

담뱃불에 의한 훈소화재 특성에 관한 연구

서울강남소방서, * 한국사이버대학교, + 경원대학교 황태연 · 이창우* · 최돈묵⁺

A Study on the Characteristics of Smoldering Fire by Cigarette Fires

T. Y. Hwang · G. W. Lee* · D. M. Choi⁺

요 약

본 연구에서는 담뱃불 화재 연소특성에 대한 사례분석, 대기 중에서 담뱃불이 연소되는 시간, 담뱃불이 연소될 때 온도측정, 훈소가 가능한 물질의 연소실험, 담뱃불 화재재현실험을 통해 담뱃불화재 특성을 파악하여 담뱃불화재 감식기법 도출하였다. 담뱃불에 의해 화재가 발생되기 위해서는 산소공급, 가연물 조건 등을 충족할 때 화재로 진전됨을 알 수 있었으며, 반대로 그런 조건이 부합되지 않을 때는 쉽게 화재로 전이되지 않음을 알 수 있었다.

Abstract

In this study, we drew identification techniques of cigarette fires through the cases analyses of the combustion characteristics, the combustion time, the combustion temperature, the combustion test of smoldering materials and the reappearance experiments of cigarette fires. To initiate fires by cigarette fire, the conditions of oxygen supply,

combustible materials must be satisfied. On the other hand, fires were not spreaded easily under the insufficient combustion conditions.

Key words : Combustion, Smoldering fire, Combustible material

⁺ fire@kyungwon.ac.kr

1. 서 론

1. 연구배경

인류가 시작되면서 사람들은 불을 통해서 사회발전을 이룩하였으며 불이 없는 생활은 생각할 수조차 없는 아주 밀접한 관계가 형성되었다. 그러나 불이 이와 같이 인류에게 이로움만 주었던 것은 아니라 반면에 해로움도 주었는데 그것은 화재라 할 수 있다.

화재는 사람의 활동 속에서 나타난 것으로 사회 환경을 지배받는 인자이다. 그러므로 화재는 사회 특징을 대변한다고 할 수 있다. 우리나라는 농업사회에서 공업사회로 발전하면서 화재원인도 변화를 거듭하여 왔는데 그것은 에너지원 사용이 무엇인가에 따라 달라진다는 것이다. 즉, 화재는 사람들이 접하는 환경에 의해 발생한다는 것이다. 다시 말하면, 사람이 접하는 횡수가 많을수록 화재발생 확률이 높다는 것이다.

우리나라에서 담뱃불은 화재원인에서 주요 선두그룹을 차지하고 있는데 2005년에는 전기에 이어 두 번째 높은 비율을 차지하고 있다. 이는 과거에서부터 현재까지 흡연인구가 상당수 존재하고 있음을 나타낸다. 흡연인구가 점차 감소추세에 있지만 앞으로도 화재원인에 있어 큰 변화는 없을 것으로 생각된다.

담뱃불에 의한 화재는 주로 인명피해를 유발하는데 그 이유는 담뱃불이 연소되면서 훈소반응을 띠기 때문이다. 훈소반응은 불꽃이 없이 연기가 발생되면서 연소 면에서 별건 발열체를 나타내는 표면연소라 할 수 있다. 이 연소의 특징은 연소반응이 일어나는 곳에 적은 산소량이 유입되어 불완전 연소반응이 일어나면서 무색무취인 일산화탄소가 다량 생성된다는 것이다. 특히, 가장 치명적인 것은 무의식중에 담뱃불에 의해 발생하는 화재가 그렇다. 그 예는 만취한 사람이 담배를 피우면서 잠이 드는 경우이다. 그러나 사람들은 이와 같은 담뱃불에 대한 특성을 알지 못해 담뱃불을 소홀히 취급함으로써 담뱃불화재가 끊이지 않고 발생되고 있음을 간과해서는 안 된다.

담뱃불에 의한 화재가 지속적으로 발생되고 있지만 그에 대한 예방대책은 미비한 실정이다. 담뱃불화재를 예방하기 위해서는 담뱃불에 대한

정확한 원인조사가 선행되어야 한다. 하지만 담뱃불 화재는 연소되면서 그 증거가 남지 않고 모두 소실됨으로 감식이 어렵고 훈소화재에서 불꽃화재로 전이되면서 조사자가 불꽃화재 점화원에 대해 조사함으로써 오관할 소지가 있다. 또한 국내에 담뱃불 연소과정에 대한 연구가 이루어지지 않아 조사자가 담뱃불 화재에 접근하는데 곤란한 점이 있었다.

본 연구는 조사자가 항상 관념적으로 알고 있었던 담뱃불에 대한 연소과정, 가연물에 따른 훈소물질, 담뱃불이 훈소에서 불꽃연소로 진행과정에 대한 재현실험을 통해 조사자가 담뱃불화재에 대한 감식능력 향상에 기본서가 되고자 한다.

2. 연구목적

최근에 우리나라 흡연인구는 점차 감소하고 있으나 담뱃불화재는 전기 다음으로 높은 점유율을 차지하고 있는 실정이다. 그러나 담뱃불화재에 대한 예방대책은 극히 초보적인 수준에 머물러 있다. 그런 이유는 담뱃불화재에 대한 정확한 원인조사가 어렵기 때문이다. 담배는 연소되면서 그 증거가 모두 소실되어 조사자가 담뱃불에 대한 연소특성과 진행과정을 이해하지 못하면 잘못된 결론에 도달하여 예방대책도 다른 방향으로 흘러갈 수 없다. 또한 담뱃불의 훈소반응과 시간도 매우 중요하며 그런 것들이 물질이 담뱃불에 난연성을 갖도록 적용되어야 한다. 이와 같은 것에 도달하기 위해서는 무엇보다도 조사자가 정확한 원인조사가 선행되어야 한다.

본 연구는 조사자에게 담뱃불이 연소과정과 시간, 담뱃불이 다른 가연물에 떨어졌을 때 훈소될 수 물질, 훈소될 수 있는 물질에 담뱃불이 떨어졌을 때 훈소에서 불꽃화재로 전이되는 것을

실험을 통해 조사자가 담뱃불연소에 대한 이해를 돕고 그것을 통해 정확한 화재원인조사를 실시하기 위한 감식능력 향상을 도모하고자 한다.

3. 연구방향 및 방법

담뱃불화재는 초기에 혼소반응을 띤다. 그와 같은 반응은 불완전연소를 수반하면서 다량의 일산화탄소가 생성되고 인명에 치명적인 결과를 초래하는 근본 요인으로 인식되고 있다. 이처럼 담뱃불화재가 발생하면서 사회에 미치는 영향과 담뱃불 연소과정을 이해하고 감식능력에 도움을 주기 위해 네 가지 방향으로 연구를 진행하였다.

첫째, 담뱃불화재가 우리나라에서 발생하는 화재통계 분석을 실시하였다. 이는 담뱃불화재가 사회에 미치는 영향을 파악하는데 중점을 두었다.

둘째, 담뱃불이 연소되는 과정에 대한 이론을 정립하기 위해 문헌을 통해 이론적 배경을 연구하여 혼소연소에 대한 개념을 정리하는데 초점을 두었다. 셋째, 실제 화재가 발생한 사건을 연구하여 이론과 일치하는데 중점을 두었고 담뱃불 재현실험을 하기 위한 기초 자료로 활용하였고 담뱃불화재 감식에 있어 참고토록 하였다. 넷째, 담뱃불이 연소되는 실험을 실시하였다. 연소 실험은 담뱃불이 놓인 상태에 따라 담배가 연소되는 시간을 측정하여 조사자가 담뱃불 연소시 걸리는 시간개념을 파악하는데 주력하였다. 담뱃불이 연소될 때 온도분포를 파악하여 담뱃불이 가연물에 닿을 때 가연물에 미치는 상태를 파악하였다. 또한 실제 발생한 화재사례를 착안하여 쓰레기통에 화장지와 담뱃불을 두고 연소되는 과정을 이해하는데 초점을 두어 실험을 실시하였다.

실험결과는 분석을 거쳐 담뱃불화재에 대한 특징을 파악하여 그 형상을 정형화시켜 조사자의 감식능력 제고하여 담뱃불화재 조사발전에 기여하고자 하였다.

II. 본 론

1. 담뱃불 화재발생 현황

1.1. 담뱃불화재 현황

전국 화재발생건수 중 담뱃불이 화재원인으로 차지한 비율은 전기 다음으로 높다. 2005년도 전국화재 발생현황을 살펴보면 전체 32,340건 중 전기가 10,450건으로 31.9%를 점유하였으며, 다음으로는 담뱃불이 3,289건으로 10.2%를 차지하였다. 표 1에서 볼 수 있드시 최근 흡연인구가 점차 감소하고 있지만 아직도 화재원인으로 높은 점유율을 보이고 있음을 알 수 있다. 담뱃불에 의한 화재발생 요인은 대부분이 흡연한 후 담뱃불을 처리할 때 소홀히 취급하기 때문이다. 이를 구체적으로 살펴보면, 쓰레기가 있는 곳이나 화장실 쓰레기통 내부에 담뱃불을 버려 화재가 발생하거나, 만취한 자가 침구류 위에서 담뱃불을 끄지 않고 잠에 들면서 화재가 발생하는 경우를 들 수 있다.

담뱃불에 의한 사망확률은 방화와 전기 다음으로 높다. 2006년도 인명피해를 살펴보면 전체 사망자 수 446명 중 방화 139명이 발생하여 31.2%를 점유하였고, 다음은 전기가 43명이 유발되어 9.6%를 차지하였으며, 그 다음은 담뱃불이 17명이 발생하여 3.8%를 나타냈다. 이는 담뱃불이 화재로 인한 사망확률이 높다는 것을 말하는데 그 요인은 담뱃불화재가 혼소화재를 거

Table. 1 The occurrence status of cigarette fires during the recent three years

구 분	화재건수		인명피해(명)		재산피해(백만원)	
	전 체	담뱃불(점유율)	전 체	담뱃불	전 체	담뱃불
2004년	32,737	3,585(11.0%)	2,304	123(5.3%)	146,634	5,342(3.6%)
2005년	32,340	3,289(10.2%)	2,342	122(5.2%)	171,374	4,312(2.5%)
2006년	31,778	3,311(10.4%)	2,180	89(4.1%)	150,792	4,707(3.1%)

치기 때문이다. 다시 말하면 담뱃불이 혼소반응을 통해서 발생된 연기와 일산화탄소가 무의식 있는 사람을 사망에 이르게 하는 것이다.

담뱃불화재는 이처럼 화재발생 점유율과 인명피해에서 우리 사회에 커다란 악영향을 미치고 있다. 그러나 불행하게도 담뱃불화재 예방요령이 아직도 초보적인 단계에 머물러 있다는 것이다. 이는 담뱃불화재에 대한 기본적인 메커니즘에 대한 정확한 해석이 부족하기 때문에 담뱃불에 의한 화재 진행과정을 이해하지 못하는데 비롯된 것이다. 따라서 담뱃불화재 진행과정에 대한 전반적인 상황을 이해하여 그에 대한 예방대책 마련이 시급한 실정이다.

2. 혼소화재 이론적 배경

혼소화재는 고체가연물과 산소 사이에 반응이

상대적으로 느린 연소이다. 반응이 산소가 고체 표면으로 확산되면서 일어나고 표면은 적열 및 탄화가 진행된다. 적열온도는 1,000℃ 이상임을 의미한다. 가연물에서 혼소반응이 진행될 때 공기량 유입이 많게 될 경우 불길연소로 전환될 수도 있다. 주택에서 발생하는 대표적인 혼소화재는 담뱃불을 가정용 가구와 매트리스에 버릴 경우에 발생된다. 이때 불완전연소 반응은 이산화탄소 대신에 일산화탄소 수치를 증가시킨다. 그 수치는 가연물의 10% 이상이 일산화탄소가 생성된다. 혼소화재의 일반적인 예는 Fig. 1과 같다²⁻⁴⁾.

혼소화재는 다공성 고체가연물, 혼합연료, 불침윤성 고체, 누적 고체가연물 쓰레기장에서 발생될 수 있다. 그때 공기가 필요하지만 많지 않아도 된다. 그 이유는 과정이 매우 느리기 때문이다. 기류는 각 방향에서 혼소면을 향할 수 있

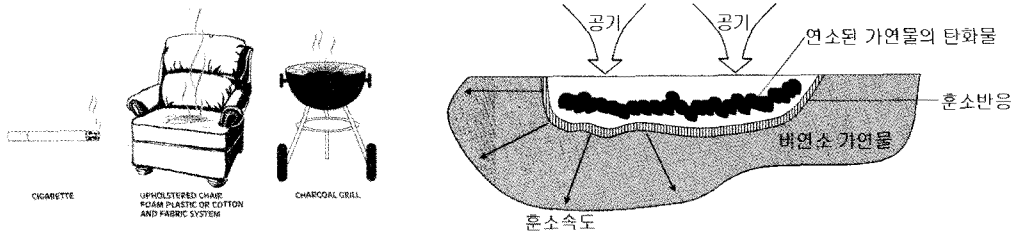


Fig. 1. General illustration of smoldering. Fig. 2. The procedure of smoldering.

고 부력에 의해 기류가 형성되어 자연적으로 유입될 수 있다. Fig. 2는 혼소과정을 체계적으로 나타낸 것이다.

혼소반응 속도는 여러 가지 요인들에 따라 다르지만 일반적으로 $0.001 \sim 0.1 \text{cm/s}$ (약 $1 \sim 5 \text{mm/분}$)이다. 반응은 매우 느리지만 일산화탄소가 생성되므로 사람에게 치명적일 수 있다.

3. 화재사례

3.1. 서울시 양천구 화재

화재는 2006년 3월 2일 00:59에 서울시 양천구 시장 인근에 있는 다가구주택 지하1층에서 발생한 사례이다. 이곳에는 어머니와 11살과 10살인 자매 2명이 거주하고 있었다. 화재 당일에 아이들은 자신들의 방인 작은방에 들어가 잠에 들었고 평소 담배를 피우는 어머니는 거실에서 소주를 마시고 담배를 피우고 그것을 휴지로 말아 담배를 끄고 거실에 있는 쓰레기통에 버리고 시장에서 다시 술을 마시고 있었다.

화재건물 1층에 거주하는 최초 화재발견자는 당시에 잠을 자고 있던 중 따는 냄새를 맡고 잠에서 깨어 밖을 내다보았고 그때 지하층에서 연기가 올라오는 것을 목격하고 소방서에 화재신고를 하였으며, 또한 시장에서 영업을 하고 있는 상인은 타는 냄새를 맡고 그 건물로 가서 살펴보니 출입문 틈새로 연기가 올라오는 것을 확인하였다. 화재신고를 받고 출동한 소방대는 출입문을 개방하여 내부로 진입하였을 때는 불꽃이 없이 연기가 가득 찬 상황이었다.

발화지점은 밥통과 싱크대 사이로 판단되었으며 그곳에는 전기밥통과 휴지통이 존재하였다. 전기밥통 내부에는 밥이 그대로 존재하였고 밥통 내부 전기적인 고장이나 특이점을 발견할 수

없었고 밥통 인입전선에 합선흔적이 존재하였다. 그러나 그 합선흔적은 화재로 전이될 요인이 존재하지 않았고 그 지점에서 연소가 시작된 흔적이 존재하지 않아 화재원인으로는 배제되었다. 휴지통 내부에는 평소 거주자의 습관을 확인할 수 있었는데 그곳에는 Photo.1과 같이 피우다 버린 담배가 휴지에 쌓여 차곡차곡 쌓여 있었고 휴지통 연소는 한쪽 부분이 심하게 연소되어 있었다. 그곳에서 화재가 발생할 수 있는 요인은 흡연하고 휴지에 싸서 불을 끈 담배가 제대로 꺼지지 않아 담뱃불과 휴지가 혼소가 진행되면서 열이 축적되어 불꽃으로 전이되고 거실 내부는 외부와의 출입문이 폐쇄된 밀폐된 구조로서 혼소과정에 의해 산소농도 감소와 발생된 다량의 연기에 의해 산소농도 저하로 짧은 기간동안 불꽃화재로 전이되었으나 산소농도 저하로 화재가 자연 소화된 화재였으나 불행하게도 방에서 잠을 자고 있던 아이들은 일산화탄소와 연기에 질식되어 뇌사상태에 이르게 된 화재다.

이 화재는 화재신고 후 도착하여 상황종료까지 10분 정도 소요된 것으로 화재는 국부적이었으나 인명피해에 치명적인 유발한 화재로서 전형적인 혼소화재를 띠고 있다.

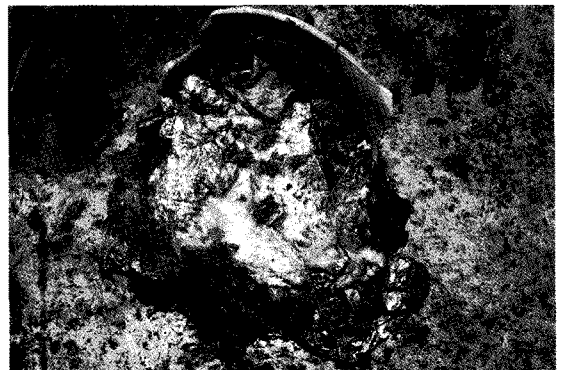


Photo. 1. The inner part of trash box.

3.2. 서울시 종로구 화재

화재는 2006년 9월 2일 20:04에 종로구 낙원동에 있는 ○○모텔 7층 806호실에서 20:04에 발생하였다. 이 호실은 오후 5시 30분경에 젊은 남녀 투숙객이 들어와 약 2시간 후인 오후 7시 15분에 나갔다. 화재발견은 종업원이 키운터에서 있는데 CCTV에서 연기를 목격하고 계단을 통해 뛰어 올라갔을 때, 그 호실 출입문이 약간 열린 상태에서 연기가 새어나오고 있는 상태에서 내부를 확인하기 위해 출입문을 완전히 열어보니 내부에서 다량의 연기가 나왔고 내부에는 불꽃이 보이지 않고 연기가 가득 찬 상태로 존재하였다. 그는 즉시 엘리베이터실로 달려가 그곳에 있는 소화기를 들고 내부에 완전히 들어가지 못하고 출입구 입구에서 내부로 소화기를 분사한 후 다른 객실에 있는 투숙객을 대피시켰다.

화재발생 지점은 침대 상단으로 그곳에는 이불과 베개가 있었고 상부에는 전등이 존재하였다. 상단 전등에는 전기적인 특이점이 존재하지 않아 전기적인 원인으로는 배제되고 침대 상단에 투숙객이 퇴실하면서 흡연하고 침대에 버린 담뱃불에 의해 발화된 것으로 추정되었다.



Photo. 2. The state of before fire.

3.3. 외국 담뱃불 화재사례

화재는 전시장과 작업장으로 된 작업장에서 재고조사 중에 발생했다. 앞면은 대형 강화유리가 존재하고 사무실은 종이로 된 조립식 판과 강화유리가 설치되고 작업실과 전시설은 블록으로 구획되어 있었다. 벽은 페인트가 칠해졌고 바닥은 카펫이 깔려 있었다. 전시설과 작업실을 포함한 판매대리점 건물은 주말에는 휴무하고 주유소는 연료판매를 위해 영업을 한다. 작업장에서는 금연하도록 되어 있다.

재고조사는 회계감사원이 있는 Friday 협의회와 함께 시작했다. 회사 중견관리 2명은 토요일에 접수 직원과 함께 일을 하였고 월요일에 계획된 확대회의 프레젠테이션을 위해 문서를 만들었다. 관리자와 판매부장은 접수 직원 사무실과 점포를 오가면서 업무를 수행했고 접수 직원은 그녀 컴퓨터 단말기에서 재고사항을 집계하고 사진을 복사했다. 컴퓨터 책상은 가게 문과 전시설 사이 구석에 위치하고 블록 벽에 닿은 서랍 위에 사진복사기가 있었다. 접수 직원의 진술에 의하면 하루 종일 보고서, 통지서, 기타 서류들이 사무실과 바닥에 있었다고 했다.

접수 직원이 건물을 나간 맨 마지막 사람이었

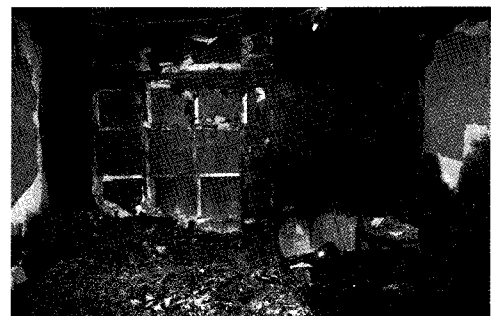


Photo. 2. The state of after fire.

다. 그녀는 장비와 전등 전원을 모두 차단하고 사무실과 외부 문을 잠근 채 약 17:00에 퇴근했다. 화재발견은 주유소 고객이 하였다. 그는 건물 앞에서 강화유리를 통해 대충 둘러보던 중 사무실에서 불길을 목격하고 경보기를 눌렀다. 소방대는 17:10에 신고를 받고 선착대는 현장에 8분 후에 도착했다. 소방대는 문이 잠긴 것을 발견했고 유리는 그대로 있었다.

화재는 빨리 발견되었으며 소방대는 경보가 울린 후 8분 내에 현장에 도착했다. 그럼에도 불구하고 외부 벽면과 사무실 수용물이 심한 피해를 입었다. 사무실 집기의 가연성 부분은 연소로 소실되고 종이는 바닥에 널브러져 있었다. 의자와 책상은 심하게 탄화되었으며 구획부분은 바닥까지 연소되어 컴퓨터 책상 측면이 구멍이 뚫렸다. 또한 점포와 전시설 신차 2대가 피해를 입었다. 연소진행방향은 가게 문과 전시설 사이에 구석 부분 바닥에서 시작되었다. 그 지점은 직원들이 하루 종일 일한 장소였다. 조사결과 전기적인 원인은 배제되었으며 관련 직원들이 의심되었다.

흡연가능성이 제기되자 관리부장은 작업장에서는 금연을 준수하고 있다고 단호하게 말했다. 그러나 관련 직원들은 재고조사 동안 거리낌 없이 담배를 피웠다고 시인했다. 이유는 정상근무가 아니기 때문이라고 했다. 담배는 화재 발생 전날부터 피웠으며 회계감사원은 사전모임에서 재떨이를 요구했다. 재고조사에 관련 직원들 역시 담배에 불을 붙이고 다음날에도 계속 담배를 피웠다. 접수 직원은 정상근무 시간에는 담배를 피우지 않았더라도 화재발생 전날부터 당시까지 담배를 피웠다고 인정했다. 그녀는 화재가 발생한 날에 재떨이가 사무실에 있었는지 기억하지 못했고 그것을 사용했는지 기억할 수 없었다.

그녀는 담배를 전시설 문의 사무실 나가기 전에 카펫이 깔린 바닥에 문질러 끄고 확인점검은 없었다. 그녀가 구내를 떠나고 10분 후에 화재가 발견됐다. 조사자는 거주자가 담배를 피우지 않았다고 하는 곳에서도 화재가 발생되고 있음을 인지하여야 한다. 또한 부주의로 인해 담뱃불을 떨어뜨리거나 버릴 수 있다.

4. 연소실험

4.1. 담배연소 실험

화재현장에서 조사자가 현장감식 중 관계자가 담배를 피우고 나간 시간과 화재발견 시간은 중요한 상관관계를 가진다. 그래서 본 실험은 담배 1개비가 놓인 상태에 따라 연소되는 시간을 측정하여 실제 화재현장에서 담뱃불이 의심될 때 담뱃불 연소되는 시간을 측정하고 담뱃불이 일반가연물에 떨어져 훈소화재에서 불꽃화재로 전이될 수 있는 시간에 대해 이해를 돕기 위해 실험을 실시하였다.

담배 1개비가 연소되는 시간은 놓인 상태, 풍속, 습도, 온도 등 주변 상황에 따라 다르지만 일반적으로 대기에 개방된 공간에서 실험을 진행하였으며, 실험에 사용된 장비는 풍속계, 온도계, 습도계, 전자저울, 열화상카메라, 디지털비디오카메라, 디지털카메라, 초시계를 가지고 실험에 임했다. 실험당시 기상상태는 온도 25.3℃, 풍속 0.03~0.12m/s, 습도 45%로 맑은 날씨였다.

실험에 사용된 담배는 시중에서 판매되는 "This"를 사용하였고, 가로와 세로로 놓였을 때 시간을 측정하였다. 담배가 가로로 놓였을 때는 콘크리트 위에 고무판을 두고 담배를 라이터를 이용 자연 상태로 불을 붙인 후 연소시간을 측정하였고 세로로 놓였을 때는 스티로폼에 구멍

을 뚫고 그곳에 담배를 거치하고 약 바닥에서 1m 상부에서 라이터를 이용 자연 상태로 불을 붙인 후 연소시간을 측정하였다.(연소실험 배치 Photo. 4와 5 참고)

담배는 불이 붙으면 꺼지지 않고 불꽃이 생성되지 않은 채 지속적으로 훈소반응이 전개되었

다. 담배가 연소되면서 연기가 나왔고 그 색깔은 백색이었다. 담배연소는 3부분으로 나뉘는데 그 부분은 연소반응지역(별건 발광체), 탄화지역(연소열에 의해 담배 탄화부분), 연소종료지역(재)이다.

실험결과는 Table 2와 같으며 담배가 가로로

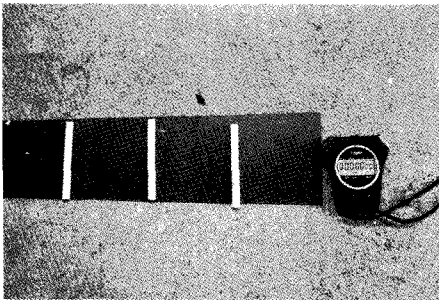


Photo. 4. The combustion test of cigarette(transverse).

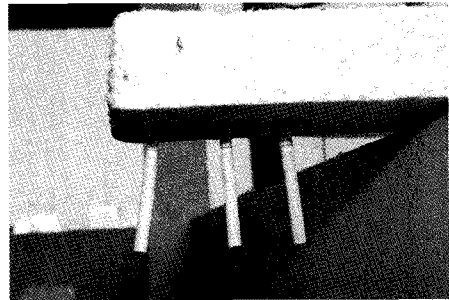


Photo. 5. The combustion test of cigarette(vertical).

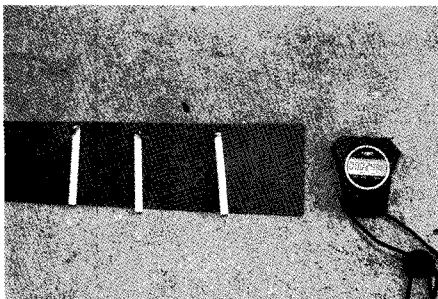


Photo. 6. The combustion progress of the cigarette(transverse).

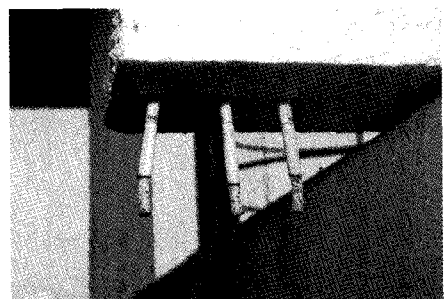


Photo. 6. The combustion progress of the cigarette(vertical).

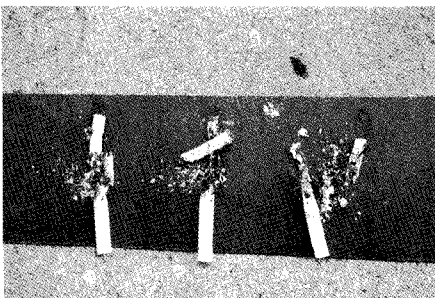


Photo. 8. The combustion completion of the cigarette(transverse).

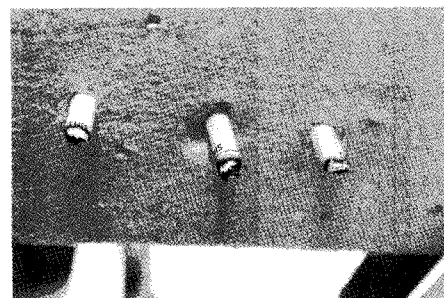


Photo. 9. The combustion completion of the cigarette(vertical).

놓였을 때는 연소시간이 약 9분에서 11분 이내였고 세로로 놓였을 때는 30초에서 1분 이내로 연소된 후 담배 끝부분인 필터에서 연소는 더 이상 진행되지 않았다. 담배가 가로로 놓였을 때는 연소속도가 느렸는데 이는 연소되는 면에 산소량과 연소되면서 열기가 상승작용으로 연소에 영향을 미치는 요인과 관련이 있음을 이해하였다. 또한 담뱃불이 놓인 물건과의 접촉에 따라 연소시간이 차이가 나는 것을 확인하였다.

4.2. 담뱃불 온도측정

담배가 훈소될 때 별건 연소되는 면이 갖는 온도를 측정하였다. 이는 담배가 산소와 반응하는 면이 갖는 온도는 담배불씨가 가연물에 떨어져 가연물에 미치는 상태를 파악하기 위한 것이다. 즉 담배불씨가 가연물에 접촉했을 때 가연물에 직접 불꽃반응 혹은 탄화 및 훈소반응이 발생되는지를 알아보기 위한 것이다. 이 실험은 Photo.10과 같이 자유롭게 유동하는 대기 상태에서 담뱃불을 점화한 후 바닥에서 150cm 떨어진 상태에서 비접촉식 열화상카메라를 가지고 담뱃불과 약 50cm 이격시켜 담뱃불을 들고서 측정하였다.

실험결과는 평상시 말단 부 온도가 약 116~120℃ 이었고 중심부는 220℃에 이르렀다. 이 수치는 대기 중에서 대류에 의해 바로 냉각되고

담뱃불이 재에 쌓이면서 차단되어 정확한 온도 측정이 불가능한 것으로 생각된다. 또한 담배 흡입 시 담뱃불의 온도를 측정하였으나 정확한 온도 측정이 불가능하였다. 그 이유는 담배가 연소된 후 바로 담뱃재로 덮이기 때문이었다.

4.3. 훈소 가능물질 실험

우리 사회에서 사용되는 물건은 다양하여 모든 물질에 대해 훈소 가능실험을 할 수 없었으나 일반 가정에서 사용되는 물품에 대해 훈소 실험을 하였다. 이 실험의 목적은 담뱃불이 떨어져 훈소가 지속되면서 열이 축적되어 불꽃이 발생하는 화재로 전이 될 수 있는가를 판단하기 위해서다. 담뱃불이 가연물에 떨어져 스스로 훈소되면서 담뱃불이 방출하는 열량과 가연물 스스로 훈소반응이 일어나면서 열 발생률이 많아진다면 그만큼 화재 발생률이 높으므로 훈소 가능 물질 여부를 측정하였다.

실험에 사용된 물질은 주로 가정에서 사용되는 물질로 면, 화장지, 신문지, A4용지, 비닐, 스티로폼, 합성섬유(캐시미어), 면(합성섬유), 스펀지, PVC폼에 대해 실험을 하였다(Photo 11 ~ 20). 실험방법은 라이터를 이용해 물질에 불을 붙인 후 불을 끄고 콘크리트 바닥에 수평으로 놓고 훈소가 지속되는 시간을 관찰하였다.

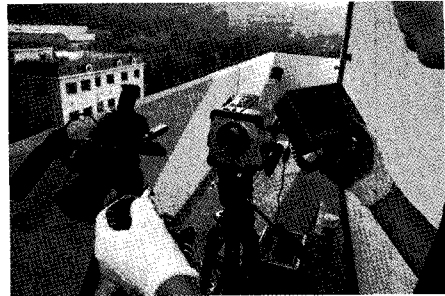


Photo. 8. The temperature estimation of firing cigarette .

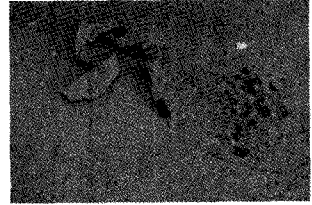
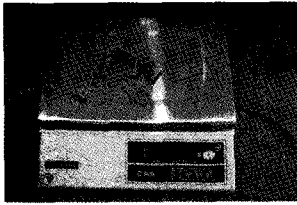


Photo. 11. The combustion test of smoldering materials(Cotton).

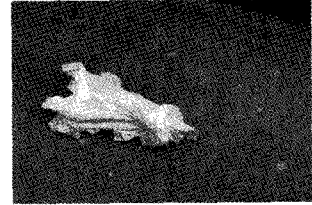
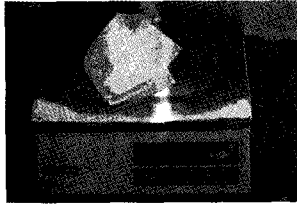


Photo. 12. The combustion test of smoldering materials(Tissue).

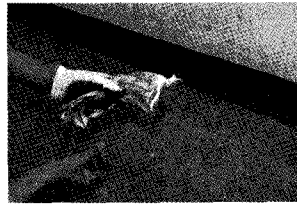


Photo. 13. The combustion test of smoldering materials(Newspaper).

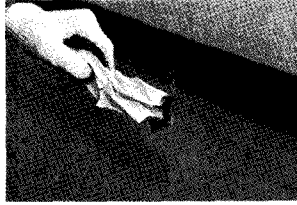
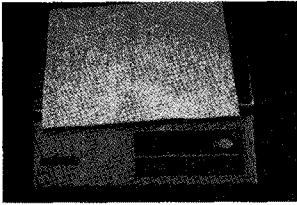


Photo. 14. The combustion test of smoldering materials(A4 copy paper).

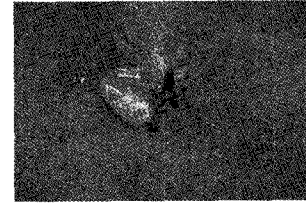
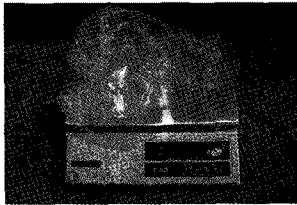


Photo. 15. The combustion test of smoldering materials(PVC film).

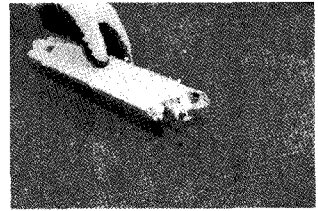
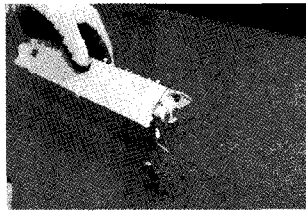
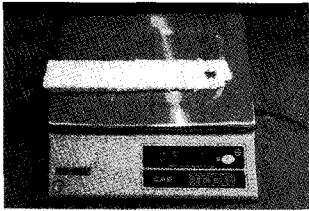


Photo. 16. The combustion test of smoldering materials(Polystyrene foam).

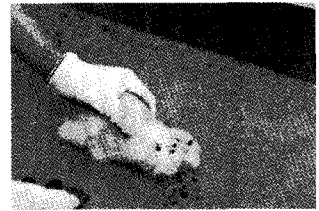
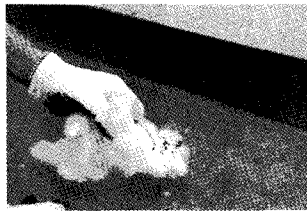
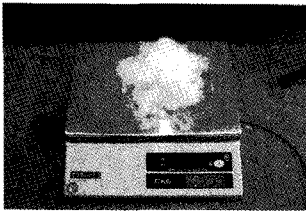


Photo. 17. The combustion test of smoldering materials
(Photo. 16. The combustion test of smoldering materials(Poly styrene foam), r ; cashmere).

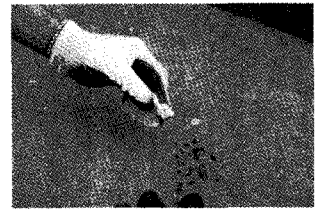
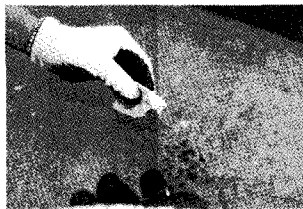
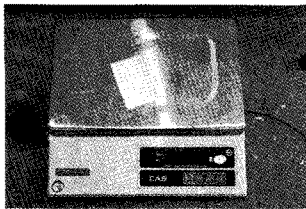


Photo. 18. The combustion test of smoldering materials(Synthetic fiber).

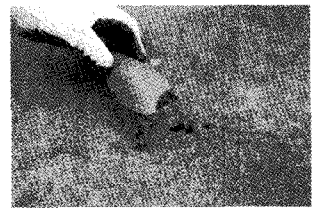
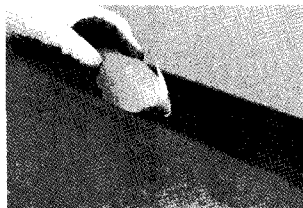
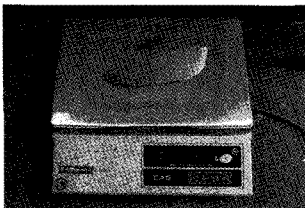


Photo. 19. The combustion test of smoldering materials(Poly urethane foam).

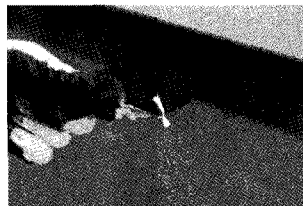


Photo. 20. The combustion test of smoldering materials(PVC foam).

Table 3. The results of combustion test of smoldering materials.

물질명	무게	훈소가능여부	설명
면	4g	○	약 2분 31초 동안 진행
화장지	1.5g	○	약 30초 동안 진행
신문지	4.5g	○	약 40초 동안 진행
A4용지	5.0g	○	약 1분 4초 동안 진행
비닐	5.0g	×	
스티로폼	2.0g	×	
합성섬유(캐시미어)	8.5g	×	
합성섬유	2.0g	×	
스펀지	6.5g	×	
PVC폼	9g	×	

실험결과는 Table 3과 같으며 이 실험을 통해 훈소가 되는 물질에 대해 확인하였고 훈소반응이 공기와 아주 밀접한 관련이 있음을 관찰하였다. 즉, 공기가 많을 때는 훈소반응이 지속되고, 충분하지 않을 때는 훈소반응이 멈추면서 연소반응이 종료되었다.

4.4. 담뱃불 화재재현 실험

담뱃불은 위에서 살펴보았듯이 훈소반응이 전개되고 만약 담뱃불에 영향을 받는 가연물이 훈소되지 않는 물질이라면 순수하게 담뱃불 발열

에 의해 가연물 발화점에 도달하면 화재에 도달하게 된다. 또한 그 영향을 받는 물질이 훈소 가능물질이라면 담뱃불 발열과 자체 가연물 발열에 의한 열이 합해지면서 가연물의 발화점에 도달하면 화재에 이르게 된다. 이와 같은 경우를 제외할 경우에는 담뱃불에 의한 훈소반응이 종료되면서 연소반응이 중지된다. 담뱃불 화재재현 실험은 화재사례와 착안하여 쓰레기통에 가정용 화장지를 넣고 담뱃불의 넣었을 때 훈소되는 시간과 온도관계, 불꽃발생, 훈소시 생성되는 연기량 등을 측정하였다. 실험장소는 개방된 공

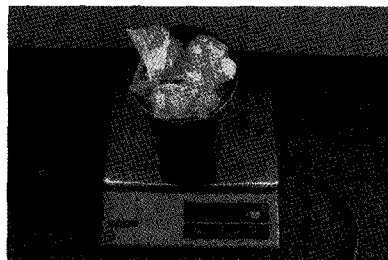
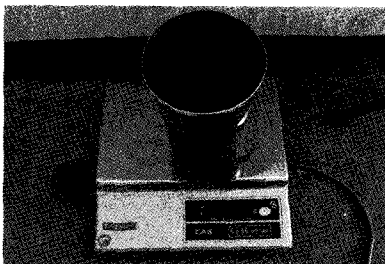


Photo. 21. The combustion testing materials of smoldering combustion.

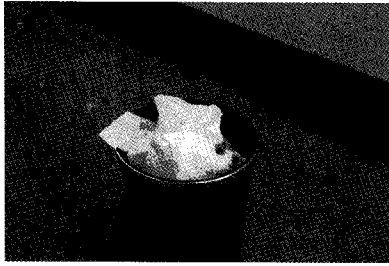


Photo. 22. The procedure of combustion revival test.

간에서 171.5g의 폴리프로필렌 플라스틱 재질의 쓰레기통 내부에 화장지 34g를 넣고 그곳에 담뱃불을 넣고 화재실험을 실시하였다. 담배는 비스듬히 화장지와 접촉하여 실험을 진행하였으며 모든 과정을 비디오키메라로 촬영하고 쓰레기통 내부 온도 분포과정을 열화상카메라로 측정하였다.(Photo. 21의 연소재현 실험물 참고)

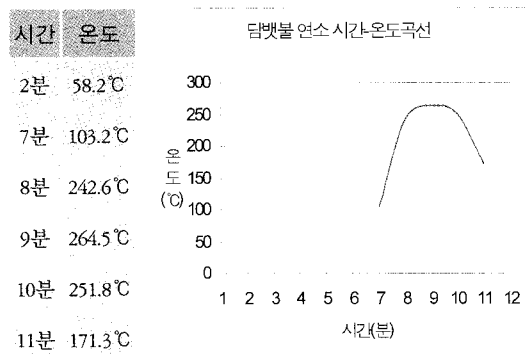
실험 결과는 담배가 연소되면서 쓰레기통 표면온도는 2분이 지났을 때 58.2℃에 이르렀고, 7분이 경과하자 103.2℃가 되었다. 온도는 지속적으로 상승하여 8분이 되었을 때 242.6℃에 이르렀고 9분이 되었을 때 264.5℃에 도달하였다. 그 이후로 점차 온도가 감소하기 시작하였는데 10분이 지났을 때 온도가 251.8℃가 되면서 온도는 지속적으로 내려가고 혼소반응이 종료되었다. 마찬가지로 온도가 상승하면서 연기량은 지속적으로 증가하였고 온도가 정점에 도달한 후 점차 그 양이 점차 감소하였다.

담뱃불이 쓰레기통 내부에 놓자마자 혼소가능 물질인 화장지에 혼소되면서 담뱃불과 화장지 혼소반응에 의해 온도가 상승하였으나 화장지가 착화될 수 있는 온도에 도달하지 않기 때문에 연소가 진행되지 않았으며 내부에는 발생하는 연기량이 산소를 밀어내고 그곳에 산소가 유입

될 수 있는 틈새는 작아 연소조건을 충족하지 못해 반응이 중지되는 것으로 생각된다.

담뱃불에 재현실험은 불꽃연소에 도달하지 못했다. 다시 말하면 담뱃불에 의한 화재가 그렇게 쉽게 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 담뱃불에 의한 화재가 발생되기 위해서는 모든 조건을 충족하여야 하며 그와 같은 조건이 유기적인 작용을 했을 때 화재가 발생할 수 있음을 명심해야 한다.

Table. 4. The curve of time and temperature



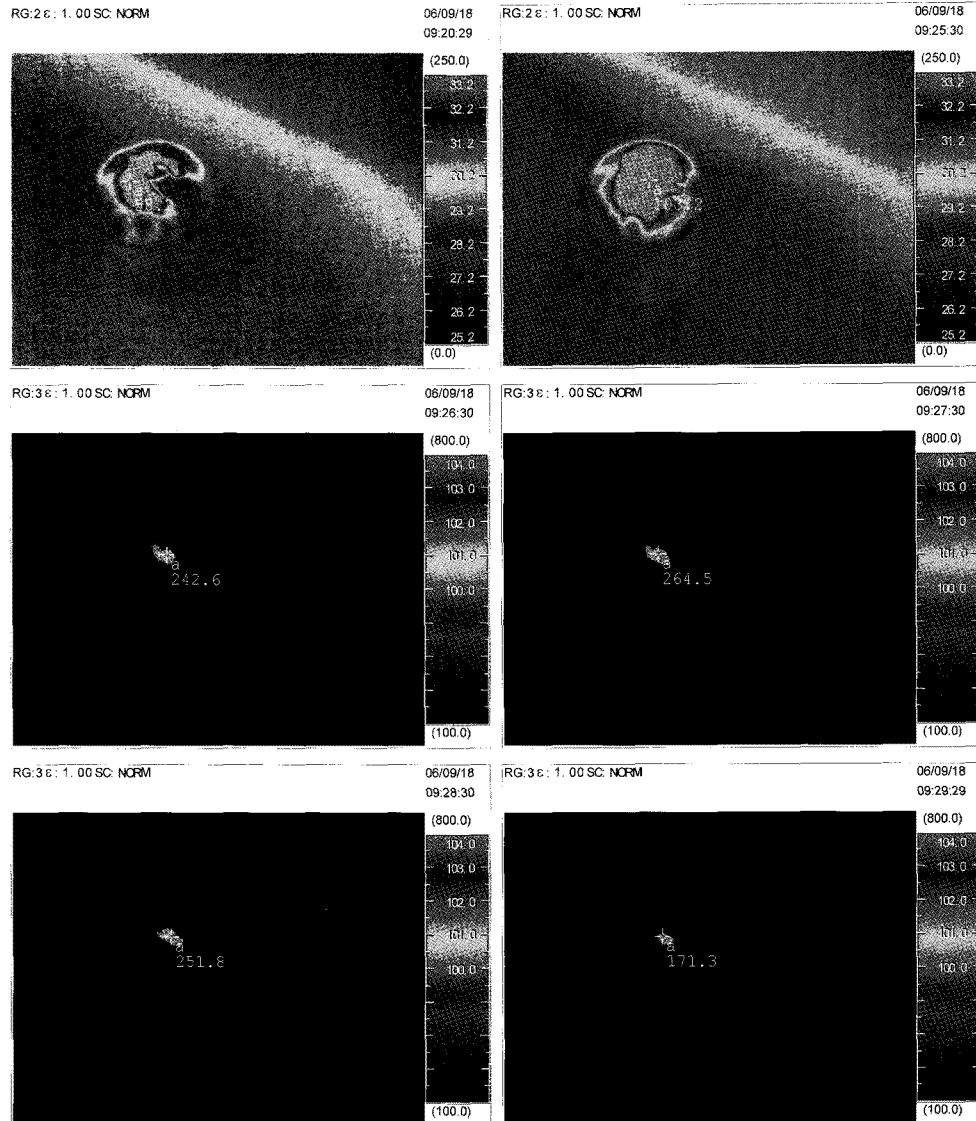


Table. 4. The temperature profile of inner part of trash box.

5. 실험분석 및 감식방법

5.1. 실험분석

담뱃불이 연소될 때는 혼소반응을 거치게 된다. 그것이 연소되는 시간은 많은 변수들에 따라 다르지만 대기 중에서 한 개비가 연소되는데 걸

리는 시간은 수평으로 놓였을 때 약 10분, 세로로 놓였을 때 40~50초가 소요됨을 알았다. 이 담배가 미세한 공기유동이 있는 곳에서 연소되더라도 연소시간은 그 시간에서 얼마 차이가 없을 것이다. 또한 담배연소가 빠르게 진행되면 그만큼 열 발생률은 빠른 반면에 연소시간이 짧아

진다. 그러므로 그 방출된 열량이 가연물 조건에 따라 열이 급격히 상승하기도 하고 반대로 완만하게 상승할 수 있다는 결론에 도달하게 된다.

두 번째 실험은 담뱃불에 대한 온도를 측정하였다. 담배 연소 시 발생하는 온도에 따라 가연물의 열적 피해는 달라질 것이다. 비접촉식 열화상카메라로 측정한 담배온도는 220℃ 정도까지 상승하고 더 이상 측정이 불가능하였다. 그 이유는 담뱃불의 발생된 열이 대류에 의해 바로 냉각되고 연소되면서 생성된 재가 보온효과를 띠면서 담뱃불의 정확한 온도 측정이 불가능하였다.

세 번째 실험은 담뱃불이 가연물에 떨어질 때 훈소될 수 있는 물질을 확인하기 위한 실험을 하였다. 여기에서 우리가 사용되는 모든 물질을 할 수 없었으나 가정에서 사용되는 물질을 사용하였다. 이때 훈소가 되는 물질은 종이 및 식물성 섬유 등 연소되면서 물질이 변형되지 않고 그 형태를 간직하는 물질은 훈소가 지속되었다. 그러나 연소될 때 그 형태가 변형되는 것은 훈소반응이 더 이상 전개되지 않고 즉시 소화되었다. 이는 연소반응이 일어날 때 반드시 산소를 필요로 하는데 그 형태를 이루는 것은 열기에 의한 산화반응이 일어나 훈소반응이 일어나지만 그 형태가 변형되는 것은 표면을 덮어 산소를 차단해 연소가 중지되는 것을 관찰하였다. 그러므로 우리가 훈소가 가능한 물질 판단은 이와 같은 요인을 적용해 확인이 가능하고 훈소 반응은 산소와 밀접한 관련이 있음을 알았다.

네 번째 실험은 실제 담뱃불을 가연물에 놓고 훈소반응에서 불꽃반응으로 진행되는 것을 실험하였다. 이 실험은 담뱃불이 가연물에 떨어질 때 담뱃불 감식력을 향상시키기 위한 실험이었으나 불꽃반응으로 전개되지 않았다. 하지만 담뱃불이

휴지로 쌓여 비스듬히 놓였을 때 훈소연소에 걸리는 시간이 약 12분 정도 소요되고 불꽃연소로 진행되기 위해서는 더욱 많은 열량을 발산해 가연물에 점화시켜야 함을 알았다. 이때 또한 담뱃불이 연소되면서 발생하는 연기량은 미세하였는데 시간이 흐를수록 증가하였다가 다시 감소하였다.

5.2. 담뱃불화재 감식방법

담뱃불에 의해서 발생된 화재는 두 가지 현상으로 나뉜다. 그것은 훈소반응만을 거치는 것과 훈소반응에서 불꽃반응으로 전이되는 것이다. 그러므로 화재가 이들 현상 중에 어떤 현상을 거쳤는지를 식별하는 것이 중요하다.

먼저 불꽃이 일어나지 않고 훈소반응이 전개되었을 때는 다시 두 가지로 나뉠 수 있다. 그것은 담뱃불 자체만 훈소되고 접촉 가연물은 훈소되지 않을 때와 담뱃불과 접촉 가연물이 훈소될 때로 나뉜다. 담뱃불 자체만 훈소되었을 때는 담배 한 개비가 연소되는데 걸리는 시간이 10분 정도이므로 흡연자가 담배를 버리고 나간 시간과 화재 발견시간을 고려해야 한다. 다음은 담뱃불과 접촉 가연물이 훈소되었을 때이다. 이것은 담뱃불이 훈소될 수 있는 가연물인지 아닌지를 먼저 식별해야 한다. 이때 훈소되지 않는 가연물이 있다면 훈소가 더 이상 진행되지 않고 반응이 중지될 것이다. 이것도 마찬가지로 담뱃불이 버려진 시간과 연소되는 시간을 고려해야 하고 접촉 가연물이 훈소되는 양을 고려하여 결론에 도달해야 할 것이다.

다음은 훈소에서 불꽃이 생성되는 반응이다. 이것도 두 가지 현상으로 나뉠 수 있는데 담뱃불에 의한 접촉 가연물 연소와 담뱃불 및 접촉 가연물 훈소에 의한 불꽃연소이다. 먼저 담뱃불

에 의한 접촉 가연물은 담뱃불에 의한 순수한 반응에 의해 불꽃이 발생돼야 함으로 먼저 10분 이내에 불꽃이 일어나게 될 것이고 담뱃불에 의한 발생된 열이 축적되어 접촉 가연물을 점화시켜야 한다는 것을 기억해야 한다. 다음은 담뱃불과 접촉 가연물의 혼소반응이 발생되면서 가연물이 불꽃반응으로 전개되기 위해서는 반드시 열이 축적되어 접촉 가연물이 착화온도에 도달해야 한다.

III. 결 론

지금까지 우리는 담뱃불이 사회에 미치는 영향, 화재사례분석, 담뱃불의 놓인 위치에 따른 연소시간 측정, 담뱃불의 온도측정, 혼소가능 물질, 담뱃불에 의한 화재재현실험을 실시하였다. 이 실험을 통해 담뱃불이 연소되는 특징을 통해서 담뱃불 감식방법에 대해 살펴보았다.

그러나 불행하게도 담뱃불화재 감식은 매우 어렵다. 왜냐하면 담뱃불이 연소되면서 그 형태를 남기지 않고 소실되기 때문이다. 그러므로 정확한 담뱃불화재 감식을 수행하기 위해서는 무엇보다도 담뱃불이 갖는 연소 특성을 확실히 이해하고 담뱃불이 물질에 접촉되었을 때 가연물이 갖는 물리적 성질에 대해서 인지하여야 한다. 이런 모든 상황이 종합적으로 고려됐을 때 정확한 감식업무를 수행해 그에 걸 맞는 대책이 수립되어 점차 담뱃불로 인한 화재는 줄어들 수 있을 것으로 생각된다.

끝으로, 본 연구를 계기로 다른 조사요원이 더욱 값진 담뱃불 화재연구를 실시하여 더욱 발전된 연구 성과를 이룩하여 조사자에게 유용하게 활용될 수 있기를 기대해 본다.

참고문헌

1. 소방방재청, 화재통계연보, 2006.
2. James G. Principles of Fire Behavior. Delmar Publishers, U.S.A, 1998, p38.
3. John D. Kirk's *Fire Investigation(5ed)*. Pearson Education, Inc, New Jersey, 2004.
4. NFPA, "NFPA921 : Guide for Fire and Explosion Investigations", 2004.