

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)^{사례1} 상가건물 3층 미용실 인명검색 및 화재진압 중 급격히 화염이 확산(복사열)되어 1명 순직
- ⑤ ('21년 충남, 1명)^{사례2} 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/m²* 노출 ⇒ 진피 및 피하조직 열전달 10.4초 후 ⇒ 2도 화상 발생
- ✓ 고열유속(돌발화염) 80kW/m²* ⇒ 개인보호장비 미착용 상태 0.5초 노출 ⇒ 2도 화상 발생

* (단위면적당 열전달) 지구 지표면에 이르는 태양의 복사열류는 약 1kW/m²

↳ (열유속·복사열 강도 비교값) 맨살 고통 2kW/m², 맨살 화상 4kW/m², 물체 점화 10~20kW/m²

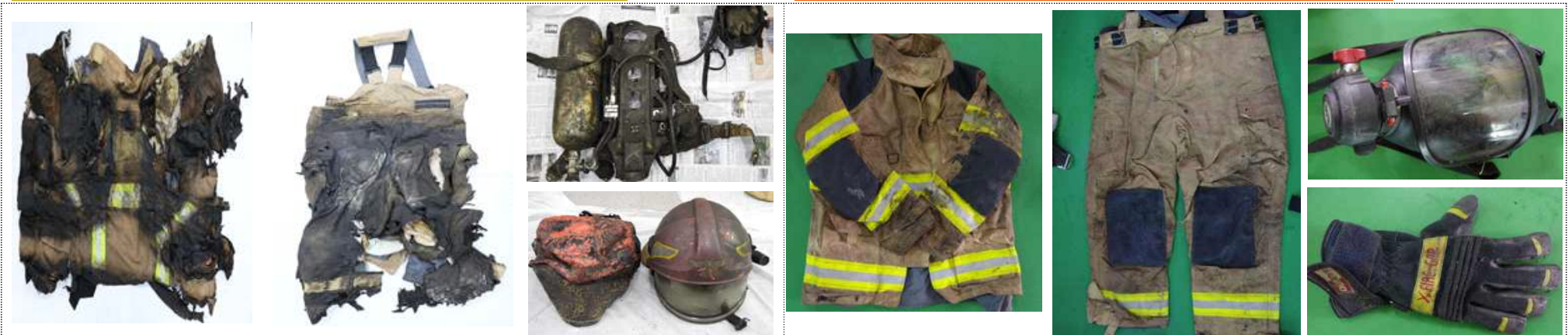
▶▶ (착 용) 화상사고 발생 지연 및 부상 경감 효과는 있으나, 완벽한 보호는 불가능

- ✓ 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



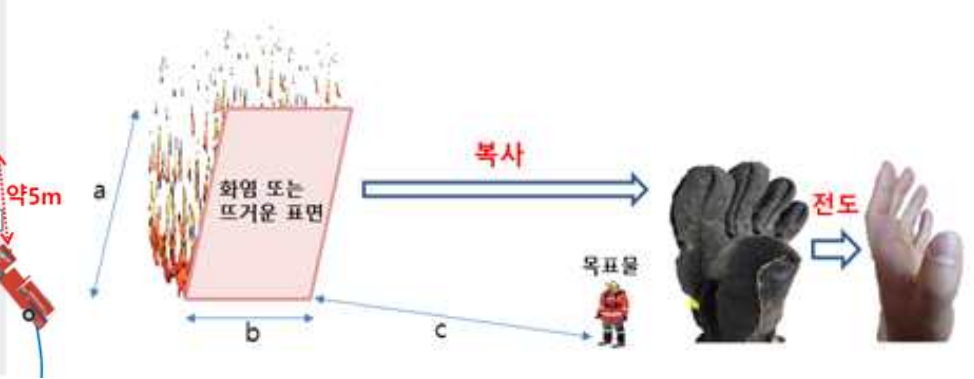
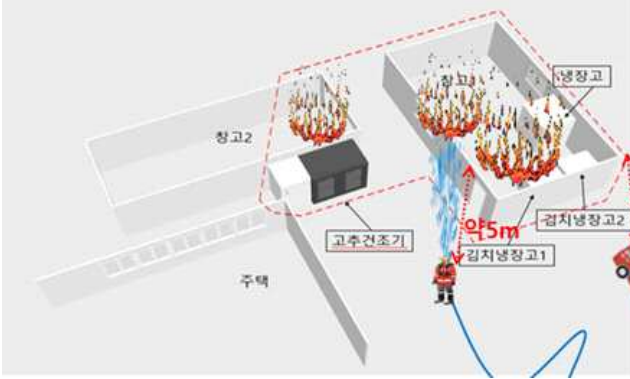
- ✓ (충남) 공장 2층 인명검색 중 반자(샌드위치패널)가 붕괴, 고열에 직접 노출되어 1명 중증 화상
- ✓ 방화복이 화염에 직접 접촉·노출되어 탄화
- ✓ 전체적으로 훼손, 팔 부위 원형 식별 곤란
- ✓ 방화복 손상으로 중간층·안감 재질 노출

- ✓ (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

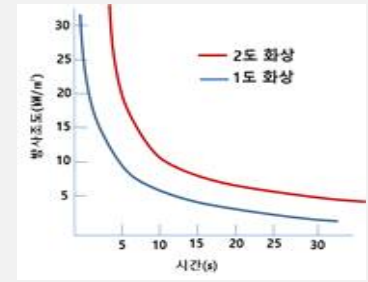
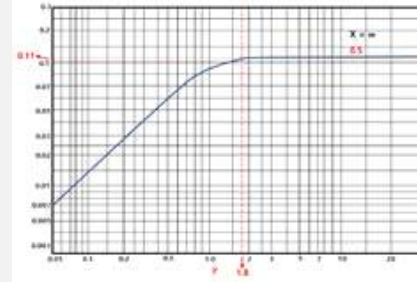
- a(창고 높이) 2.6m, b(창고 폭) 9m, c(이격거리) 5m
- 방화장갑 두께 5mm - 화재대상물 온도 1,100 °C
- 실제 화재진압 활동시간: 18분(1,080초)
- (한계점) 대류, 방화장갑의 경년변화 내열내구성, 습기 등

✓ 복사열(화재대상물 → 대원 방화장갑) 계산

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

- ϵ : 0.4(화염 표면의 방사율 즉, 열물성치 Stainless steel)
- σ : $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$, - 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/m² 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
- α : 열확산도 $k/\rho c$ 밀도 c 비열

물질의 열적 성질에 의해 섬유판은 8.6×10^{-8}

✓ 결론

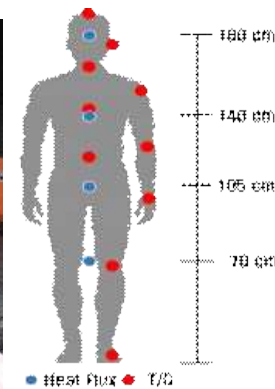
본 현장 진압대원은 약 5분 경과 이후부터 2도 화상 가능

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°C (이마부위)일 때 내부온도는 22.2°C 이지만, 동일부위의 내부온도가 서서히 상승하여 약 440초 후 37.3°C 까지 상승함 ⇒ 방화복 외부 약 $110 \sim 519^\circ\text{C}$, 내부(인체 도달) 온도는 $31.1 \sim 55.2^\circ\text{C}$

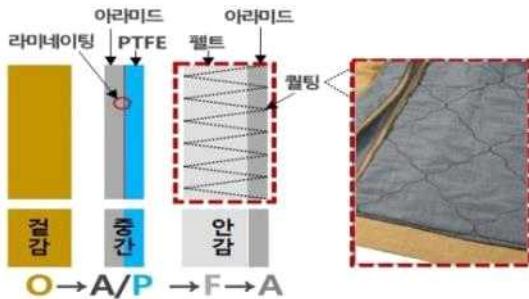


화상사고 관련 연구 · 실험

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



-겉감(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 쿨팅

✓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

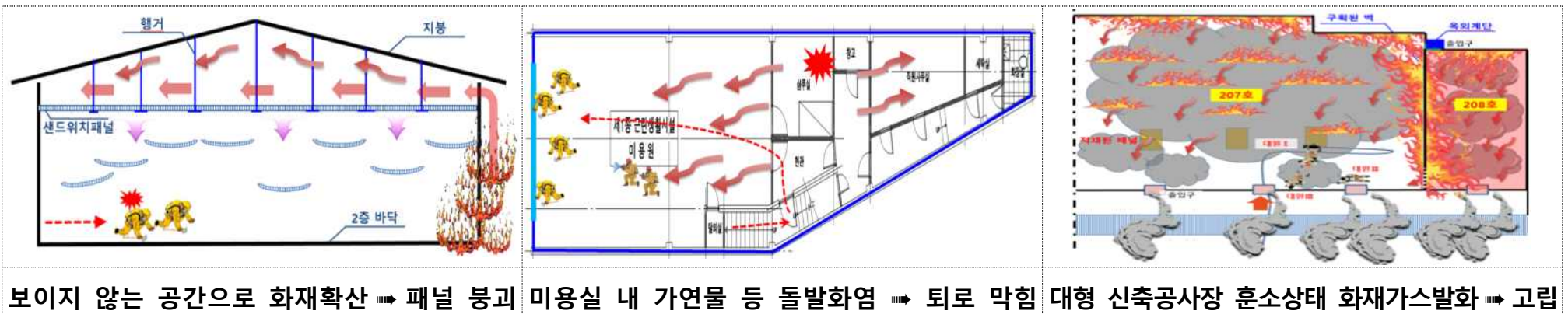
✓ 선착대 소방력을 고려한 위험성 평가 및 전술 결정

▶▶▶ 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



보이지 않는 공간으로 화재확산 ▶▶▶ 패널 붕괴 미용실 내 가연물 등 돌발화염 ▶▶▶ 퇴로 막힘 대형 신축공사장 혼소상태 화재가스발화 ▶▶▶ 고립

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/m² 이하, 화염으로부터 일정 거리 떨어진 위치에서 약 10 ~ 20분 정도 관찰을 잡고 화재진압을 하는 경우
 - **위험 수준** 온도 70 ~ 300°C, 열유속 1.67 ~ 12.56kW/m²으로 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/m²으로 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) 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

사례 1

상가건물 인명검색 및 화재진압 중 구조대원 1명 순직 ※ 「현장 소방활동 안전관리 실무해설서」 264~266쪽

사고 개요

2021년 6월 29일(화) 05:05경 ○○시 ○○구 상가건물 3층의 미용실 화재 현장에서 내부 진입하여 소방활동 중 뒤쪽에서 작은 폭발음과 함께 급격히 화염이 확산되었으며, 출입구로 인한 탈출이 어려워 전면 창문 파괴 후 지상으로 긴급탈출, 소방공무원 탈출하였으나 심한 화상으로 인해 병원에서 치료 중 순직

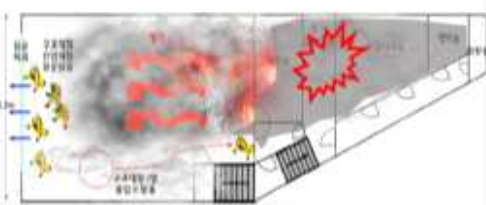
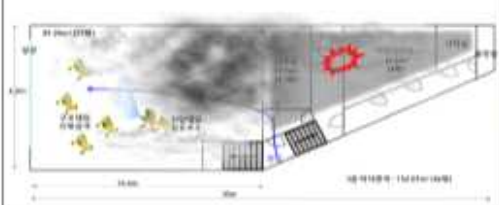
사고 상황 분석



화재발생 사진

현장도착 내부 진입

내부 진입(3층 출입문)



1) 진입대원 2명과 구조대원 4명이 미용실 출입구 내부 진입 화재진압 및 엄호주수하며 창문 방향으로 인명검색

2) 뒤쪽 폭발음과 함께 급격히 화염이 확산 구조대원 1명은 출입구로 탈출 구조대원 3명과 진입대원 2명은 고립상황 발생



진입대원 1

구조대원 1

구조대원 2(순직)

구조대원 3

진입대원 2

3) 화염으로 출입구 탈출이 어려워 창문 파괴 후 지상 탈출 탈출 과정에서 구조대원 2가 내부에 압력 쪼려져 있는 것을 발견, 구조대원 3이 구조하여 창가로 이동시켜 탈출 구조대원 2는 화상(전신 50-60%)으로 병원 치료 중 다음 날 새벽 순직

사고 발생 원인

- 급격한 화염 확산에 내부 고립 발생
- 화염에 노출되어 중증 화상
- 현장 위험 사전파악 및 완화·제거 조치 부족
- 현장활동대원이 착용한 특수방화복의 한계
- 위험현장 돌발위험 대처 한계

개선 및 권고사항

- 현장 의사소통 강화(안전관리 전파 철저)
- 현장지휘관의 안전관리 권한·책임 명확화
- 적극적 위험성 평가(열화상 카메라 등 활용)
- 소방활동 중 안전관리 원칙 준수 등

구조대원 2 개인보호장비



사고현장 조사 분석자료



사례 2

공장 내부 인명검색 중 대원 1명 중증 화상 안전사고

※ 「현장 소방활동 안전관리 실무해설서」 298~299쪽

사고 개요

2021년 7월 31일(토) 16:00경 ○○도 ○○시 공장화재 신고접수. 화재진압 및 인명검색을 위해 화재발생 B동 건물 2층으로 진입, 출입구로부터 5.4m 지점에서 반자(샌드위치 패널)가 화염과 함께 붕괴되어 대원 I(선두)은 2층 창문으로 탈출, 대원 II(후미)는 화염 잔해물에 노출되어 안전사고(중증 화상) 발생, 구조대원 III에 의해 구출됨

사고 상황 분석

사고발생 건물, 현장 도착, 우측면 연소확대 저지, 2층 화재확산

사고발생 상황(대원 I: 선두 탈출, 대원 II: 후미 노출, 대원 III: 대원 II 구조)

사고 발생 시나리오

- 1) 현장 도착 후 B동 1층 화점 집중방수 및 A동 연소확대 방지(선착 구조대도 화재진압 활동)
- 2) 대원 I(후미), II(선두) B동 2층 인명검색을 위해 좌측 계단으로 진입
2층(사무실) 구조대상자가 있다는 정보는 없었으나 인명검색 목적으로 최초 진입
B동 2층 좌측에는 불꽃과 연기가 보이지 않아 관찰 미소지
- 3) 2층 출입구 5.4m 지점 천장(샌드위치 패널)이 박리, 화염과 함께 붕괴되어 대원 I을 덮침
- 4) 대원 II는 붕괴된 위치에서 5.7m 이격된 2층 창문으로 탈출
건물 뒤쪽 외부 캔틸레버(H: 1.84m)를 통해 지상(H: 2.68m)으로 탈출

화재는 B동 1층 발화지점부터 벽면을 타고 보이지 않게 천장 위(샌드위치 패널 위쪽 또는 코어)로 확산, 불꽃이 외부로 보이지 않아 연소상황 인지 불가, 샌드위치 패널 박리 및 붕괴 발생 추정

- 5) 대원 III B동 전연 화재진압활동 2층 대원 I 발견, 구조 후 응급처치

1층 발화 -> 2층 천장 연소확대 -> 샌드위치 패널 박리 -> 붕괴, 대원 탈출 창문, 대원 발견지점, 탈출창문(내부)

대원 I 개인보호장비

				<ol style="list-style-type: none"> 1) 방화복 화염에 직접 노출 형태 식별이 곤란한 상태 (공기호흡기 착용한 등쪽 제외) 2) 방화복 안강폴리아라미드계 섬유+펠트+필름) 노출 3) 응급처치를 위해 방화복 양팔, 상의, 하의 부분 커팅 4) 공기호흡기 세트 플라스틱 수지 소재(연체, 무전기 등) 용융 5) 양압 상태에서 고압조정기, 저압호스 파손 공기량은 「0」 추정 6) 대원 I 헬멧은 안전렌즈를 내린 상태로 용융 및 타아물질 식별
방화복 상의(앞)	방화복 상의(뒤)	방화복 하의(앞)	방화복 하의(뒤)	
헬멧(측면)	면체	보조마스크	인명구조경보기	
공기호흡기 세트	무전기	장갑	방화두건	

사고현장 조사 분석자료(B동)

화재발생 건물(B동) A: 행거 설치 샌드위치 패널 (높이 9m, V, 패턴) B: 박리된 샌드위치 패널 (1층, span 2m, 폭 1m)

2층 출입구 (폭 1.7m) 부상직원 구조위치 대원 → 천장 높이 3.75m

출입구→구조대원 I 거리 5.4m 박리된 샌드위치 패널 (2층, span 2m, 폭 1m) 구조대원 II 탈출 경로 (직선 거리 5.7m) 창문→캔틸레버 (높이 1.84m) 캔틸레버→지상 (높이 2.68m)

샌드위치 패널 관련 논문 요약(GORDON M. E. COOKE Visiting Professor)

- 화재 노출 강판 표면 온도가 130 ~ 350℃ 범위에서 박리 발생, 플렉시온(600-680℃) 전 박리-붕괴될 수 있음
- 화재 시 천장 아랫면은 바이메달란 효과와 같이 아래쪽으로 휘며, 샌드위치 패널 박리는 정착층 강도 손실 시 발생
- 샌드위치 패널 조립 힘 강도는 0에 근접, 하나 또는 양쪽 면이 수평으로 고정되어 있지 않은 한 붕괴 발생
- 뒷면이 화재 노출 시 샌드위치 패널 위쪽으로 휘며, 샌드위치 패널 박리는 정착층 강도 손실 시 다시 발생, 붕괴 위험

사고 개요

2020년 2월 23일 17:02분 ○○지역 주택화재 신고로 출동한 선착대인 ○○119지역대 펌프차량이 현장에 도착하였을 때, 주택부지 내 창고 용도의 컨테이너는 화재 최성기였으며 맞닿아 있는 주택으로 연소확대 중인 상황. 대원 1은 개인안전장비를 착용 후 차량에서 하차하여, 방수포를 이용하여 약 40초 간 방수 후 호스 3본을 전개하여 주택마당으로 진입하여 화재진압을 실시. 화재진압 18분 뒤 대원 1은 손가락 통증을 감지

▶ 양측 손가락 마디 5군데 2도 화상



사고원인

- 급격한 화염으로 인한 복사열, 방화장갑과 맨살 사이 열전도에 의한 내부에 뜨거운 열기의 축적
- 개인보호장비(방화장갑)의 한계성 인식 부족
- 119지역대 소방력의 안전 확보 한계
- 전달 현장지휘관 및 현장안전점검관 부재

국내·외 화상 관련 통계 및 문헌 분석

- 미국소방관 화상 전체의 3% ('15년 2,020명, '18년 1,550명)
- 유발요인(미) 증기화상 60%, 접촉화상 20%, 불꽃화상 20% (국내) 접촉 > 복사열 > 화염 > 뜨거운 물, 물방울, 증기
- 2도(수포) 화상 ⇨ 55℃에서 발생(1도 화상 ⇨ 48℃)
- 부위별 : 손 > 안면 > 목 > 손목 ⇨ 대부분 상부에서 발생 ⇨ 장갑을 끼고도 손에 화상(84명 중 64명)
- 습기 영향으로 화상을 덜 당하는 경우 ⇨ 복사열(wet), 전도(dry)
- 저열유속(10kW/m²) 10.4초, 고열유속(80kW/m²) 0.5초 후 2도 화상

과거 재현실험 분석 — 안전장갑을 착용한 상태에서도 안전사고(화상) 위험요소 존재

- Case 1 : 작은 화염에서도 평균 약 6분간 노출되면 장갑 내부온도 55℃ 도달(외부온도 평균 185℃)
- Case 2 : 불꽃에 접촉된 장갑은 81초, 미접촉(불꽃과의 거리 1cm 미만) 장갑은 332초 만에 55℃ 도달
- Case 3 : 마른 장갑은 평균 82초, 젖은 장갑은 평균 150초 만에 55℃ 도달(장갑 내부 온도 도달시간)
- ※ 젖은 장갑은 마른 장갑에 비하여 일시적으로 초기온도 상승 저지 효과가 있음을 확인
- Case 4 : KFI 기준 장갑의 열통과시험, 전기로 1,000 ± 30℃, 100cm 수평거리 300초 경과 손등(구조용 103초, 진입용 120초) 55℃ 도달. 장갑의 손바닥보다 손등(벨크로 부분)이 취약

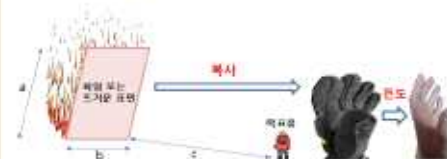


개선 및 권고사항

- (현장대응) 현장 소방활동 시 개인안전 및 보호장비(PPE)의 성능한계 인지
 - ⇨ 작은 화염에도 6분 이상 연속 노출 시 장갑 내부 55℃ 이상 2도 화상 가능
- (현장평가) 선착대 소방력을 고려한 상황평가 및 전술 검토
 - ⇨ 2명 이하 선착대 「SOP 100 현장지휘절차」를 고려하여 현장상황을 지휘부 및 후착대로 전파 및 방어적 전술 선택
 - ⇨ 돌발화재 고온 상황 > 소방력일 경우 후착대 도착 전까지 일정한 안전거리를 유지하여 연소확대 방지에 주력
- (정책부서) 화상사고 관련 안전정책 수립 및 예방 기초자료로 활용

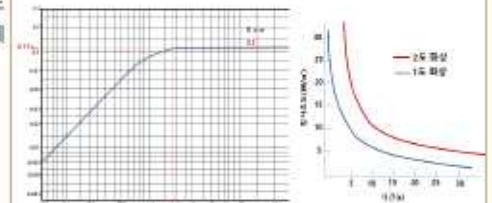
열전달 메카니즘 기반 원인분석

- 열전달(Heat Transfer)
 - 온도 차이로 발생하는 에너지의 전달로 전도, 대류, 복사로 단위 면적당 열전달량(kW/m²)
- 방사율(ε) : 실제 표면의 방사 E / 흑체의 E
- 형태계수(View Factor)
 - 방사체로부터 일정 거리에 있는 한 점에서 복사강도 계산 변수로 거리, 열원의 크기, 열유속을 받는 물체의 방향에 따라 결정



- 열전달 계산에 필요한 조건 및 한계점
 - α(창고 높이) 2.6m, b(창고 폭) 9m, d(이격 거리) 5m
 - 방화장갑 두께 5mm
 - 화재대상물 온도 1,100℃
- 열전달 계산에 필요한 한계점
 - 대류현상, 방화장갑의 내열성 및 내구성
 - 습기 및 부분화상
- 복사열(화재대상물 → 대원 1 방화장갑) 계산
 - $q^* = \epsilon \sigma T^4 F_{12} = 8.87 \text{ kW/m}^2$ ---①
 - ε : 화염 또는 뜨거운 표면의 방사율로 열물성치 Stainless Steels(Typical, Lightly Oxidized) 0.4
 - σ : 스테판 볼츠만 상수 $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$



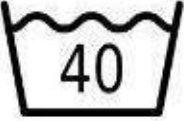


- T : 켈빈(K)온도로서 $1,100 + 273 = 1,373 \text{ K}$
- F₁₂ : 형태계수로 x, y를 치트에서 찾으면 약 0.11
 - x = a/c = 2.6/5 = 0.52, y = b/c = 9/5 = 1.8
- ⇒ 8.87kW/m² Heat flux 약 12초만에 2도 화상



- 열유속(kW/m²) 한계치(최솟값)
 - 맨살고통 : -2
 - 맨살화상 : -4
 - 물체점화 : 10~20
- 열침투 시간(방화장갑 → 대원 1의 맨살) 계산
 - $Time(1\%) = \frac{x^2}{12\alpha} = 24.22 \text{ 초}$ ---②
 - $Time(50\%) = \frac{x^2}{\alpha} = 290.7 \text{ 초}$ ---③
 - x2 : 물질 간 거리로 장갑의 두께는 0.005m
 - α : 열확산도 $k/\rho c$ 로 이때 ρ는 밀도, c는 비열 물질의 열적 성질에 의해 심유편은 8.6×10^{-8}

참고 1

특수방화복 세탁 주의사항 ※ 출처: 국립소방연구원

구 분	주요 내용
 <p>방화복세탁기</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 방화복세탁기 또는 동등 성능의 전용세탁기 사용 ■ 많은 양의 방화복을 넣고 세탁 금지 ➡ 방화복세탁기 35kg기준 6~8벌, 20kg 기준 3~4벌 세탁 ■ 세탁기의 회전은 G-force 100이하로 제한하여 세탁·탈수 ■ 드라이클리닝 방식의 세탁 금지
 <p>방화복</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 외피와 내피를 분리하여 각각 구분하여 세탁 ■ 중압의 호스 또는 브러쉬를 이용하여 유해물질 제거 ■ 외피와 내피는 모두 뒤집어서 세탁 ■ 지퍼와 파스너테이프(벨크로)는 잠근 상태로 세탁 ■ 일반의류와 방화복을 혼합하여 세탁 금지
 <p>세탁 온도</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 40°C 정도의 온수를 사용하여 세탁 ■ 세탁온도가 높을 경우 방수투습천 손상 ■ 기름·땀·오물 등은 브러쉬를 이용하여 제거 후 세탁
 <p>세탁 세제</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 액체형 방화복 세탁 세제 사용(가루형은 완전히 녹여서 사용) ■ pH6.0~10.5 이하 범위의 중성·약알칼리성세제 사용 ■ 섬유유연제 사용시 방염성능 및 투습기능 저하로 사용 금지 ■ 염소계표백제(락스 등) 절대 사용 금지 ■ 세제는 표준 사용량 준수하되 오염이 심할 경우 추가 투입
 <p>건조기</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 방화복은 탈수기나 손으로 짜지 말고 방화복을 수건으로 감싼 후 가볍게 눌러 물기 제거 후 건조 ■ 그늘지고 통풍이 잘 되는 자연건조 권장 ■ 직사광선 및 자외선 등에서 사용 건조 금지(아라미드 섬유 강도 약화) ■ 기계건조는 공기순환만을 이용하여 건조 ■ 기계건조는 온도가 40°C 이상이 되지 않도록 하여 건조

1. 방화복의 관리는 제조사에서 제공하는 '취급설명서'에 따라 세탁 및 관리를 하되 제조사 기준에 없는 경우에는 이 기준을 적용한다.
2. 사용 전 방화복 성능 및 사용방법 등에 관한 교육을 받아야 한다.
 - ▶ 주요 성능 및 사용의 한계 ▶ 사용 및 보관하는 방법 ▶ 오염제거 등 세탁 방법 ▶ 폐기를 결정하는 방법

3. 일상점검 시 다음의 사항을 반드시 확인하여야 한다.
 - ▶ 유해물질에 의한 오염 여부 ▶ 물리적 손상(찢어짐, 헤집 등) 정도
 - ▶ 열·화학물질 등으로 인한 손상(탄화) 정도
 - ▶ 손상된 부속품(연결고리, 반사띠 등) 유무
 - ▶ 방투습필름의 방수(물뿌림 등) 유무



4. 항상 청결상태를 유지하여야 하며, 수선이 필요한 경우 임의로 수선하지 말고 반드시 제조사에 문의하여 지시에 따라야 한다.
5. 똑바로 서 있는 상태에서 가능한 손을 머리 위로 높게 뻗고 상체를 앞·뒤·좌·우로 움직여 신체에 맞는지 확인하여야 한다.
6. 변색, 부스러짐 등 성능저하의 원인이 될 수 있으므로 직사광선이나 화기를 피하고 통풍이 잘 되는 서늘한 곳(전용보관함 등)에 보관하여야 한다.

7. 습한 곳에 보관할 경우 곰팡이 등 진균류 증식으로 피부 자극, 발진 및 질병 원인이 되므로 습한 곳에 보관을 금지하고, 곰팡이가 있는 경우 반드시 세탁 후 사용하여야 한다.



8. 찢어짐, 변색, 탄화, 헤집 등 외관상 이상이 있거나 성능에 이상이 있다고 의심되는 경우 즉시 사용을 중지하고 불용을 검토하여야 한다.

1. 특수방화복에 사용되는 섬유는 세탁을 하여도 내열성능은 크게 저하되지 않으나 잦은 세탁은 발수도 저하로 물 침투 및 외부 오염원에 의해 쉽게 오염이 될 수 있다.

2. 일반세탁 시 전용 세탁공간을 활용하여 오·폐수 방출이 가능한 하수구가 있는 곳에서 실시한다.

3. 세탁 시 장갑을 착용하고, 눈과 얼굴에 오염된 세탁수가 묻는 것을 방지하기 위해 보안경을 착용하여야 한다.



※ 방화복에 묻은 유해물질 및 세탁 시 발생하는 증기는 인체에 해로울 수 있으므로 흡입 금지

4. 세탁하기 전 외부에 묻은 오염물질은 부드러운 털브러쉬(칫솔 등)를 사용하여 가볍게 떨어낸다. ※ 거친 재질의 브러쉬 및 고압의 물로 세척 금지



5. 겉감과 안감을 분리한 후 중성세제를 30°C 정도의 미지근한 물에 희석하여 안감까지 스며들 수 있도록 가볍게 눌러 세탁한다.

※ 염소 성분이 함유된 표백제, 마모제 및 pH 10.5 이상의 세제는 방수막 필름에 손상을 줄 수 있으므로 사용 금지

6. 방화복에 남아 있는 물기는 탈수기나 손으로 짜지 말고 방화복을 수건으로 감싼 다음 가볍게 눌러 물기를 제거하고 옷걸이에 걸어 통풍이 잘 되는 그늘에서 천천히 건조시킨다.

※ 세탁 후 건조는 원단성능 저하 방지를 위해 자외선에 노출되지 않는 장소에서 자연건조 권장

1. 세탁기는 드럼식(전면 투입형) 세탁기를 사용하고 세제는 pH6~10.5 범위에 있는 제품 또는 약칼리성 세제를 사용한다.

2. 세탁기를 활용한 세탁은 최소 6개월 마다 1회 실시하는 것을 권장한다.

(짚은 세탁은 방화복의 발수도 등을 저하시킬 수 있음) ※ 단, 혈액·체액·타르·연료·수지·페인트·화학물질 등에 노출된 경우 즉시 세탁

3. 세탁기에 방화복을 투입하기 전 외부의 오염물질을 부드러운 털브러쉬(칫솔 등)로 털어 내거나 흐르는 미지근한 물로 씻어낸다.



4. 세탁 시 물의 온도는 40°C이하로 유지하고 방화복과 일반의류를 혼용하여 세탁할 경우 방화복의 오염물질이 일반의류를 오염시킬 수 있으므로 혼용세탁은 금지한다.

※ 염소 성분이 함유된 표백제, 마모제 및 pH 10.5 이상의 세제는 방수막 필름에 손상을 줄 수 있으므로 사용 금지

5. 세탁 전 주머니, 고리 등의 닫힘상태를 확인하고 부착물 및 파스너테이프의 성능유지를 위해 세탁망에 담아 저속회전으로 세탁한다.



※ 걸감의 오염물이 내피로 확대되지 않도록 분리하여 세탁한다.

6. 세탁 후 탈수 시 세탁조의 회전속도는 G-force 100 이하로 조절하여 안감(단열층)과 투습방수천의 손상이 없도록 한다.

7. 건조기를 활용한 건조온도는 40°C 이하(저온, 냉풍모드)에서 건조하고, 가급적 통풍이 잘 되는 그늘진 곳에서 자연 건조한다.



8. 드라이크리닝 방식의 세탁은 방화복의 성능을 크게 손상시킬 수 있으므로 금지한다.

참고 5

특수방화복 성능기준

※ 출처: 소방장비표준규격

항 목	성능(기준)
중량	4kg 이하
봉제	1cm당 3땀 이상
크기	1호(155cm) ~ 9호(191cm)
재료	아라미드계 섬유 등
난연성능	잔염시간 2초 이내 탄화길이 10cm 이내
내열성능	260°C에서 5분 노출시 용융, 적하하지 않고 수축률이 5%이하
불꽃방호성능	HTI24°C ⇒ 17초 HTI24°C-HTI12°C ⇒ 6초
복사방호성능	RHTI24°C ⇒ 26초 RHTI24°C-RHTI12°C ⇒ 8초
불꽃및복사열방호성능	TTI ≥ 1,400kJ/m²
복사열노출후잔류강도	당겼을 때 견디는 힘 (600N 이상)
압축전도내열성	260°C에서 압축전도내열성 등급 13.5초 이상
걸감인장강도	당겼을 때 견디는 힘 (800N 이상)
걸감인열강도	찢어질 때 견디는 힘 (40N 이상)

항 목	성능(기준)
투습방수천도인열강도	찢어질 때 견디는 힘(10N 이상)
질물소재의봉합강도	봉합부위의 견디는 힘 (중요A 450N, 중요B 330N 이상)
봉합강도	180N 이상
발수성능	5회 세탁 후 4급 이상
흡수저항성	흡수율은 최대 30% 이하
내수도	175kPa 이상, 봉제선은 20kPa
액체침투저항성	1시간 이상 4가지 액체시험액의 침투 저항성
투습저항성	30m² Pa/W 이하
내수축성	세탁 5회 후 수축률 ±5% 이내
부속물내식성능	염수분무시 부식되지 않을 것
반사테이프성능	KS K ISO 20471(고가시성 의복) 성능기준 이상
섬유혼용율	소재 혼용율 신청치의 ± 5 %이내
마네킹시험	2도 및 3도 화상의 합이 전체 몸통의 50% 이하