

火災와 燃燒現象

金 相 旭*

본 강좌는 소방공학분야를 기초과정에서부터 전문성에 이르기까지 공부하는 데에 관심을 갖거나, 산발적으로 또는 부분적으로 상당한 지식은 있으나 보다 이해의 체계화를 추구하고자 하는 회원들을 위하여 연재물의 성격으로 마련된 것이다. 따라서 본 강좌는 매우 교과서적 성격으로 편집될 것이다.

본 강좌의 내용은 본 학회의 회원중 사계의 전문인들이 협동하여 적절히 번갈아 집필함으로써 향후 연재회수에 제한없이 게재될 것이며, 관심있는 회원들에게 다소라도 도움이 되었으면한다.

1. 화재와 불

화재란 글자 그대로 불로써 야기된 재앙을 뜻한다.

이를 좀더 세분해서 「화재란 불로 인하여 일어나는, 그리고 소화의 필요성이 있는 인간생활의 불필요한 재앙」이라고 정의하기도 한다.

이로써 불 때 화재의 배경이 되는 본질은 곧 불이다. 그러나 불이라고 해서 모두가 화재인 것은 아니다. 인간생활에 직접, 간접으로 불필요한 재앙을 동반하지 않는 한 우리는 화재라고 말하지는 않는다. 예컨대 담배불, 모닥불 또는 용광로속의 불같은 것들을 두고 화재가 발생했다고 말할 수는 없다. 다만, 이와 같은 불들이 화재의

동기적 요인, 즉 화재요인이 될 수는 있으며 우리는 이러한 상황을 실제 현실에서 많이 목격하고 있다.

화재의 정의와 관련하여 화재로서의 불은 「소화의 필요성이 있는, 인간생활에 불필요한 손실을 초래하는 연소현상」이라고 정의하기도 한다.

동일한 연소현상이라도 인간생활에 필요한 경우도 있고 해로운 경우도 있다. 그래서 익화니 해화니 하는 식으로 편의에 따라 구분하기도 한다.

인간생활에의 필요성 여부에 대한 객관적 평가기준을 설정한다는 것은 어려운 일이다. 상황에 따라 익화가 해화로 변할 수도 있고 시대와 사회에 따라 달라질 수도 있다. 또한 인간생활에 불필요한 연소현상일지라도 인간능력의 한계를 벗어남으로 해서 소화의 필요성여부를 아예 논하기 어려운 경우도 있다. 예컨대 화산폭발 그 자체는 필연적으로 연소현상을 동반하지만 이를 소화한다는 것은 현재로서는 인간능력의 한계를 벗어나는 것으로서, 그 경우는 화재의 범주에 넣기보다 오히려 천재지변에 속하는 것이다.

불의 본질은 연소현상이다. 그렇다면 연소란 무엇인지, 그리고 연소가 일어나는 원인과 특성이 무엇인지를 이해하는 것이 화재의 본질을 파악하고 그 성격을 분석하며, 나아가서 화재를 효과적으로 제어하는 과학적 대응책을 강구할 수 있게 하는 올바른 길이 될 것이다.

*編輯理事, 利光엔지니어링代表, 消防技術士

2. 연소와 산화

연소(Combustion)란 어떤 물질이 지속적으로 급속히 산화(Oxidation)되면서 열과 빛을 동반하는 현상이라고 많이 일컬어진다.

다시 말하여 열과 빛을 동반하는, 이른바 발열산화반응(Exothermic Oxidation Reaction)이다.

이렇게 볼 때 연소의 본질은 물질의 산화반응이다. 그러나 산화반응이라고 해서 모두가 연소현상이라고 할 수는 없다. 산화반응의 속도가 매우 커서 열과 빛을 동반할 때, 이때의 산화반응이 연소라고 불리는 것이다. 예컨대, 철이 대기 중에서 서서히 녹스는 것은 분명히 공기중의 산소와 철이 화합하는, 이른바 철의 산화에서 나타나는 현상이지만, 그것을 두고 우리는 철이 연소하였다고 말하지는 않는다. 그러나 하나의 예로서, 순수한 산소를 채워둔 병속에 끝을 빨갇게 달군 철사를 넣으면, 열과 빛을 내면서 철사가 타들어가는 모습을 볼 수 있으며, 이때 철사가 연소하고 있다고 말하게 된다. 결국 연소는 산화반응의 한 형태로서, 그 반응속도가 매우 크기 때문에 열과 빛을 내는 현상임을 알 수 있으며, 이 때의 열과 빛을 총칭하여 우리는 불이라고 부르는 것이다.

연소의 배경에는 반드시 산화현상이 존재한다. 그러나 산화현상과 관계없이 열과 빛을 내는 현상도 무수히 있을 수 있다. 예컨대 쇠붙이와 같은 금속을 고온으로 충분히 달구었을 때 열과 빛을 낸다거나, 전기히터의 니크롬선이 발광 및 발열하는 것, 그리고 원자의 핵반응에 의한 발광 및 발열현상 등은 연소의 성격과는 관계없는 불의 한 형태이다. 따라서 연소현상만이 불의 생성 매카니즘은 아니다. 그러나 일상적인 화재는 어떤 물질이 예외없이 공기중의 산소와 발열산화반응을 일으켜서 나타나는 연소현상에 의한 것이며, 다만 연소의 특성과 관계없는 불들이 연소의 동기요인으로 작용하는 경우도 많이 있다. 통상 산화란 어떤 물질이 산소와 화합하는 현상(반드시 산소와 결합하는 것만은 아니지만)이라고 말하여진다.

모든 화학반응이 그러하듯 산화반응도 발열성

의 것과 흡열성의 것이 있다. 따라서 산화반응의 속도가 아무리 크더라도 발열반응이 아닐 때는 연소와 연관지을 수는 없다. 예컨대 질소와 산소가 반응하여 일산화질소가 생성되는 반응은 흡열반응(Endothermic Reaction)이며, 이 때는 질소가 연소한다고 말할 수는 없다. 어떤 물질이 산화하려면 산화제의 역할을 하는 물질이 필요하다. 일반적으로 화재의 연소현상에는 거의 전부 대기중의 산소가 산화제의 역할을 한다.

연소될 수 있는 물질을 가연성물질 또는 연료라고 한다. 때로는 순수한 화학용어를 사용하여 환원제라고 말하기도 한다. 산화와 환원(Reduction)은 오로지 상호 상대적인 관계에서 설명되는 개념이다. 따라서 산화제라고 해서 어떤 경우라도 산화제의 성질만을 갖거나 환원제 또한 환원제의 기능만을 담당하는 것이 아니라, 상대되는 물질 상호간의 화학적 특성에 따라 그 역할이 바뀔 수도 있다.

가연성물질이란 적당한 조건하에서 산화할 수 있는 성분을 가진 물질이라고 할 수 있다. 산화할 수 있는 성질을 가지고 있다는 것은 아직 완전한 산화상태에 이르지 않았음을 뜻한다. 그러므로 완전한 산화상태에 이르지 않은 것은 모두 연료로서의 가능성을 갖고 있는 것이다. 어떤 물질이 완전히 산화되었는지를 알기 위해서는 그 물질에 관한 화학지식이 필요하나, 실제에 있어서는 탄소, 수소, 또는 좀 드물기는 하지만 유황 등이 주성분으로 구성되어 있는 물질들은 대체로 산화가 가능하다고 말할 수 있다. 고체상태로 된 대다수의 가연성 유기물과 인화성의 액체 및 기체류에는 탄소와 수소성분이 많은 비율로 함유되어 있다.

화재시 연소에 기여하는 산화제가 공기중의 산소임은 이미 알고 있는 사실이다. 그러나 드문 경우이기는 하지만 적절한 조건하에서 그 자신이 쉽게 산소를 방출함으로써 산화제의 기능을 보여주는 물질도 있다. 예컨대 염소산칼륨($KClO_3$), 질산나트륨($NaNO_3$) 등은 산소를 방출시켜 줄 수 있는 잘 알려진 산화제들이다. 뿐만 아니라, 파이록실린계의 수지류(예:셀룰로이드)와 같이 자체내에 연소에 참여할 수 있는 산소성분을

일부 함유하고 부터의 산소공급없이도 부분적인 연소가 가능한 가연물도 있다. 그 밖에도 염소, 탄산가스 및 질소를 비롯한 몇가지 기체류속에서 산소의 공급없이 발화할 수 있는 특수한 경우도 있다. 예컨대 지르코늄의 분진은 탄산가스내에서도 발화할 수 있는 성질을 갖고 있다. 이상과 같은 여러가지 실예들은 현실적으로 흔치 않은 경우에 속하지만 이러한 물질이 취급되는 곳에 대한 화재의 예방 또는 진압을 위해서는 이에 대한 학술적 지식을 가져야 할 필요가 있는 것이다.

그러나 우리의 일상 생활에서 언제나 쉽게 접하게 되는 통상적인 가연물이 취급되는 곳의 연소현상은 대기중의 산소와의 관계성에 국한하여 이해되어도 족할 것이다.

3. 연소의 과정과 특성

화재예방 및 진압을 위해 알아두어야 할 연소에 대한 관련지식은 매우 광범위하고 복잡난해하며, 이에 대한 완전한 이해를 위해서는 넓고 깊은 물리학적, 화학적 지식을 바탕으로 Physical Chemistry, Stoichiometry, Thermodynamics, Transport Phenomena, 그리고 Fire Dynamics 등 많은 분야에 대한 섭렵이 요구된다. 그러나 일상적으로 상식적 차원에서 기본적으로 숙지해 두어야 할 필요가 있을 것으로 생각되는 것들, 예컨대 발화와 발화점, 인화와 인화점, 연소점, 연소의 형태, 연소범위, 폭발, 연소생성물 등에 대해 살펴보기로 한다.

3-1. 발화와 발화점(Ignition and Ignition Temperature)

산화는 공기(산소)와 같은 산화제가 존재하는 한 계속 일어날 수 있지만 보통 상온에서 일어나는 산화반응은 그 속도가 매우 느린 경우가 많아서 사람이 잘 알지 못하는 일이 많은데 이 경우의 산화를 두고 연소라 부르지는 않고 가연성물질이 열과 빛을 동반하면서 지속성의 산화를 일으킬 때 연소라고 한다는 것은 이미 살펴 보았다.

보통 상온에서 일어나는 느린 산화의 경우라도 반응열은 생성된다. 하지만 그 정도의 생성열로 방출되는 반응열은 반응을 지속시켜줄 수 있는 충분한 에너지원이 되지 못하는 못한다. 그러나 가연성물질이 가열되어 온도가 점점 상승하면 반응속도가 빨라지면서 반응열의 생성열도 급속히 증가한다. 그리하여 온도가 어느 한도이상이 되면 발열은 물론 빛도 동반하는 급격한 산화의 모습, 즉 불의 모습을 보여주기 시작하는데 이때의 반응을 우리는 발화(Ignition) 또는 초기연소라고 부른다. 이 때의 반응열은 미산화상태의 가연물을 급격히 산화시켜 발열 및 발광되게 하는 충분한 에너지원이 될 수 있다. 즉 발화란 지속성의 연소가 일어나기 시작하는 것을 두고 일컫는 말인 것이다.

발화되면서부터 연료와 산화제의 공급이 끊어지지 않고 별도의 반응제어요인이 작용하지 않는 한 이와 같은 반응은 지속될 수 있다.

발화가 일어나기까지의 과정과 조건을 충분히 이해하기 위해서는 화학반응속도론(Reaction Kinetics)과 관련하여 파악할 필요가 있다.

그러나 화학반응속도에 관계되는 요인은 대단히 복잡하며, 반응매카니즘에 대한 정성적 및 정량적 이론이 아직 완전히 정립된 상태도 아니다. 그러나 분명한 것은 연료 및 산소의 분자(때로는 원자)들이 가진 상대적인 농도, 즉 조성(Composition)과, 이들 분자의 평균병진운동에너지(때로는 회전 및 진동에너지)등이 반응속도를 좌우하는 주요 인자로 작용한다는 점이다. 이들 분자는 상온의 비연소상태하에서도 여러형태의 운동에너지를 갖고 있지만, 이들이 일차적으로 외부로부터 에너지를 받아 어느 한도 이상의 에너지 준위에 도달하면 상호간의 화학반응으로 인해 생성된 반응열이 귀환(Feedback)하여 다른 분자들까지 그와 같은 에너지준위에 도달시켜 줌으로써 지속적인 반응이 일어날 수 있게 된다.

분자들이 소요에너지준위에 도달하였을 때 분자들이 활성화(Activation)되었다고 말한다. 활성화분자들의 반응에 의해 생성된 고에너지는 미활성 분자들에 대해 충분한 활성화에너지원으로

작용하여 반응을 지속되게 할 뿐 아니라 여분의 충분한 열에너지에 의해 이들 분자의 구성요소의 하나인 전자의 에너지준위가 변화함으로써 인해 방출되는 여러파장의 전자파중 가시범위의 파장에 속하는 것이 우리의 시각에 발광의 모습으로 나타나는 것이다. 분자들의 활성화에 필요한 최소의 소요에너지를 활성화에너지 또는 초기 연소에너지(Threshold Energy)라고 한다. 지금까지의 설명을 요약하면, 발화란 연료와 산소의 분자들이 활성화에너지 상태에 도달하여 일어나는 반응의 결과 생성, 귀환되는 반응열이 미활성분자들의 활성화를 위한 자체공급원으로 작용하여 산화가 지속될 수 있는 반응속도를 갖기 시작하는 과정이라고 말할 수 있다. 그러나 이미 설명한 바와 같이 반응속도를 좌우하는 여러 요인중 연료와 산소의 분자들이 차지하는 상대적인 농도, 즉 조성이 주요 인자로 작용하게 된다.

화학반응이 일어나기 위해서는 반응에 참여할 분자들(때로는 원자들)이 상호 접촉할 수 있어야 하며, 분자들의 접촉빈도가 많아야만 같은 시간동안 보다 많은 반응이 이루어질 수 있을 것이다. 즉 반응속도가 커질 것이다. 분자들의 일부가 활성화되었다 하더라도 반응에 참여할 분자들의 조성(가연성분자와 산소분자간의 조성)이 어느 소요범위에 들지 못하면, 비록 느린 산화는 진행될 수 있을지라도 반응열의 만족한 귀환이 이루어질 수 없기 때문에 발화의 모습은 보이지 않게 된다. 이미 알게 된 바와 같이 통상적으로 화재로서의 연소는 연료와 대기중의 산소와의 산화반응이며 대기중의 산소는 약 21%의 체적 농도를 갖고 있다.

이 농도는 대다수의 가연물에 대해 연소를 일으켜 줄 수 있는 충분한 정도의 것으로서 대기중에 거의 고르게 분포되어 있는데, 대부분의 연료들은 가열되면 가연성분자들이 방출되면서 주위의 공기와 혼합된다.

연료가 점점 고온으로 가열되면 혼합기체속의 가연성분자의 농도와 혼합기체의 온도도 증가한다. 가열되는 연료로부터 가연성분자들이 발생하는 것은 일반적으로 증발, 열분해 또는 이 두가지 현상의 복합적인 작용에 의한 것이다. 모든 물질이

그러하듯 가연성물질 역시 상온에서 고상의 것도 있고, 액상 또는 기상의 것도 있다.

그 중 액상의 연료가 가열되면 그 표면으로부터 기상의 가연성증기(분자들)가 발생하면서 액체표면의 주위에 공기와 혼합기체가 조성된다. 만약 액체를 점점 고온으로 가열해 주면 증기의 발생량도 증가하여 혼합기체속의 가연성증기가 갖는 농도도 증가될 것이다. 고체 연료의 경우 가연성분자의 발생은 대개 액체처럼 증발에만 기인하지는 아니한다. 고체연료는 그 구성요소가 모두 가연성의 것만으로 되지는 않은 경우도 있고, 단일종류의 물질로 구성되지 않은 것도 많다.

따라서 고체 가연물에 있어서는 내부에 응축, 내포되어 있는 증발성의 가연성분자가 화학적 변화없이 열에 의해 물리적인 증발을 한 것과, 그외의 물질에서 화학적으로 열분해하여 생성된 것들이 함께 산소와 혼합되는 경우가 보통이다.

그러므로 고체 또는 액체의 연료가 발화되기 위해서는 증발에 의해서든, 분해생성물에 의해서든, 또는 이 두가지 현상의 복합에 의해서든 간에, 연료가 점점 고온으로 가열됨에 따라 연료주위에 형성되는 혼합기체(가연성기체+산소)의 조성이, 분자들의 일부가 활성화될 수만 있으면 언제든지 발화되는 범위에 이를 수 있게 된다. 이와같은 범위에서 혼합기체분자들의 일부를 활성화시켜 줄 수 있는 에너지의 공급방법에는 다음과 같이 두가지가 가능하다.

첫째는 연료를 점점 고온으로 가열함으로써 혼합기체분자들의 일부가 활성화되는 것이며, 둘째는 분자들의 일부를 충분히 활성화시켜 줄 수 있는 고에너지원, 즉 고온의 열원을 혼합기체와 접촉시켜주는 경우이다. 전자의 경우에 일어나는 발화를 자동발화(Auto-Ignition), 후자의 경우에 일어나는 발화를 유도발화(Piloted-Ignition)라고 한다. 유도발화를 일으켜주는 열원을 점화원(Pilot Source), 점화원이 갖는 에너지를 유도에너지(Pilot Energy)라고 하며, 유도발화가 일어났을 때 우리는 점화 또는 인화되었다고 말한다. 점화원으로는 불꽃, 스파크등 여러가지 유형의 것이 있을 수 있다. 전자의 방법에 의해 연료가 자동발화할

수 있는 최저의 온도를 자동발화점, 후자의 방법에서처럼 혼합기체의 조성이 점화원의 존재하에 발화가 가능한 범위에 도달하는 최저온도를 유도발화점이라고 하며, 이 두 경우의 최저온도를 총칭하여 발화점(Ignition Temperature)라고 한다.

그러나 통상적으로 자동발화점만을 두고 그냥 발화점이라고 부르는 것이 관습화되어 있다. 특히 인화성액체에 대한 유도발화점을 인화점(Flash Point)이라고 한다. 인화점은 실제에서 액체상태의 가연성위험물을 취급할 때 매우 중요한 의미를 주는 물성에 속한다.

유도발화를 일으키고자 할 때, 가연성 혼합기체의 온도를 상승시킬수록 보다 적은 유도에너지(점화원이 갖는 에너지)의 공급만으로도 기체분자들의 일부를 활성화시켜 발화가 가능할 것이다. 만약 혼합기체를 더욱 가열시키면 어느 온도에 이르러 유도에너지의 공급없이도 스스로 발화할 수 있을 정도로 기체분자들의 일부가 활성화될 것인 바 이때의 발화가 자동발화인 것이다. 따라서 일반적으로 자동발화점은 유도발화점보다 높은 값을 가진다. 발화점은 가연물의 종류에 따라 다르다. 그러나 같은 종류의 연료라도 발화점은 측정조건에 따라 달라진다. 실제에 있어서 가연성 혼합기체의 조성외에도 혼합기체의 압력과 체적, 발화공간의 형태, 점화원이 갖는 유도에너지의 성질과 점화원의 온도, 가열시간, 그리고 혼존하는 이물질의 촉매작용등이 반응속도를 좌우하는 인자가 되기 때문에 발화점은 대체적인 값이 된다는 것을 고려할 필요가 있다. 그런 관계로 같은 물질에 대해서 시험기판마다 서로 다른 발화점을 발표하고 있다.

고체가연물의 발화점은 가열공기의 유량, 가열속도, 가연물 시료의 크기나 모양에 따라 달라진다. 소형시료에 의한 시험결과로는 가열공기의 유량과 가열속도를 증가시키면 발화점은 처음에는 차츰 낮아져서 일단 최소점에 이르고 다시 증가하는 경향이 있다.

3-2. 인화점과 연소점(Flash Point and Fire Point)

앞에서 인화점이란 무엇인지 이미 설명되었다.

액체의 인화점은 발생증기가 공기(산소)와 혼합되어 가연성의 조성이 형성될 수 있을 때까지 액체의 온도를 올려주면서(즉 액체의 증기압을 올려주면서) 혼합기체를 점화원에 통과시켜 관찰함으로써 쉽게 측정할 수 있다. 점화원을 통과하는 혼합기체속에서 어느 순간 점화원 주위에 불꽃이 일어날 때, 그 때의 온도가 곧 그 액체의 인화점이다. 그런데 인화점에서 점화원을 제거했을 때도 계속 타는 것이 아니라 단지 그 순간에만 불꽃을 내면서 점화될 뿐이다. 그것은 그 온도(인화점)에서의 가연성 기체분자의 낮은 농도, 즉 혼합기체속에 희박하게 분포된 상태에서의 점화원에 의한 발화만으로는, 생성된 적은 반응열의 귀환량으로 미반응분자들을 활성화시켜 주기에는 미흡하여 단지 점화원에 접촉되는 분자들만이 불꽃을 생성시켜줄 수 있기 때문이다.

인화점은 위험물을 취급함에 있어 화재안전에 대한 중요한 척도가 된다. -42.9°C의 인화점을 가진 휘발유의 경우를 보면 일상온도하에서 계속 가연성의 증기를 발생하여 점화원을 제거해버린 다음에도 계속 타거나 폭발(형성된 혼합기체가 차지하는 공간의 조건에 따라) 일으켜 준다. 그것은 일상온도가 휘발유의 연소점(Fire Point)보다 월등히 높기 때문이다. 가연성액체를 인화점보다 높은 온도로 계속 가열시켜줌으로써, 형성된 혼합기체가 점화원의 제거후에도 자발적으로, 그리고 지속적으로 연소될 수 있는 어느 온도에 이르게 할 수 있는데, 이 때의 온도를 연소점이라 한다. 그것은 혼합기체속의 가연성분자들의 분포밀도가 인화점 상태에 비해 비교적 높아져서 점화원에 의해 발화된 분자들이 방출하는 열이 주위의 미반응분자들을 활성화시켜 주기에 충분한 상태가 되고, 이 귀환열에 의해 가열된 분자들 역시 활성화됨으로써 결과적으로 점화원의 제거에도 불구하고 연소가 자발적으로 지속되게 되는 것이다.

연소점은 언제나 인화점보다 약간 높는데, 휘발유의 경우를 볼 때 일상온도는 연소점보다 훨씬 높아서 인화점과 연소점의 차이가 뚜렷이 느껴질 만한 경우를 거의 경험하지 못하기 때문에 인화점과 연소점을 혼동하기 쉽다. 실제에 있어

연소점을 고려해야할 상황은 많지 않으나, 가연성 액체를 취급하는 화학공정에 있어서 가연성 증기의 발생을 막아줄 필요가 있을 경우에는 반드시 액체의 온도를 최소한 연소점이하로 낮추어줄 필요가 있게 된다. 연소점은 대개 액체화재에 있어 액체의 위험도(Degree of Danger)만을 나타내는 데에 사용되지만, 액체를 이 온도 이하로만 낮추어준다고 해서 반드시 위험요인까지 제거되는 것은 아니다.

3-3. 연소의 범위

「3-1. 발화와 발화점」에서 가연성의 혼합기체가 적절한 범위의 조성(가연성분자와 산소분자의 조성)을 갖는 것이 발화의 중요한 조건이 된다는 점을 설명하였다. 일단 발화되어 계속 연소되기 위해서는 이와 같은 범위의 조성을 줄 수 있도록 연료와 산화제의 공급이 계속될 필요가 있다. 가연성의 혼합기체에 있어 가연성분자들이 차지하는 농도가 클수록 혼합기체속의 산소농도는 감소한다. 즉 가연성분자들과 산소분자들의 농도는 상대적이다. 어느 한 편의 농도가 지나치거나 모자랄 경우에는 반응에 참여하는 연료분자와 산소분자들의 접촉빈도가 크게 감소하기 때문에 연소는 지속되지 않는다. 그러므로 지속적인 연소가 가능하려면 혼합기체의 조성이 어느 적절한 범위내에 있어야 하는 것이다. 이와 같은 조성을 충족시켜줄 수 있는 연료분자의 농도범위(공기와 혼합상태에서 연료분자가 갖는 체적농도의 범위를 뜻한다)를 그 연료의 연소범위(Flammable Range 또는 Range of Flammability)라고 하고, 연소범위를 나타내는 연료농도의 고저한계를 연소한계(Flammable Limits)라고 부른다. 연소한계란 주어진 압력조건하에서 산화제속에서 발화된 불꽃이 계속 확산될 수 있는 가연물의 한계농도인 것이다.

예컨대, 수소-공기 혼합물은 대기압 20℃의 조건하에서 수소의 농도가 4.0 - 75%의 범위에 있을 때 이 혼합기체가 인화되면 발화된 불꽃이 계속 퍼져나갈 수가 있다. 이 경우에 낮은 쪽과 높은 쪽의 한계치를 각각 연소의 하한(Lower Flammable Limit) 및 상한(Upper Flammable

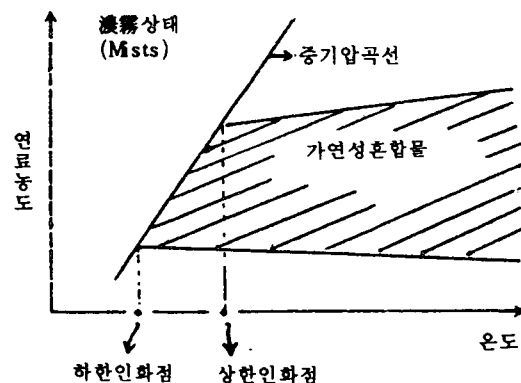
Limit)이라 부른다.

몇가지 가연물의 연소한계를 예시하면 아래의 표와 같다.

表. 可燃性物質의 燃焼限界(例)

가 연 성 물 질	연소한계(체적%)	
	하 한	상 한
아세톤(용제)	2.6	12.8
아세틸렌	2.5	81.0
알 콜(주정)	4.3	19.0
벤젠	1.3	7.1
부탄(LPG)	1.9	8.5
휘발유	1.4	7.6
수소	4.0	75.0
항공유(젯트用)	0.6	3.7
등유	0.7	5.0
메틸에틸케톤(MEK)	1.8	10.0
천연가스	3.8	17.0
프로판(LPG)	2.2	9.5

가연성혼합기체의 온도가 증가되면 아래의 그림에서 보는 바와 같이 연소범위는 넓어지며 온도가 떨어지면 좁아져서 연소될 수 있던 혼합물이 어떤 경우에는 온도의 강하로 인해 연소범위의 하한 또는 상한 밖으로 되어 혼합물이 비가연성의 상태가 되는 경우도 있다.



앞의 그림에서 보는 바와 같이 가연성증기가

공기와 평형상태를 이루면서, 즉 포화상태를 유지하면서, 액체표면상의 공간에 연소하한농도의 혼합기체를 형성할 수 있게 하는 최저온도가 존재하는데, 이 온도를 하한인화점(Lower Flash Point)이라고 하며, 반면에 연소범위의 상한에 이른 포화증기의 온도를 상한인화점(Upper Flash Point)이라고 한다.

통상적으로 물질의 인화점이라고 하면 하한인화점을 뜻한다. 하한인화점보다 낮은 온도에서는, 균일하고 연속적인 발화를 유지하기에는 연료증기의 농도가 충분하지 못하게 된다. 가연성액체의 인화점은 주위의 압력에 따라 달라진다. 주위의 압력이 커지면 증발이 억제되기 때문에 연소의 하한농도를 줄 수 있을 정도로 증기가 발생되기 위해서는 그만큼 온도의 상승이 있어야 할 것이며, 이 경우 가연성 액체의 인화점은 올라가게 된다.

연소범위는 주로 불꽃연소를 보여주는 가연성의 기체 또는 액체에서 적용된다. 그러나 고체연료의 경우라도 가연성 개스의 발생에 의해 대개 불꽃연소가 선행되므로 정성적인 면에서 불 연소범위가 성립되지만, 고체 가연물은 그 구조와 가연성분들이 천차만별이므로 그 범위를, 정량적으로 설정하는 것은 극난하다. 그러나 고체 가연물의 화재를 소화하는 경우, 예컨대 물로서 소화할 경우, 냉각에 의해 가연성분자들이 활성 에너지를 빼앗김으로써 소화된다는 사실 뿐 아니라, 정도의 차이는 있을지언정 발생된 가연성 기체를 연소범위로 부터 벗어나게 하는 점도 유의해둘 필요가 있다.

기체 또는 액체의 연소는 연소의 환경과 공간의 여건에 따라 폭발의 모습을 보여줄 수도 있는데 이러한 폭발도 연소의 한 형태이므로 연료의 농도는 연소범위내에 있어야 가능해진다. 그러므로 연소한계는 곧 폭발한계(Explosive Limits)가 될 수 있다.

3-4. 불꽃연소와 작열연소.

가연물이 타면서 나타나는 불의 모습에서 우리는 두가지 유형의 것을 볼 수 있는데, 하나는 바람에 나뭇기는 깃털처럼 움직이는 불의 모습,

즉 불꽃(Flame)과, 불꽃은 보이지 않으나 빛을 내면서 타고 있는 불의 모습이 그것이다. 전자의 연소를 불꽃연소(Flaming Combustion) 또는 유염성연소 그리고 그와 같은 양상을 보여주는 가연물의 화재를 표면화재(Surface Fire)라고 부르며, 후자의 연소를 작열연소(Glowing Combustion 또는 Smouldering Combustion), 그리고 작열연소의 양상을 많이 보여주는 가연물의 화재를 심부화재(Deep-seated Fire) 또는 무염성표면화재(Flameless Surface Fire)라고 한다.

불꽃은 가연성혼합기체의 연소에서 일어나는, 다시 말하여 가연성분이 기체분자상태에서 일어나는 현상이며 기체는 대류에 의해 끊임없이 유동하기 때문에 마치 바람에 나뭇기는 깃털처럼 움직이는 불꽃의 모습이 우리의 시야에 들어 오게 되는 것이다. 아세틸렌, LPG, 알콜, 휘발유 등의 기체 또는 액체연료들은 전형적으로 불꽃연소를 보여주는 물질이다. 연소가 일어남에 따라 발생하는 열에 의해 가연성액체로부터 끊임 없이 증기가 발생하고 이 증기가 주위의 공기와 혼합되면서 계속 불꽃의 양상을 보여주게 된다. 그러나 불꽃연소란 것이 기체 또는 액체연료에서만 일어나는 것은 아니다. 고체의 경우라도 증발 또는 열분해등에 의해 가연성 기체가 끊임 없이 방출되는 물질들에서는 불꽃연소를 얼마든지 볼 수 있다. 그러나 대부분의 고체연료에 있어서는 불꽃연소와 작열연소의 두 양상이 서로 정도의 차이는 있을지언정 동시에 진행되는 경우가 많다. 작열연소는 다음 현상들중 어느 하나 또는 그 이상에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있다.

첫째는 산화성을 가진 원소가 고체의 형태로 결합되어 있는 상태에서 고온의 열을 받았을 때 증기나 분해생성물의 방출없이 그 원소자신이 고진폭의 진동에너지를 얻게 되어 안정상태의 고체결합이 결렬되면서(즉 활성에너지 준위에도달하면서) 일어나는 연소의 경우이다.

거의 순수한 탄소로 구성되어 있는 숯이 탈 때 이와 같은 모습을 흔히 볼 수 있는데, 이 경우 거의 불꽃연소가 일어나지 않는 것은 숯을 만드는 목재의 건류과정에서 다량의 유기물들이 증발 또는 열분해하여 방출됨으로써 거의 대부분

분 탄소성분만이 남게 되는 까닭이다.

둘째는 숨뿜치가 느린 속도로 탈 때 처럼, 가연물의 표면으로부터 방출되는 가연성기체가 거의 대류를 일으키지 못하고 고농도상태를 형성하면서 그 표면에서 산소(공기)와 반응하여 일어나는 연소의 경우이다.

이와같은 연소를 응축상태의 연소(Condensed Phase Combustion)라고 일컫기도 한다. 작열연소는 대개 고체연료에서 나타난다. 작열연소의 양상과 타는 속도는 연료 내외부의 기하학적 구조와 형태에 따라 크게 좌우된다. 불꽃연소와 작열연소는 소화설비 특히 이산화탄소, 할로겐화물 등을 비롯한 특수소화약제를 사용하는 소화설비 계획과 적용에서 중요한 연관성이 있다는 점을 유의해 둘 필요가 있다.

3-5. 폭발(Explosion)

폭발이라고 부를 수 있는 현상들은 일상생활에서 대단히 다양하고 복잡한 결과를 보여주는 일이 많기 때문에 일반에서는 명확한 의미를 가지고 사용하고 있지 못한 경우가 많다. 폭발의 의미를 한두마디로 정확하게 정의하기는 어려워서 「큰 음향을 동반하면서 물질 또는 물체들을 제 위치로부터 갑작스럽게 날려보내버리는 현상」이라고 정의한 것도 있고 급격한 화학반응에 의하여 본래의 물질이 고온, 고압의 기체로 변하는 것이라고 정의한 것도 있다. 폭발은 어떤 현상에 따른 효과와 결과로 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 예컨대 인화성의 기체가 공기와 혼합되어 용기에 채워진 것을 점화시킴으로써 압력이 급상승하여 용기가 파열될 경우에는 폭발이라고 말할 수 있다. 그러나 용기내에 용기의 한계능력 이상으로 고압의 수증기를 계속 주입할 경우에도 용기는 파열될 것이다. 이것도 폭발이라고 말할 수 있다. 전자의 경우는 물질의 화학적변화로 인하여 나타난 폭발이지만 후자의 경우는 물리적 변화에 따른 것이다.

폭발이란 기체의 급격한 팽창으로 인하여 생성되는 기계적인 일의 효과라고 생각할 수 있는데, 이와 같은 성격의 기체는 폭발이라는 결과를 보여주기 전이 이미 존재할 수도 있고 폭발시에

형성될 수도 있다. 그러므로 넓은 의미에서 폭발이란 「어떤 계(System)」가 급격한 물리적 또는 화학적 변화를 일으켜 (또는 물리적 및 화학적 변화를 동시에 일으켜) 그로 인하여 발생된 에너지의 일부 또는 전부가 외계(Surroundings)에 대한 일로 전환되는 과정」이라고 정의할 수 있을 것이다. 이 과정에서 그 계로부터 충격파(Shock Wave)가 동반되는 경우도 있고, 어떤 물질 또는 구조물이 그 계를 둘러싸고 있을 경우 이들에 대한 파괴를 일으킬 수도 있으며, 이 두가지 효과를 동시에 진행시킬 수도 있다. 폭발은 때때로 계에 대한 부적절한 조작 및 유지과정, 또는 계획과 설계상의 오류의 결과로 야기되기도 한다.

폭발에는 화학적폭발, 기계적폭발 및 핵폭발 등의 유형이 있다.

3-5-1. 화학적 폭발(Chemical Explosion)

화학적 폭발은 명칭 그 자체의 의미대로 물질의 화학반응에 연유된 폭발로서, 주로 가연물과 산화제간의 맹렬한 발열반응에서 생성된 열에너지가 기계적에너지로 전환됨으로써 폭발의 결과를 초래하는 경우가 많다. 그러나 하나의 계에서 발열반응의 영역이 그 계의 내부에서 음속을 초과하는 속도로 급속히 확산, 진행됨으로써 계의 내부에서 충격파가 발생하는 경우도 있는데, 이와 같은 현상을 디토네이션(Detonation)이라고 한다. 화학폭발의 경우 디토네이션을 보여주는 발열반응에 있어서는 반응생성열이 충격파에 대한 에너지의 공급원이 되면서, 반응의 연속적인 확산에 필요한 열에너지의 공급이 대류(Convection), 전도(Conduction) 및 복사(Radiation)의 현상에 의하지 않고, 전파되는 충격파에 의하여 가해지는 압축력이 미반응물질들의 활성화를 위한 온도상승을 일으켜 줌으로써 반응이 순식간에 완결되게 된다.

탄약류와 같은 폭발물중에는 디토네이션을 일으킬 수 있는 경우가 많다. 그러나 가연성기체 (또는 액체)의 반응에 의한 디토네이션도 흔하다.

디토네이션을 일으킬 수 있는 물질에 있어서는 그 조성, 온도 및 밀도 등의 특성이 정해짐에

따라 반응영역의 전파속도 역시 정해진다.

요컨대 화학적 폭발에 있어서 디토네이션은 충격파에 의해 유지되는 화학반응이라 할 수 있다. 반면에 반응열이 대류, 전도 및 복사에 의해 전달, 확산되면서 반응영역의 확산속도가 음속보다는 느린 연소현상을 Deflagration이라고 부른다. Deflagration은 가연성의 기체-공기혼합물의 연소에 의해 일어나는 경우가 많지만, 분진(Dusts) 또는 농무상태(Mists)의 가연물질이 공기와 혼합된 상태에서 발생하는 Deflagration도 빈번하다. Detonation이나 Deflagration은 그 자체가 폭발은 아니다. 폭발이라는 결과를 초래할 수 있는 원인으로서의 한 매카니즘이다. 예컨대 인화성의 증기와 공기의 혼합물이 용기에 담긴 것에 점화하여 용기가 파열되면 폭발이라고 부를 수 있지만, 용기가 파열되지 않는다면 용기의 내부에서 비록 Detonation이나 Deflagration이 일어났다고 할 수는 있으나 외계에 대해 기계적인 일을 생성하지 않았기 때문에 폭발이라 할 수는 없다. 그러나 현실에서는 이 두가지 개념의 용어를 폭발과 혼용해서 사용하는 일이 많다. Detonation이나 Deflagration이 폭발의 원인적 현상이 될 수는 있으며, 그와 같은 경우를 일상생활에서 무수히 볼 수 있다. 가연성의 기체(증기포함)와 공기의 혼합물이 Deflagration 또는 Detonation을 일으키기 위해서는 혼합기체의 조성이 어떤 범위내에 있어야 한다. 이 값은 주위의 조건에 따라 달라지지만 대체로 연소범위와 일치하는 것으로 알려져 있다. 공기중의 가연성 분진과 관련된 현상은 인화성의 기체-공기혼합물과 그 양상이 비슷하다. 가연성의 분진과 공기의 혼합물에 있어서는 대개의 경우 Deflagration이 일어나되 Detonation은 일어나지 않으나, 탄광의 갱도와 같이 밀폐된 곳 또는 수직의 샤프트(Shaft)같은 곳에서는 마치 운무처럼 공간에 퍼져있는 석탄 분진이 Detonation을 일으키는 경우가 있는 것으로 알려져 있다.

공기중에서 인화성의 액체가 마치 안개처럼 작은 입자들로 분산되어 있는 상태 즉 농무상태에서 Deflagration이 일어남으로써 폭발이 초래될 수도 있다.

이런 폭발을 농무폭발(Mist Explosion)이라고 한다. 농무상태는 보통 공기중에서 인화성의 증기가 응축되어 생기는 일이 많다. 이런 농무상태를 점화시키면 맹렬한 Deflagration이 일어날 수 있다.

화학적폭발에 있어 열폭발(Thermal Explosion)이라고 부르는 것이 있다. 화학적으로 발열성의 분해(Decomposition)를 일으킬 수 있는 불안정한 물질이 어떤 물질 또는 구조물에 의해 공간적으로 제한된 상태에서 분해될 때 생성되는 열에 의해 폭발의 결과가 나타날 때 열폭발이라고 부른다.

이러한 화학분해의 과정에서는 분해생성열에 의해 온도가 상승함으로써 물질의 분해율이 연속적으로 증가하여 전과정의 분해가 짧은 시간 내에 완결된다. 그리하여 그 과정에서 존재하는 물질(가스등)의 열팽창으로 인해 용기 또는 구조물이 파열되는 결과가 일어날 수 있다. 그리고 그와 같은 과정에서 형성되는 폭발력은 그 물질의 분해율에 따라 좌우될 수 있지만, 특히 그 물질을 공간적으로 제한하고 있는 용기의 기하학적 구조와 형태가 폭발력을 크게 좌우하는 요인이 된다. 열폭발은 연료의 연소에 의해 일어나는 것이 아니므로 분해의 과정에서 Deflagration은 존재하지 않는다.

열폭발을 일으킬 수 있는 물질이 어떤 용기 또는 장치내에 있을 경우, 열의 제거율을 분해열의 발생율보다 크게 하면 분해율은 점점 감소한다. 따라서 열제거율의 조절에 따라 분해율의 증감이 일정한 가속성 또는 감속성을 갖게 할 수도 있다. 열폭발을 일으켜 줄 수 있는 분해과정은 많은 화학공장의 공정에서 흔히 볼 수 있다. 그런데 화학분해에 의해 일어나는 폭발의 경우라도 열폭발의 경우와는 달리 분해의 시작과 더불어 동시에 산화반응이 일어남으로써 폭발이 초래되는 경우도 있다. 이런 현상으로 인한 폭발을 분해폭발(Decomposition Explosion)이라고 한다.

분해폭발의 경우에도 Deflagration이나 Detonation이 그 배경이 될 수도 있다. 분해폭발을 일으킬 수 있는 어떤 흡열성의 화합물중에는 거의 순간

적으로 분해하는 것도 있다. 상업용의 폭약, 그리고 탄약등은 이런 유형의 급격한 분해반응을 나타내는 좋은 예이다. 폭발물로 분류되지 않는 화합물중에도 어떤 상태하에서 분해를 일으키는 것도 있다. 산화제와 연료의 혼합물로 되어있는 것도 폭발성의 산화 및 환원반응을 일으킬 수 있다. 이 때 연료와 산소가 한가지 화합물을 이루고 있는 것도 있고, 탄소, 유황, 질산염으로 혼합되어 있는 흑색화약과 같이 별개의 화합물로 들어있는 것도 있다.

분해폭발시에는 보통 대량의 고온개스가 발생한다. 일반적으로 반응에 의하든 용기의 파열에 의하든간에 발생하는 고온개스의 생성속도에 의하여 폭발의 맹렬성이 결정된다. 흑색화약 또는 무연화약은 폭발의 맹렬성이 낮은 것으로서 총기류의 폭약으로 쓰인다. 그러나 이러한 것도 좁은 공간에서 대량으로 점화되면 고성능폭탄의 경우와 같은 Detonation을 일으킬 수 있다. 폭발물로 분류되지 않는 화합물 가운데, 대량으로 존재하거나 오염되면 Detonation을 일으키는 것도 많이 있다.

예컨대 비료용의 질산암모늄(일명 "초안", NH_4NO_3)이 다량 충전된 것에 강한 충격을 주면 폭발한다. Detonation은 충격파에 의해 발단되기도 하지만, 불에 의해 일어나기도 한다. 어떤 경우에는 실제 구별이 힘들 정도로 Deflagration이 가속되어 Detonation으로 변화되는 수도 있다.

Detonation에서는 충격파가 수반되기 때문에 Detonation이 일어나는 영역의 주위로 강한 기류의 영향 즉 폭풍효과(Blast Effect)가 발생한다.

Detonation에 의한 폭풍효과 크기는 주로 폭발물의 양과 목표물까지의 거리에 의하여 결정된다. 액체 혹은 고체폭발물의 경우 폭풍효과에 의한 충격압력이 폭발물의 인접지역에서 수백 kg/cm^2 에 이르지만 거리가 멀어짐에 따라 급격히 감소한다. 예컨대 TNT 1000파운드부터 45m 떨어진 곳에 미치는 충격압력은 약 $0.35\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 불과한 것으로 알려져 있다. 그러나 이 정도의 충격압력이라도 건물에 대해 심한 손상을 일으켜 줄 수 있다.

3-5-2. 기계적 폭발(Mechanical Explosion)

보일러가 폭발하는 경우와 같이 기계적 또는 물리적 변화에 의하여 일어나는 폭발로서 우리는 이와같은 폭발을 현실에서 자주 보게 된다. 이런 폭발의 경우에도 인명과 재산의 손실이 야기되는 일이 허다하다. 특히 산업시설에서 사용하는 보일러는 그 규모가 매우 큰 경우가 많기 때문에 이런 것이 폭발할 때는 특히 막심한 참화를 불러일으키는 일도 적지 않다. 그래서 보일러를 비롯해서 각종의 고압개스용기 또는 공정등은 내부의 압력이 비정상적으로 상승하더라도 파열되지 않도록 안전을 고려하여 설계되어야 한다. 뿐만 아니라 적용한 안전밸브등을 설치하여 비상시 압력이 배출되도록 조치해 두고 있다. 이들이 파열되는 원인으로는 여러가지가 있는데, 압력배출을 위한 안전장치가 결여되었거나, 그 기능이 마비되거나, 용기등의 자체 결함, 국소적인 가열, 또는 이물질이 들어가서 급격한 화학반응을 일으키는 등의 원인을 들 수 있다.

압력방출에 의한 폭발은 위에서 말한 장치들에서만 일어날 수 있는 것이 아니고 용융상태의 금속류나 염류(Salts)에 갑자기 물을 부어도 일어날 수 있다. 또한 페인트강통과 같이 증발성을 가진 액체가 담겨있는 용기가 화기에 노출되어도 폭발이 일어날 수 있다.

3-5-3. 핵폭발(Nuclear Explosion)

핵폭발은 원자핵내의 양자와 중성자가 재분배되어 다른 종류의 원자핵을 형성하는 결과로 일어난다. 이에 는 핵분열과 핵융합의 두 종류가 있다.

핵분열의 예로는 우라늄 ^{235}U 와 플루토(Pu)의 이용을 들 수 있다. 핵융합 과정에서는 두개의 원자핵이 하나의 원자핵으로 융합한다. 그 예로는 중수소의 이용을 들 수 있다. 핵반응 과정에서 Detonation을 동반하는 발생에너지의 형태는 핵반응장치, Detonation의 조건 등에 따라 다르다. 핵반응에 의해 공기중에서 Detonation이 일어나면 대체로 전체에너지의 약 50%가 폭풍 및 충격으로, 약 35%가 열로, 그리고 나머지가 방사능에너지로 나타난다고 알려져 있다.

(다음호에 계속)