

화재발생에 관한 메커니즘

글 김진표 국립과학수사연구소 화재연구실

머리말

01

인류가 불을 사용하게 됨에 따라 야생동물로부터의 보호는 물론 낮 시간대뿐만 아니라 밤 시간대의 활동에 대한 자연적 제약으로부터 해방되면서 문명사회를 구축할 수

있었다.

다른 한편으로 불의 잘못된 취급에 의해 긴 시간 공들여 놓은 삶의 터전을 한순간에 앗아가는 재앙이라는 양면성을 보여주었다. 인간 문명이 완전히 형성되기 이전에는 자연현상에서 낙뢰 등의 영향으로 나무 숲 등에서 불이 일어나거나, 인간의 실수에 의해 불이 인간문명을 파괴하는 정도에 지나지 않았다. 그러나 현대사회에 접어들면서 전기에너지, 자동차, 화약의 사용 등 화재 발생요인이 증가하였고, 편안한 삶의 영위를 위하여 보다 다양한 건축물 및 유락시설 등이 마련되면서 화재에 의한 피해는 과거와 비교할 수 없을 정도로 큰 파급효과를 나타내고 있다.

특히, 2002년 7월부터 시행되어 온 「제조물책임법」 및 최근 2009년 5월 「실화책임에 관한 법률」의 개정

으로 화재조사의 정확성을 요구하는 사회적 요구가 갈수록 커지고 있다. 이에 화재의 발생 메커니즘을 이해하고, 표준절차에 따른 화재원인 조사를 통하여 정확한 화재원인 규명이 필요할 것이다.

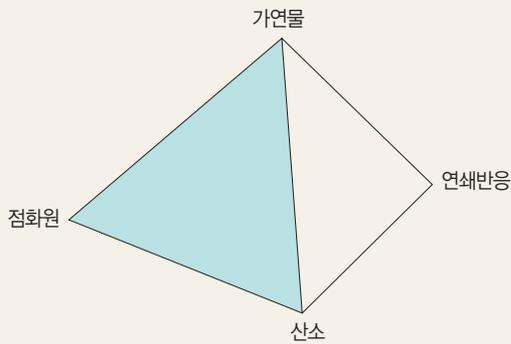
화재발생 메커니즘

02

불, 즉 화재는 공기 또는 산소 속에서 물질이 산화되어 빛과 불꽃을 내는 현상을 지칭하며, 넓은 의미로는 불꽃이나 빛을 발하지 않아도 결과적으로 산화물을 생성하는 화학변화를 말하는 것으로 볼 수 있다. 불꽃이 지속적으로 유지되기 위해서는 산화에 의해 열이 발생하는 속도와 그것이 외부로 발산하는 속도가 같아 균형을 이루어야 한다. 이것은 각 물질별로 특정조건 및 특정 온도 이상에서 일어나며, 그 온도를 그 물질의 발화온도 또는 발화점이라고 한다. 또한 연소를 지속시키는 물질을 연료 또는 가연물이라고 하며, 여기에는 도시가스 와 같은 기체, 석유와 같은 액체, 석탄과 같은 고체 등 여러 상태의 것이 있다.

가. 연소 조건

일반적으로 연소의 조건은 [그림 1]에 나타난 바와 같이 3가지 또는 4가지 조건에 따라 발생 및 지속되며, 기본적으로 이러한 조건을 연소의 3요소 또는 연소의 4요소로 칭하고 있다.



[그림 1] 연소의 4요소

먼저 연소가 진행되기 위해서는 가연물 및 산소가 존재하는 공간에서 점화원이 존재하는 경우 연소가 시작되고, 연소 확대 과정에서 가연물 및 산소의 양자 중 하나가 소멸되는 경우, 소화에 이르게 된다. 실제로 라이터 불꽃이나 촛불은 부위별로 1,000℃ 이상을 나타내는데 그 자체는 고온이지만 종이 등 가연물에 측면을 접촉해 보면 산소 접촉면인 불꽃의 테두리만 까맣게 타는 것을 볼 수 있다. 이는 불꽃 중심부가 종이에 접촉되면 산소공급원이 없어 타지 않는 현상으로 설명될 수 있다. 고체 가연물의 연소형태는 다음과 같이 4가지 형태로 구분할 수 있으며, 물질별 연소 형태는 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다.

(1) 분해연소 : 목재나 플라스틱, 고무 등을 가열할 때 나오는 분해가스가 산소와 혼합기체를 만들고 점화원에 의해서 연소하는 형태이다. 이때도 열분해 생성물이 불연성의 액체이거나 가연성 기체의 경우라도 점화에너지가 부족한 경우에는 연소되지 않는다. 목재나 종이의 탄화현상이 좋은 예이다.

(2) 증발연소 : 액체나 고체가 가열에 의해서 증발하여, 그 증기가 공기와 적정 혼합비에 의해 연소하는 형태로 석유나 양초의 연소 형태를 예로 들 수 있다.

(3) 표면연소 : 열분해나 증발 없이 공기가 공급되는 액체 또는 고체의 표면에서만 연소가 일어나는 형태로서 직접 연소라고도 하며, 목탄, 코크스, 금속분 등의 연소가 그것이다.

(4) 자기연소 : 외부로부터 연소에 필요한 산소를 공급받지 않고 내부에 함유되어 있는 산소를 공급받아 연소하는 형태로 니트로셀룰로즈, TNT, 다이너마이트의 원료인 니트로글리세린 등이 그 예이며, 내부연소라고도 한다.

가연물	자체 발화 여부 및 연소 특징			예
	발화	발화	발화	
기체	기체가 그대로 연소	기체가 그대로 연소	발화	확산연소 수소, 프로판, 아세틸렌
액체	액체자신은 연소하지 않음.	발생기체가 공기와 혼합하여 연소	발화	증발연소 가솔린, 알콜, 에테르
		열분해로 생성된 기체가 연소		분해연소 지방산, 기계유
고체	고체자신은 연소하지 않음.	발생기체가 연소 열분해로 생성된 기체가 연소	발화	증발연소 황인, 나프탈렌
				분해연소 파라핀
	고체가 그대로 연소	발화 않음.	표면연소 목탄, 알루미늄	
	고체자신이 열분해로 생긴 기체와 함께 연소		발화	분해연소 표면연소 목재, 석탄

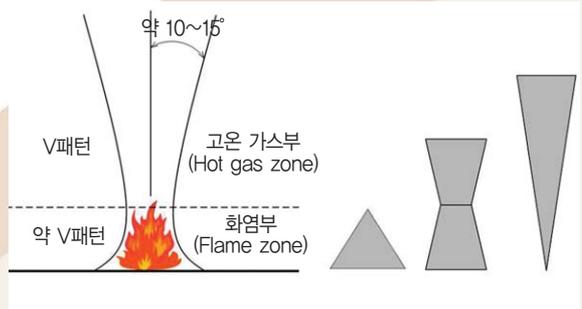
<표 1> 가연물의 종류 및 연소 형태

나. 화재의 확산

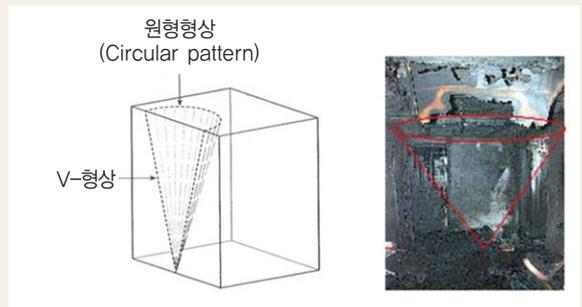
최초 화재가 발생되면 [그림 2]와 같은 화재성장 메커니즘을 나타낸다. 일반적으로 발화원으로 작용 가능한 에너지원에 의해 화재가 발생하는 경우, 불꽃이 직접적으로 보이지 않는 무염착화 단계를 거쳐 주변 가연물을 통해 착화되며, 발염착화에 이르러 외부에서 화염이 관찰되는 출화단계를 거치게 된다. 발염착화 되어 출화에 이르기까지는 주변 가연물이나 공기의 흐름 등에 따라 화재 양상이 크게 달라지며, 최초 발화이후 대략 5~10분 사이에 화재는 최성기에 접어든다. 화재의 최성기에는 플래시오버 현상 등이 나타나며, 이후 가연물의 완전연소 또는 소화 작업 등에 의해 진화되는 과정을 거친다.

일단 화재가 발생되면 공간을 통해 확산되는데 수평 방향 및 수직 방향으로 진전되는 속도는 [그림 3]에 나타낸 바와 같이 그 양상이 다르게 나타난다.

공기의 유입 및 가연물 조건이 동일하다고 가정하는 경우, 수평방향으로 화염의 복사열에 의한 예열과 열 분해가 일어나면서 좌우로 연소가 확대된다. 수평방향으로 확산되는 비율을 기준으로 비교할 때 수직방향에 대해서는 상승 연소되는 비율은 약 20배 빠르게 진전되며, 아래쪽으로 하강 연소되는 비율은 0.3 정



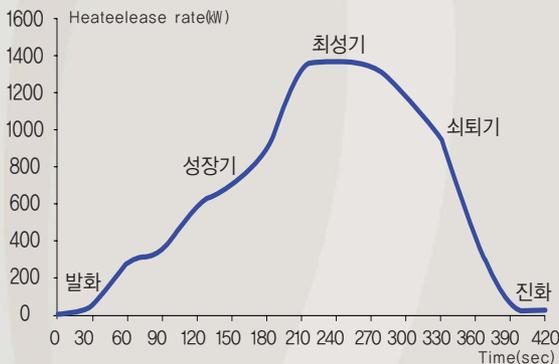
[그림 4] 화염 확산 각도 및 소화 후 연소 흔적



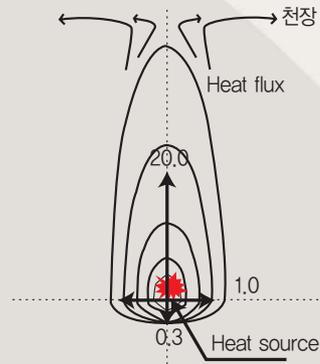
[그림 5] 실제 현장에서 나타나는 연소 흔적

도로 연소 확대되는 경향을 나타낸다.

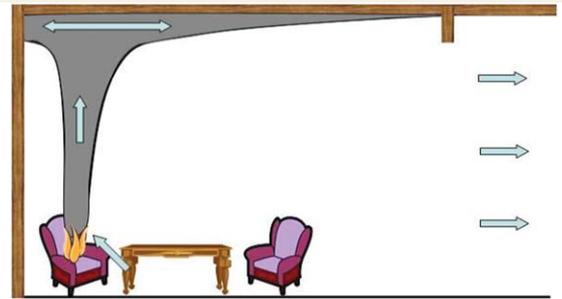
[그림 3]과 같은 연소 확대 형상으로 인하여 최초 화재 발생이후, 일반적인 연소형상은 [그림 4]에 나타낸 바와 같이 V-형상으로 연소 확대되는 경향을 보이



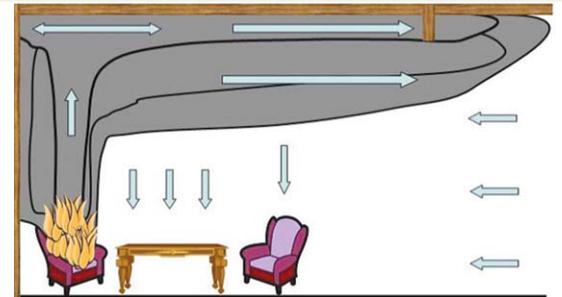
[그림 2] 화재 성장 단계 및 열방출률 변화



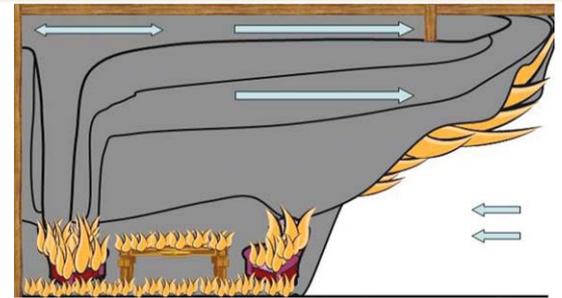
[그림 3] 방향에 따른 연소 확대 속도 및 등온 분포



(a) 최초 발화



(b) 연소 확산(열기류 생성)



(c) 플래시오버

[그림 6] 구획된 공간에서 연소 확대 형상

며, 소화 이후에 나타나는 연소 흔적은 삼각형 형태, 모래시계 형태 및 역삼각형의 형태가 나타난다. 실제 화재현장에서는 [그림 5]와 같이 벽면에는 V-형상이 나타나며, 천장부분에서 원형의 형상으로 연소가 진행되는 원뿔형의 연소 흔적이 형성되는 특징이 있다. 대부분의 화재는 건축물 내부에서 발생하며, 이와 같이 구획된 공간에서 화재가 발생하여 확산되는 경우,

[그림 6]에 나타난 바와 같이 연소 확대 과정에서 열기류가 형성되며, 열기류가 천장에 닿아 상층부에 축적되고, 상층부 열기류의 복사열에 의해 하단에 위치한 가연물이 탄화 및 분해 과정을 거치면서 일시에 화염이 확대되는 플래시오버(flash over) 현상이 발생한다.

플래시오버 현상은 화재가 최성기에 진입되는 과정으로 구획된 공간에 일시적으로 화염이 확대되는 형태로서 외부로 강한 압력을 배출함과 동시에 폭발적 연소로 진행된다. 이러한 플래시오버 현상은 구획된 공간의 넓이와 높이 및 가연물 조건에 따라 달라지는데 최초 발화 이후, 대략 5분 이내에 도달하는 것으로 알려져 있다.

플래시오버와 유사한 폭발적 연소 진행 형태로 백드래프트(back draft) 현상이 있다. 백드래프트 현상은 플래시오버와 유사한 형태로 상층부에 축적된 열기류의 복사열로 하단부의 가연물에서 충분한 가연성 증기가 형성되고, 발화점 또는 인화점에 충분히 도달하였음에도 제한된 공기의 유입으로 플래시오버로 진전되지 못한 상태로 주로 밀폐된 공간에서 형성된다. 이러한 상태에서 밀폐된 공간 내에 출입문 등이 개방되어 일시적으로 공기가 유입되면서 외부로 폭발적인 연소가 진행되는데 이를 백드래프트 현상이라고 한다. 백드래프트 현상이 발생하는 경우 화염의 전파속도는 음속에 가까우며, 이에 따른 압력파가 존재한다. 소방대원들이 진화작업 중 맞이할 수 있는 굉장히 위험한 상황으로 소방관 살인현상으로 불리기도 한다.

일반적으로 구획된 공간 내에서의 화재는 최초 발화에서 최성기에 이르기까지 대략 5~10분 정도의 시간이 소요되므로 소화 및 인명구조 작업은 화재가 최성기에 이르기 이전에 이루어져야 할 것이다. ㉞