에 직접 접촉·노출되어 탄화
- ✓ 전체적으로 훼손, 팔 부위 원형 식별 곤란
- ✓ 방화복 손상으로 중간층·안감 재질 노출

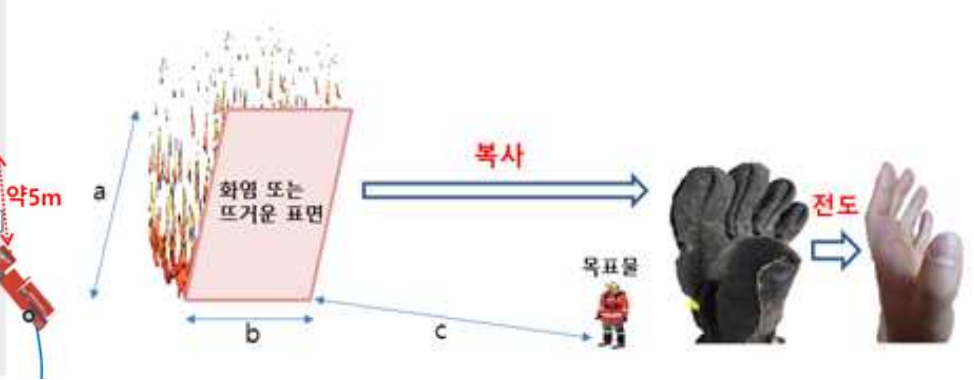
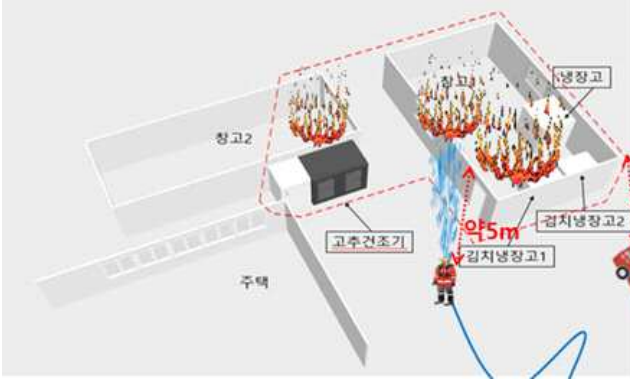
- ✓ (울산) 상가건물 3층 미용실 인명검색 및 화재진압 중 급격히 화염이 확산(복사열)되어 1명 순직
- ✓ 방화복 상·하의 젖은 상태
- ✓ 화염의 직접 노출로 인한 손상된 흔적 식별되지 않음
- ✓ 방화복 내피 건조한 상태(육안상 양호)



# 화상 원인분석 고찰

## 열전달(복사열 + 전도열)에 의한 화상발생 가능성 시뮬레이션 사례 사례3참조

✓ (사고경위) 컨테이너 화재로 인근 주택으로 연소 확대되는 상황에서 화재진압 활동 중 복사열 등 열전달 현상으로 119지역대 대원1명 화상사고 발생(손가락 5군데 2도 화상, 진압활동 당시 인지 못함)



### ✓ 계산조건 및 한계

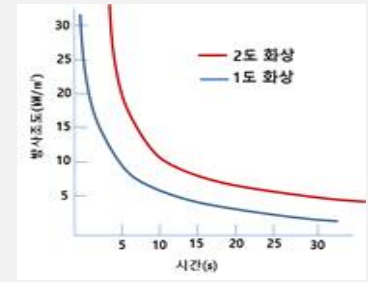
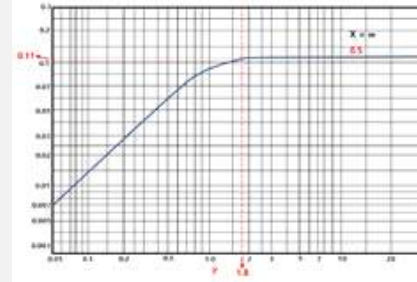
- a(창고 높이) 2.6m, b(창고 폭) 9m, c(이격거리) 5m
- 방화장갑 두께 5mm - 화재대상물 온도 1,100 °C
- 실제 화재진압 활동시간: 18분(1,080초)
- (한계점) 대류, 방화장갑의 경년변화 내열내구성, 습기 등

### ✓ 복사열(화재대상물 → 대원 방화장갑) 계산

$$q'' = \epsilon \sigma T^4 F_{12} = 8.87 \text{ kW/m}^2$$

- $\epsilon$  : 0.4(화염 표면의 방사율 즉, 열물성치 Stainless steel)
- $\sigma$  :  $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$ , - T: 켈빈 온도 1,373 °C
- $F_{12}$  : 형태계수로 x, y를 차트에서 찾으면 약 0.11
- $x = a/c = 2.6/5 = 0.52$ ,  $y = b/c = 9/5 = 1.8$

⇒ 8.87 kW/m<sup>2</sup> Heat flux(열유속) 약 12초만에 2도 화상 발생



### ✓ 열침투시간 적용 전도(방화장갑 → 대원 I의 맨살) 계산

$$Time(50\%) = \frac{x^2}{\alpha} = 290.7 \text{ 초}$$

- $x^2$ : 물질 간 거리로 장갑의 두께는 0.005m
- $\alpha$ : 열확산도  $k/\rho c$  밀도 c 비열

물질의 열적 성질에 의해 섬유판은  $8.6 \times 10^{-8}$

### ✓ 결론

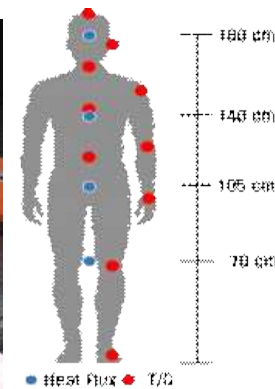
본 현장 진압대원은 약 5분 경과 이후부터 2도 화상 가능

## 화상사고 관련 재현실험

⇒ 실내 구획화재 시 대원에게 미치는 복사열 측정 실험(국립소방연구원)

- (실험목적) 화재현장 복사열 및 방화복 착용 시 신체부위별 화상위험성 검증
- (실험결과) 분출되는 화염에 노출될 경우 개인보호장비로 순간적인 복사열은 차단 가능, 장시간(지속적) 노출되면 개인보호장비 내부의 온도가 상승하여 화상
- (시사점) 화염 분출 개구부로부터 최소 2m 이상 안전거리 유지, 낮은 자세로 대응

- ✓ 신체 10개 부위 측정결과 ⇒ 주로 이마, 손, 팔, 어깨, 발, 무릎 부위가 노출되어 열이 축적됨
- ✓ 복사열은 지면에서 160cm가 가장 높음, 대원에게 미치는 복사열 약  $15.73 \sim 37.01\text{kW/m}^2$
- ✓ 구획화재 대응 시 화염으로부터 개인보호장비에 순간적으로 노출되는 최고온도는  $519^\circ\text{C}$  (이마부위)일 때 내부온도는  $22.2^\circ\text{C}$ 이지만, 동일부위의 내부온도가 서서히 상승하여 약 440초 후  $37.3^\circ\text{C}$ 까지 상승함 ⇒ 방화복 외부 약  $110 \sim 519^\circ\text{C}$ , 내부(인체 도달) 온도는  $31.1 \sim 55.2^\circ\text{C}$

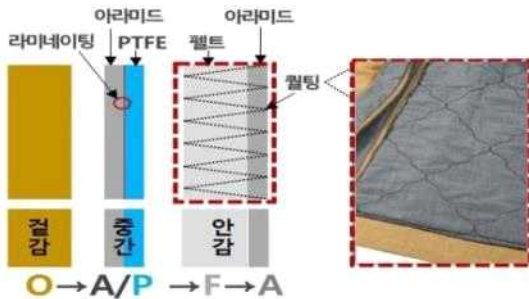


## 화상사고 관련 연구 · 실험

### 방화복 내피 방호성능 향상을 위한 사전 실험(국립소방연구원)

▶ (핵심결론) 방화복의 안감은 편물이 직물보다 방호성능이 우수

- ✓ (장점) 편물(일명 뜨개질 방식으로 하나의 실이 서로 맞물려진 형태) 방식은 직물에 비해 공간이 형성되면서 열 저항성이 높고 열전도도가 낮게 측정됨
- ✓ (단점) 편물 적용시 직물 대비 평균 단가가 약 2.5배 이상 높아 경제성 불리



-겹감(외피): PBI, PBO, 아라미드(100%) 소재

✓기능: 난연성(연소하기 어려움)

-중간층: 아라미드 라미네이팅 방수투습천(PTFE)

✓기능: 방수투습성(물 차단 및 내부 땀·습기 배출)

-안감(내피): 부직포(펠트)와 아라미드 쿼팅

✓기능: 열방호성(열 차단)

구분	평균단가
아라미드(직물) 단가(원)	15,600
아라미드(편물) 단가(원)	38,533
직물 대비 편물 단가비	2.47배

### 방화복 내 착용 복제 등 설문조사 추진(국립소방연구원) ※ 총 3,923명

✓ (설문결과) 활동복 82.2%, 기동복 4.7%, 기타 기능성의류 등 8.7%

✓ (과거 연구사례) “방화복 안의 피복에 따른 열적 특성 연구” ▶ 열차단 등 기동복이 우수

### 향후 연구계획 및 방향

✓ (’23년 하반기) 착용 복제 설문조사 결과 기반 의류·소재별 열차단 성능 비교 실험

✓ (중장기) 현장대원 안전성, 활동성 등 향상 방화복소재 및 착용 복제 연구개발

# 화상사고 현장 안전관리 방안

## (현장안전대응) 개인보호(안전)장비 착용 및 위험성 평가 철저(기본원칙 준수)

### ✓ 개인보호(안전)장비 착용(휴대) 철저 및 현장상황·신체 등 고려한 안전장비\* 추가

\* 건물내 진입 시 인명구조경보기, 파괴장비, 탈출·확보 장비 / 산림화재(강풍) 시 고글 착용 등

- 방화복이 작으면 보호장비와 피부 사이에 존재하는 공기층이 적어 화상 위험이 높음

- 방화복이 크면 민첩성 저하, 벗겨짐, 넘어짐, 좁은 공간 이동 방해, 장애물 걸림 발생

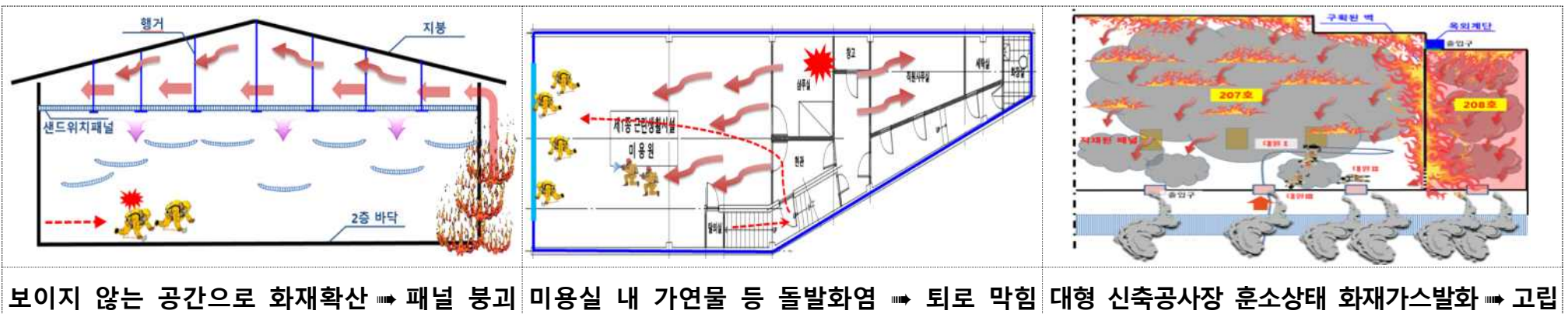
### ✓ 선착대 소방력을 고려한 위험성 평가 및 전술 결정

▶▶▶ 선착대가 2명 이하 지역대 등은 소방력 고려 현장상황 신속 전파 후 방어적 전술 선택

▶▶▶ (화세 > 소방력) 후착대 도착 전까지 안전거리 유지 및 연소확대 방지 주력

### ✓ 현장지휘관 및 현장안전점검관 등 화재·대상물 유형\*에 따른 현장 위험요인 신속 파악·전파

\* (건축물 내) 구조물 붕괴 위험↑, (가연물 多) 돌발화염·복사열 위험↑, (대형건축물) 고립 위험↑ 등





화염 및  
복사열  
노출범위  
수준

※ 출처: Thermal Protective Clothing for Firefighters(A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles, 2017, pages 5- 15, Elsevier Ltd)

- **일상적 수준** 온도 20 ~ 70°C, 열유속 1.67kW/m<sup>2</sup> 이하, 화염으로부터 일정 거리 떨어진 위치에서 약 10 ~ 20분 정도 관창을 잡고 화재진압을 하는 경우
  - **위험 수준** 온도 70 ~ 300°C, 열유속 1.67 ~ 12.56kW/m<sup>2</sup>으로 화염에 좀 더 근접하여 화재진압을 하는 경우 또는 화재현장 인명구조 상황 등으로 보통 1 ~ 10분 동안 노출되는 경우
  - **긴급 수준** 온도 300 ~ 1,200°C, 열유속 12.56 ~ 209.34kW/m<sup>2</sup>으로 플래시오버와 같은 위험한 상황 등에 약 1분 이내 노출되는 경우
- ➡ 화재현장에서 노출되는 화염과 복사열의 규모는 화재 대상물 크기, 가연물 종류, 밀폐·개방 여부 등에 따라 달라 현장대원의 노출수준 결정 어려움

■ **(장비관리) 장비 사용에 따른 성능 저하는 필연적, 점검·관리 철저**

✓ 장비 내용연수 경과·훼손 시 교체 확행, 성능유지를 위한 세탁·관리·보관법\*참고1,2,3,4 숙지

\* ①특수방화복 (손)세탁 방법 및 주의사항, ②특수방화복 관리 및 보관 방법, ③방화복세탁기 방법

➡ (성능저하 예시) 거친 브러쉬, 고압 물 세척 → 섬유·박음질 부위가 훼손되어 화상 유발 가능

■ **(교육훈련) 화상사고 대비 안전관리 예방 및 보호장비 성능한계 인지 교육 실시**

✓ 최근 3년간 화상사고 대상\*을 고려한 집중 예방교육

\* (경력) 5년미만(39명) > 20년이상(23명) > 15년이상(18명) / (계급) 소방위·소방사(각30명) > 소방장(27명)



✓ 필수 개인보호장비 주요기능, 성능한계 인지, 열전달 특성, 사고사례 등 교육 철저

특수방화복  
주요기능  
교육

- 특수방화복 외·내피 기능 ⇨ (외피) 기능 방수투습 기능 및 화염과 외부충격으로부터 보호 역할, (내피) 외부의 뜨거운 열기가 피부에 닿는 것을 늦추는 단열층 구성
  - ⇨ 외부와 내피 기능이 다르므로 반드시 동시 착용해야 보호성능 유지
- 열방호성능과 열배출성능은 반비례
  - ⇨ 내부로 들어오는 열을 지연시키는 능력은 외부로 나가려는 열에도 적용
  - ⇨ 대원보호를 위한 교대주기 고려, 휴식 때는 방화복을 완전히 벗는 것이 효과적

특수방화복  
방호성능  
한계 인지  
교육

- **불꽃열 방호성능** ① 약 1,000°C 불꽃에 노출됐을 때 17초간,  
② 열에 의해 통증을 느끼는 순간부터 6초간은 2도 화상이 발생하지 않는 보호 수준
- **복사열 방호성능** ① 약 1,000°C 복사열이 존재하는 환경에서 26초간,  
② 열에 의해 통증을 느끼는 순간부터 8초간은 2도 화상이 발생하지 않는 보호 수준

■ (정책개발) 화상 안전사고 방지 지침 보완, 교육훈련 콘텐츠 개발, 연구개발 강화

✓ (지침개발) 화상 대원안전사고 사례 기반 절차(SOP, SSG), 지침 등 지속적 검토·보완·개발

✓ (교육개발) 개인보호장비의 한계성 및 성능유지를 위한 관리·보관법 등 교육콘텐츠 개발

✓ (연구개발) 개인보호장비(방화복, 방화장갑, 방화두건 등) 성능향상을 위한 지속적 연구개발