

훈소와 표면연소

글 이승훈 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발조사팀



화재와 관련된 용어 중에 불꽃이 없이 타들어가는 연소방식에 대한 표현으로 훈소와 표면연소, 작열연소¹⁾라는 용어가 있다. 이 분야의 업무를 하는 일상에서는 물론 부족한 지식을 채워주기 위해 편찬된 교재에서도 이들에 대하여 정확한 의미를 알고 구분해서 사용하지 않는 경우를 종종 보았다. 어떤 자료는 그 의미를 바뀌어 사용하는 경우도 보았으며, 어떤 경우는 매우 모호하게 사용하는 경우도 보았다. 필자는 이 분야의 학자는 아니다. 이 글을 읽는 사람들 중에는 필자의 의견에 대하여 불필요한 구분이며 논리라고 생각할 수도 있겠지만, 용어를 명확히 구분해서 사용하는 것은 다른 사람과의 교류와 의사소통을 위한 최소한의 기본이라고 생각하며 다음과 같이 훈소, 표면연소, 작열연소에 대하여 구분하고, 각 특성에 대하여 설명하고자 한다.

1. 작열연소(Glowing combustion)

작열연소는 열을 가했을 때 가연성 기체가 발생하지 않는 가연물이 산소와 접하는 부분에서 부분적으로 작열하는 표면연소와 조건에 따라 화염 연소할 수 있는 가연성 기체를 발생시키는(휘발분이 있는) 가연물이 온도가 낮거나 산소 농도가 낮아 화염을 발생하지 못하고 산소와 접하는 표면 경계에서 작열하는 형태로 연소하는 훈소를 포함한다. 작열연소는 연소속도가 매우 느린 것이 특징이다. 또한 화염이 없으므로 대류에 의한 열전달이 약하다. 따라서 수직재의 각 방향(상, 하, 좌, 우) 연소속도가 유사하며, 표면은 주변

1) 작열연소는 화염이 없이 가연물의 표면에서 별걸게 달아오르는 듯 연소하는 형태를 묘사한 것으로 훈소와 표면연소의 외관적 모습을 표현한 용어이다. 작열연소라 하면 훈소와 표면연소를 포함하는 용어가 된다.

<용어의 어원>

작열연소(Glowing combustion)는 주로 영미계 화재과학 분야에서 사용된다. 표면연소(Surface combustion)은 일본에서 사용하는 용어로 미국 등에서는 표면연소라는 단어를 좀처럼 사용하지 않으며, NFPA921 용어의 정의는 물론 기타 화재과학을 다루는 문헌에도 좀처럼 찾아 볼 수 없다. 우리나라는 화재과학 초기에 미국과 일본으로부터 이 분야의 과학기술을 받아들여 세 가지 용어(Glowing combustion, Surface combustion, Smoldering)가 모두 사용되고 있어 현재는 다소 혼란을 일으키고 있다.

필자는 미국의 화재조사관 포럼에 이와 같은 문제를 제기하고 각 용어의 정의를 질의하였을 때, 미국의 조사관들 또한 표면연소의 개념이 전혀 없지는 않지만 여전히 국내와 유사한 정도의 불명확한 정의로 이해하며 사용하고 있는 것을 확인하였고 용어의 명확한 정의와 구분된 사용의 필요성에 대하여 논의한 바 있다. 이 분야에 대한 학자들의 합의가 이루어져 빠른 시간 내에 명확한 정의가 내려지기를 기대하며 필자의 의견을 일부 피력하였다.

대기에 의해 냉각되므로 표면을 따르기 보다는 가연물의 심부로 서서히 타들어가는 형태를 보인다.

표면연소하는 가연물로는 주성분이 탄소로 구성된 목탄(숯), 코크스와 같은 물질이 있다. 또한 칼륨, 나트륨, 알루미늄, 마그네슘 등과 같은 금속 등은 열에 가열되어도 가연성기체가 발생하지 않는다. 숯은 나무를 산소가 없는 상태로 가열하여 열분해가 모두 끝나고 남은 탄소(C) 덩어리이다. 가열된다고 하여도 더 이상 열분해가 발생하지 않으므로 가연성 기체의 생성이 없다. 따라서 높은 온도와 산소농도에서도 화염으로 연소할 수 없는 표면연소의 대표적인 가연물이다. 열분해에 의해 휘발분이 발생하는 물질은 확산연소와 열분해 후 남게 되는 탄소의 표면연소가 동시에 발생한다. 훈소의 가연물로는 가열 시 가연성 기체가 발생하는 것들로 목재, 식물성 섬유, 종이 등 셀룰로오스 물질이 대표적이다.

2. 표면연소와 훈소

표면연소(Surface combustion)와 훈소(Smoldering combustion)는 작열연소라는 외관적 형태로 인해 그 의미를 정확히 이해하기 전에는 다소 혼란스러운 부분이 있다.

연소의 외관적 형태는 불꽃이 없이 작열하는 형태이므로 동일하다. 그러나 표면연소는 가연물 자체가 가열되어도 열분해나 승화, 증발 등의 과정이 없고 가연성 기체를 발생시키지 않는 것들의 연소로 온도가 상승하거나 산소가 충분히 공급되어도 화염연소로 전환될 수 없다. 훈소는 가연성기체를 발생시키는 가연물들이 온도나 산소 부족으로 인해 가연성 기체에 착화되지 못하는 상태이므로 차후 조건을 만족시키게 되면 화염연소로 전환될 수 있다는 데에 그 차이가 있으며 구별의 필요성이 있다.



[그림 1] 목탄의 표면연소 : 화염이 발생하지 않으며 산소와 접촉하는 표면에서 작열하고 있다. 목탄은 이미 열분해가 완료된 물질이므로 연소 시에도 가연성 기체가 발생하지 않으며 고온의 환경에서도 화염이 발생하지 않는다.

<표 1> 표면연소와 훈소의 차이

구 분	작 열 연 소	
	표면연소	훈 소
연소의 외관적 형태	작열연소(화염이 없음)	작열연소(화염이 없음)
화학반응	표면반응	표면반응
화염연소 가능성	발생하지 않음	조건에 따라 발생할 수 있음
소취형태	심부로 타들어가는 형태(심부연소)	심부로 타들어가는 형태(심부연소)
가연성 증기발생 여부	가연성 증기 발생 X	가연성 증기 발생 O
발생원인	가연성 증기가 없음	온도가 낮거나 산소 부족
연 기	발생하지 않음	많이 발생함
가 연 물	코크스, 목탄 등 가연성 증기가 발생하지 않는 가연물	나무, 식물성 섬유, 종이 등 셀룰로오스가 포함된 물질에서 주로 발생

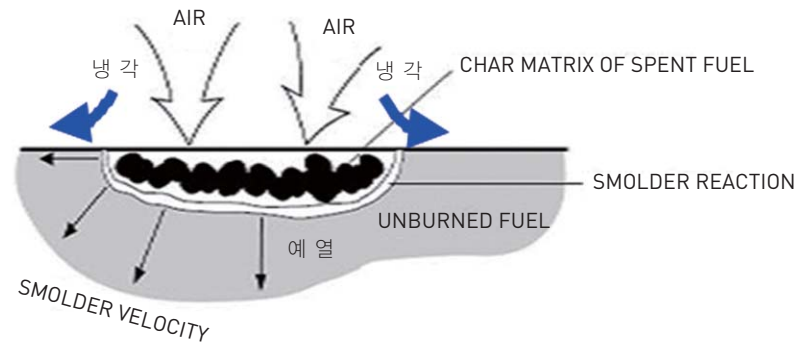
일부 목탄을 연소할 때 화염이 발생하거나 연기가 발생하는 이유는 완전하게 열분해된 목탄이 아니므로 남아 있던 가연성가스가 연소하거나 연기로 만들어지기 때문이다.

3. 작열연소의 방향별 진행속도

작열연소의 반응은 가연물의 표면에서 반응하여 가연물의 반응층 내부를 예열시켜 연소하기 좋은 조건으로 만들면서 진행한다. 가연물의 심부로 향하는 방향에 비하여 표면층에서의 확산은 가연물을 예열시키는 것 외에 대기에 의해 빼앗기는 열손실이 있기 때문에 표면층을 따르는 연소속도에 비하여 비교적 축열이 용이한 가연물 심부로 진행되는 연소속도가 더욱 빠르다. 그러므로 작열연소가 진행된 가연물은 그 외관적인 모습이 움푹 파이듯이 연소하는 경우가 많다. 이러한 연소 특성 때문에 작열연소를 심부연소라고도 한다.

작열연소에서 발생하는 열은 매우 작기 때문에 대류에 의한 영향이 크지 않으므로 수직으로 세워 놓거나 수평으로 놓거나 거꾸로 놓았을 경우도 별다른 속도의 차이가 눈에 띄지 않는다. 발화지점으로부터 입체적인 동심원을 이루며 진행된다.

작열연소의 확산 속도는 물질의 조건에 따라서 작열연소반응 속도를 달리한다. 훈소가 용이한 가연물의 조건은 다공성, 산소의 공급율, 화합물의 산소 조성비 등이 있으며 물질에 따라서 다를 수 있지만 대략적인 속도는 약 0.001~0.01cm/s 또는 1~5mm/min으로 알려져 있다.



[그림 2] 작열연소의 반응 및 연소속도



[그림 3] 작열연소는 대류의 영향이 작으므로 가연물 설치 각도 및 점화위치에 따른 연소속도의 차이가 크지 않다.

4. 화염연소와 작열연소의 차이

<표 2> 화염연소와 작열연소 차이

구 분	화염연소 (Flaming combustion)	작열연소(Glowing combustion)	
		표면연소	훈 소
화염	존재 O	존재 X	
화학반응	기상 반응	표면 반응	
연소확산 속도	빠르다	느리다	
연소 방향	표면으로의 연소 확대가 빠름	심부로의 연소 확대가 빠름	
산소 소비율	높 다	낮 다	
대류열전달	높 다	낮 다	
온도	높 다	낮 다	
방출열량	높 음	낮 음	
CO 및 CO ₂ 농도	CO ₂ 가 높음	CO가 높음	

5. 심부연소(Deep seated fire)의 이해

작열연소의 심부연소라는 개념과 대응하여 확산화염에는 표면연소라고 설명하였다. 작열연소는 화염이 없는 상태로 작은 에너지에 의해서 연소반응이 연쇄적으로 발생을 한다. 가연물의 표면은 심부에 비하여 산소의 공급은 원활할 수 있으나 대기에 의한 냉각에 의해 연소하기에는 불리한 조건이 된다. 따라서 반응은 표면을 따르기 보다는 심부를 향해 더욱 빠르게 진행된다. 반대로 화염연소는 가연물의 기상반응(화염)으로부터 발생한 복사열에 의해 가연물 표면이 예열상태가 되고 열분해가 되기 때문에 심부로 진행되는 속도 보다 가연물의 표면을 따르는 속도가 더욱 빠르다.



[그림 4] 화염에 의해 가연물 표면이 연소하기 좋은 조건이 되므로 화염연소에서는 표면을 따르는 연소속도가 더욱 빠르다.



[그림 5] 작열연소에 의한 심부연소, 외기에 의한 냉각에 의해 표면보다는 심부를 향한 연소속도가 더욱 빠르다.

6. 훈소(Smoldering)

가. 훈소의 개념

작열연소의 한 종류로 유염착화에 이르기에는 온도가 낮거나 산소가 부족한 상황 때문에 화염이 없이 가연물의 표면에서 작열하며 소극적으로 연소되는 현상을 말한다. 구획실 화재에서는 내부의 산소소진에 의해 종종 발생하는 현상이다. 훈소의 연소반응은 가연물의 표면을 따라서 서서히 전파되므로 오랫동안 발견되지 않을 수 있으며 훈소과정 중 충분한 산소가 공급되거나 축열 또는 훈소 범위의 확대 등으로 온도가 상승하는 경우에는 유염연소로 전환될 수 있다. 유염연소 과정에서도 산소가 부족하거나 온도가 낮아지는 경우에는 다시 훈소로 전환된다. 훈소의 불완전연소 과정에서는 연료의 약 10% 이상이 일산화탄소로 되기 때문에 인체에는 치명적인 위험한 연소형태이다. 이러한 훈소는 고체가연물 중 분해과정을 통해 연소하는 가연물에서 발생하며 용융-증발과정을 거쳐 의해 연소하게 되는 가연물(예 : 스티로폼, 플라스틱, 비닐, 나일론 섬유 등)에서는 발생하지 않는다. 목재나 종이, 면직류 등 셀룰로오스 물질에서 주로 발생한다.

훈소를 보다 쉽게 이해하기 위해서 모닥불의 연소를 연상해 보자. 모닥불은 함께 모아둔 장작이 서로의 연소열을 공유하므로 화염을 이루며 연소할 수 있으나, 장작 한 개를 들어 올린다면 연소열을 공유하지 못해 즉 주변의 온도가 낮아지므로 화염연소를 진행하지 못하고 훈소로 전환된다. 또한 훈소로 전환된 경우에는 불완전 연소를 일으키므로 연기가 많이 나는 것을 볼 수 있다. 제레용 향이나 모기향에 불을 붙일 때도 처음 라이터로 불을 붙여 향에 불(화염)이 붙은 상태에서는 연기가 좀처럼 관찰되지 않지만 불을 꺼뜨린 상태에서야 비로소 연기가 많이 발생하는 것도 같은 이유이다. 훈소화재의 특성중의 하나는 불완전연소로 인해 불완전연소 생성물인 일산화탄소와 그을음 등이 다량 발생한다는 것이다. 훈소화재로 진행되다가 자연 소화된 현장에 가 보면 화염연소의 현장에 비하여 그을음이 다량 발생하여 주변에 많이 축적되어 있는 것을 볼 수 있다.



[그림 6] 화염연소 중인 모닥불에서 빠져나온 장작 개비 한 개가 훈소로 전환되어 연기를 발생시키며 화염이 없이 훈소하고 있다.

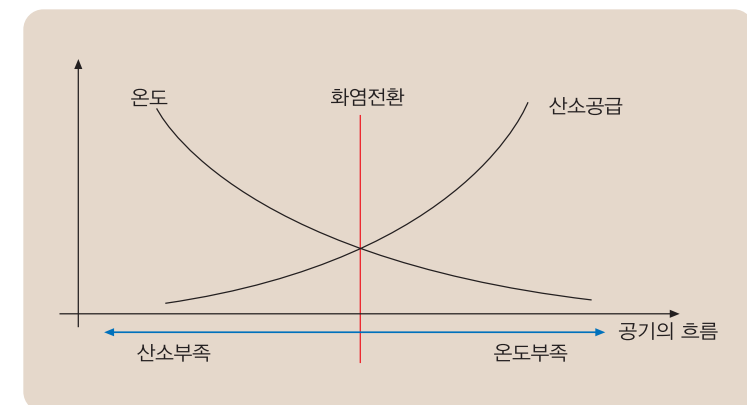
쓰레기통 내부에서 담배꽂초에 의한 화재는 투기된 담배꽂초가 주변의 가연물로 훈소반응을 전파시키는데, 이때 훈소의 반응부위가 확대되면 이때의 열이 서로 공유되어 충분히 온도가 높아지면서 결국 화염연소로 전환된다. 그러나 훈소로 인해 생성되는 연소열에 비하여 외부로 전달되는 열이 큰 경우에는 유염연소로 전환될 수 없다. 훈소에서 유염 연소로 전환되는 과정은 축열조건에 의해 많은 영향을 받는다.

훈소는 발견이 매우 어려우며 환경에 따라서 장시간 잠복상태로 있다가 수십 시간이 경과한 후에도 재발화할 수 있다. 임야화재에서의 훈소는 수일은 기본이며 수십 일이 경과한 후에도 잠복중인 훈소에 의해 다시 발화하는 경우가 있어 소화작업을 하는 소방관들에게 매우 곤혹스러운 화재현상이기도 하다.

훈소 반응을 지속하는 데는 매우 적은 산소가 소비된다. 따라서 매우 낮은 농도의 산소분위기 속에서도 훈소는 지속될 수 있으며 작열하는 부분의 반응온도는 약 400~1000℃로 용점이 낮은 금속을 용융시킬 수 있다.

나. 훈소의 화염 전환과 축열 조건

훈소의 소극적인 연소는 적절한 조건 속에서 화염연소로 전환될 수 있으며 그에 영향을 미치는 인자는 산소 농도와 온도 조건이다. 축열조건이란 반응으로 인해 발생된 열이 외부로 방산되는 것보다 높아 축적되는 것, 즉 온도가 계속해서 상승하는 조건을 말한다. 열발생 정도가 방산정도 보다 낮을 경우 온도가 낮아져 훈소반응은 점차 반응이 위축되다가 멈추게 된다. 열발생정도와 방산정도가 평형을 이룰 경우에는 가연물이 있는 한 훈소반응이 지속되지만 화염으로 전환되지 않는다. 열발생속도가 방산속도에 비하여 높을 경우 열이 축적되어 화염연소로 전환된다. 이렇듯 훈소에서는 축열조건에 영향이 크다. 축열에 영향을 미치는 인자는 다음과 같다.



(1) 물질의 열전도율

연소중인 물질이나 물질을 담고 있는 용기의 열전도율은 혼소에서 화염으로 전환되는 것에 있어서 매우 큰 영향을 미친다. 열전도율이 높다면 혼소 반응으로 생성된 열이 계속해서 주변으로 손실되기 때문에 화염전환에 필요한 온도까지 상승할 수 없다.

(2) 습도 및 가연물의 함수율

가연물의 함수율 및 대기 중의 습도는 연소를 유지하는 것 외 수분을 증발시키는데 필요한 시간과 열량이 소모되므로 혼소에서 발생하는 열의 손실이 되고 화염연소의 전환을 저해하는 요소가 된다.

(3) 공기의 흐름

공기의 흐름과 축열 조건은 상호 반비례 관계를 가진다. 공기의 흐름이 충분하면 산소의 공급측면에서는 긍정적인 조건이지만 공기의 흐름이 많을 경우 과도한 환기로 인해 발생된 열이 축적되기 어렵고, 냉각되기 때문에 공기의 흐름은 혼소의 화염전환에 있어서 무조건 긍정적이라고 볼 수 없다. [그림 7]의 그래프에서 보는 바와 같이 공기의 흐름이 온도 상승과 적절한 균형을 이루는 환경에서 화염연소가 가능해 진다.

면직류나 톱밥더미, 화장지 등의 다공성 가연물은 내부 공간에 충분한 공기를 함유할 수 있고, 내부에 열을 축적시키기에 좋은 조건을 가지고 있으므로 이와 같은 가연물에서는 화염연소로 전환되기에 비교적 용이한 구조이다.

(4) 보온성

축열은 보온과 밀접한 연관이 있다. 열전도율, 건조, 공기의 흐름 3가지 조건을 만족시키더라도 물질의 양이 소량이거나 별도의 보온물질로 덮여있지 않다면 방열되어 화염으로 전환될 수 없다. 단일 물질의 혼소라고 한다면 물질의 양이 혼소부위를 충분히 덮어 방열을 막을 수 있는 보온조건이 되어야 한다. 대부분 이 조건은 별도의 보온성 환경보다는 충분한 물질의 양에 의해 해결된다. 가연물의 보온효과는 화장지나 의류와 같은 다공질 또는 여러 층을 가지는 구조의 물질들이 유리한 조건을 가진다. ☞

정전기 화재사례 및 예방대책

글 최기욱 KFPA 화재조사센터 대리

1. 머리말

정전기란 전하가 정지 상태에 있어 전하의 분포가 시간적으로 변화하지 않는 전기를 말하며, 일상생활 및 산업현장에서 흔히 발생하는 자연현상 중 하나이다. 정전기는 복사기, 공기청정기 등에 활용되어 인간의 생활을 편리하게 해주기도 한다. 하지만 정밀함을 요하는 산업현장의 경우 정전기로 인한 오작동 등으로 인해 재산피해를 입기도 하고, 가연성가스 또는 인화성액체를 취급하는 산업현장의 경우 화재 또는 폭발재해의 원인이 되기도 한다. 이러한 정전기 및 그 위험성에 대해 깊이 이해할 수 있도록 화재사례를 통하여 구체적으로 살펴보고, 산업현장에서 실제로 행하고 있는 정전기에 의한 화재·폭발 방지 대책에 대해 알아보고자 한다.

두 물체 사이에서 마찰이나 접촉 위치의 이동으로 전하의 분리 및 재배열이 일어나서 정전기가 발생하는 현상으로, 두 물체 사이의 마찰로 인한 접촉과 분리과정이 반복되면서 발생한다. 예를 들어 벨트 컨베이어에서 벨트가 롤러나 운반 물체와 마찰하는 과정에서 발생하는 것을 들 수 있다. 일반적으로 고체, 액체 또는 분체류에서 발생하는 정전기는 주로 이러한 마찰에 의해서 기인된다.

(2) 박리에 의한 대전

일정한 압력으로 서로 밀착되어 있던 물체가 떨어지면서 보유하고 있는 기계적 에너지에 의하여 자유전자가 이동되어 정전기가 발생하는 현상으로, 보통 마찰대전보다 더 큰 정전기가 발생한다. 접촉테이프나 필름으로 밀착되어 있던 물체를 떼어낼 때 발생하는 정전기를 예로 들 수 있다.

(3) 유동에 의한 대전

가솔린과 같은 액체류가 파이프 등의 내부에서 유동할 때 관벽과 액체 사이에서 발생하는 현상으로, 이때에는 액체의 유동속도가 정전기 발생에

2. 일반사항

가. 정전기 대전

(1) 마찰에 의한 대전