

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.

4. 연소생성물(Combustion Products)

연소에 의하여 생성되는 것으로는 연소개스(Fire Gas), 화염(Flame), 열(Heat), 그리고 연기(Smoke)의 네가지로 대별할 수 있는데 이들을 연소생성물이라고 한다. 정도의 차이는 있을지언정 화재시 이들은 모두가 생성된다. 연소생성물은 인간의 신체와 행동에 여러가지 영향을 미침으로써 인간이 화재현장으로부터 때맞게 도피하고자 하는 데에 중요한 장애를 줄 수가 있다. 연소생성물들은 시야의 장애를 초래할 뿐 아니라, 뜨거운 공기와 연소개스의 흡입으로 인한 독성효과는 근육운동의 신경조직마비, 판단력의 감퇴, 감각기관의 착란, 의지력의 저하, 그리고 정신적 혼란과 극도의 공

포심리유발등, 인간으로 하여금 신체적 및 정신적으로 비정상상태를 유발시킨다. 상황이 잘못되어 안전도피가 지체되거나 장애를 받게 될 경우 이러한 위험은 더욱 가중되어 유독성개스의 다량흡입과 화상으로 인한 부상 또는 사망의 확율은 대단히 높아지게 될 뿐 아니라, 이와 같은 상황에서 구조된 사람들도 기도화상(氣道火傷:뜨거운 연소생성물의 흡입으로 인해 기관지 또는 폐의 조직이 손상을 입는 것)으로 인한 호흡기관의 병발증, 그리고 중화상등에 의해 결국 사망하게 되는 경우가 적지 않다.

4-1. 연소개스와 독성

연소개스(Fire Gas)란 연소생성물중 기체로 된 것을 일컫는 말이다. 엄밀하게 말하면 화열(火熱)에 의해 뜨거워진 연소생성물들을 정상시의 온도로 냉각하였을 때도 기체상태로 존재할 수 있는 연소생성물이 연소개스이다. 화재로 인한 인명의 부상이나 사망이 화염 또는 열과의 접촉에 의한 것으로 생각하는 사람들이 많다. 화재현장에서 타버린 소사자들을 볼 때 그와같이 단정해버리는 것도 무리가 아닐런지 모른다. 사실상 그와 같은 경우가 없는 것은 아니다. 그러나 실제에 있어서 화재로 인한 인명피해의 주요원인은 뜨거운 연소생성물의 흡입과, 산소결핍의 분위기속에서 호흡하는 데에 있는 것으로 알려져 있다. 소사자들의 대부분이 정상적인 신체조건상태에서 화염 또는 열과의 접촉에 의해 피해를 입게된 경우보다, 연소생성물의 흡입과 산소결핍에서 이미 사망해버리거나, 의식불명 또는 신체의 활동이 마비된 상태

*編輯理事, 利光엔지니어링代表, 消防技術士

에서 화염이나 열에 의해 비로소 소사하게 되는 경우가 대부분이다.

연소개스의 양과 종류는 연소물질이 화학적 성분과 유효산소의 공급상태(공급량), 그리고 온도에 따라 여러모로 달라진다.

유독성개스와 연기로부터 인명이 받는 영향은 그 분위기와 접촉시간과 연소개스의 농도등에 크게 좌우되지만, 개개인의 신체적 조건과 건강상태에 따라서도 큰 차이를 보인다.

연소개스를 호흡하는 사람이 받는 독성효과는 화재시에는 더욱 커질 수가 있다. 왜냐하면 산소 결핍 및 열에 의한 신체적 영향과 아울러, 인간의 심리가 극한상황에 처해질 때 본능적으로 안간힘을 쓰게 되고 이로 인하여 신체적인 피로가 급격히 유발됨으로써 호흡속도가 빨라지기 때문이다. 따라서 평상시에는 무해할 수도 있을 농도의 것이 화재조건하에서는 유해하게 될 수도 있다. 그러므로 연소개스의 독성을 정량적으로 그리고 일률적으로 정확히 평가한다는 것은 실제적으로 불가능할 뿐더러 그 기준의 정확한 설정도 용이한 일이 아니다. 그러나 비록 근사적이기는 하지만, 그 분위기에 잠간동안 노출되어 불과 몇회의 호흡만으로 치명적인 중독을 일으킬 수 있는 농도와, 이에 비해서는 그 분위기에 비교적 긴 시간동안 노출됨으로써 위험에 처할 수 있는 허용최대농도와의 대체적인 관련성을 알아보는 것은 현실적으로 도움이 될 수 있다. 표 4-1은 이 두가지 경우에 대한 연소개스의 농도를 보여주고 있는데, 이 값들은 단지 근사치에 불과하다는 것을 염두에 둘 필요가 있다.

이 표에서는 맨 위에서부터 아래로 독성의 순서에 따라 유독성개스가 열거되어 있다. 표에서 보여지는 두 종류의 값을 서로 비교해 보면, 장시간 노출에서의 허용최대농도가 단시간 노출에서의 위험농도보다 대략적으로 약 20배 정도의 관계성을 보여준다. 연소개스의 종류에 따라 더 큰 비율의 것도 볼 수 있으나 20배 이하의 경우는 없다. 따라서 단시간 노출에서의 위험농도를 알지 못하고 있는 유독성개스에 대해서는 장시간 허용최대농도의 최소한 약 20배로 추정해도 무방할 것이며, 이 경우 비록 정확하지는 않을지라도 영

(표 4-1) 연소개스의 독성비교

유독성개스	장시간 노출에서의 허용최대농도(ppm)	단시간 노출에서의 위험농도(ppm)
이산화탄소(CO ₂)	5,000	100,000
암모니아(NH ₃)	100	4,000
일산화탄소(CO)	100	4,000
벤젠(C ₆ H ₆)	25	12,000
유화수소(H ₂ S)	20	600
시아니화수소(HCN)	10	300
염화수소(HCl)	5	1,500
아황산가스(SO ₂)	5	500
이산화질소(NO ₂)	5	120
불화수소(HF)	3	100
염소(Cl ₂)	1	50
포스겐(COCl ₂)	1	25
3염화인(PI ₃)	0.5	70
아크로린(CH ₂ CHCHO)	0.5	20

똥한 결과를 주지는 않는다. 위의 표에서 볼 때 단시간의 노출에서 미량의 연소개스만으로 인체에 치명적이 될 수 있음은 분명하다.

화재시에는 여러종류의 연소개스가 생성되는 것이 보통이다. 이들 중에는 일산화탄소, 이산화탄소(탄산가스), 유화수소, 아황산가스, 암모니아, 시아니화수소, 염화수소, 이산화질소, 아크로린(Acrolein) 및 포스겐등이 인체에 가장 치명적인 연소개스로 알려진 대표적인 예에 속한다. 표 4-2에서는 연소물질의 종류에 따라 특히 많이 발생할 수 있는 연소개스를 보여주고 있다.

• 일산화탄소(CO)

일산화탄소는 연소개스류중에서 독성이 가장 큰 물질은 아니지만 가연성물질들중에는 탄소성분을 포함하는 것이 대부분이기 때문에 화재시에는 거의 빠짐없이 생성되는 연소개스에 속한다.

탄소가 연소할 때 공기의 공급이 충분하면 탄소의 완전연소가 가능할 수 있어 이산화탄소(CO₂)가 생성되지만, 그렇지 못할 경우에는 탄소의 불완전연소로 인해 일산화탄소가 생성된다. 따라서 공기의 공급량을 적절히 조절해줄 수만 있으면 탄산가스만이 생성되게 할수도 있겠으나 화재

(표 4 - 2) 연소물질과 생성가스

유독성가스	연소물질
일산화탄소 및 탄산가스	탄소성분을 내포하고 있는 모든 가연물
일산화질소 및 이산화질소 시아니화수소	셀룰로이드, 폴리우레탄 질소성분을 갖고있는 모사(毛糸), 비단, 피혁, 합성수지, 레이온 등
아크로린	나무, 종이
아황산가스	고무, 치오콜
수소의 할로젠화물(HF, HCl, HBr, 포스겐 등)	PVC, 방염수지(防炎樹脂), 불소수지류
암모니아	메라민, 나일론, 뇨소수지
알데이드	헤놀수지, 나무, 나일론, 폴리에스터수지
벤젠	폴리스티렌(스티로폴)

시에는 현실적으로 그와 같이 연소과정을 조절할 수 없으므로 가연물중에 존재하는 탄소의 일부는 불완전연소되어 일산화탄소가 된다. 특히 협소한 공간에서의 불이나, 화염을 내지 않고 연기만 나는 불에서는 좋은 환경조건하에서 밝게 타는 불에서보다 일산화탄소의 발생량이 크다. 화재시 발생하는 여러 연소가스의 혼합기체중에서도 일산화탄소가 인명에 주는 영향이 가장 큰데, 그것은 일산화탄소의 질식작용에 의한 것으로 알려져 있다. 질식은 인체가 산소결핍상태를 일으키는 것을 말한다. 인체가 산소결핍을 일으키는 것은 산소가 부족한 공기를 호흡함으로써 야기되기도 하지만, 일산화탄소의 화학적 작용에 의해 산소결핍이 초래될 수도 있으며, 그 진행속도 또한 매우 크기 때문에 인명에 주는 위험이 지극히 높다. 인체의 혈액속에는 헤모글로빈(Hemoglobin)이 구성성분으로 포함되어 있어 우리가 흡입하는 산소의 체내운반체의 역할을 하고 있다. 그런데 일산화탄소는 헤모글로빈과의 결합력이 매우 커서 일단 상호 결합하면 좀처럼 분리되지 않는다. 일산화탄소의 헤모글로빈에 대한 결합력은 산소에 비해 약 210배 정도 강한 것으로 알려져 있다. 그러므로 일산화탄소가 인체에 흡입될수록 산소의 혈중농도가 저하되어 결국 산소결핍 즉 질식을 일으키게 된다. 뿐만 아니라 일산화탄소는 체내에 발생한

(표 4 - 3) 일산화탄소의 위험도

일산화탄소의 농도 (ppm) ppm	인체의 반응
100	그 분위기에 수시간 노출이 가능하다.
400~500	한시간 후에도 특별한 증세는 보이지 않는다.
600~700	한시간 경과하면 뚜렷한 중독증세가 나타나기 시작한다.
1,000~2,000	한시간 후에는 신체의 정상기능이 급격히 저하된다.
1,500~2,000	한시간 동안의 호흡으로 위험한 상태에 이른다.
4,000	한시간 이내의 호흡으로 사망할 수 있다.
10,000	일분정도의 호흡으로 사망할 수 있다.

폐(廢)가스인 일산화탄소의 운반을 방해한다. 따라서 일산화탄소는 낮은 농도에서도 매우 위험하다. 표 4 - 3에서는 일산화탄소의 인체에 대한 위험농도를 보여주고 있다.

인체에 대해 일산화탄소가 보여주는 또하나의 위험은 정신적인 능력면에서 환경에 대한 적응성과 판단력의 감퇴를 초래하는, 이른바 행동독리학(行動毒理學, Behavior Toxicology)적 영향이 크다는 점도 주목할 만한 일이다.

• 일산화탄소(CO₂)

일산화탄소 그 자체는 일산화탄소처럼 인체에 대해 생화학적 영향을 줄 정도로 유독성의 것은 아니지만 화재시 대량으로 발생함으로써 공기중의 산소부족에 따른 질식효과를 보여주기 때문에 인명을 죽음에 이르게 할 수가 있다. 일산화탄소를 대량 흡입하면 산소부족을 보충하고자 하는 생체학적 작용으로 인해 호흡속도가 매우 빨라진다. 또한 산소부족 및 자극성물질의 존재로 말미암아 허파의 팽창을 일으킨다. 일산화탄소의 농도가 2%가 되면 호흡심도(呼吸深度)는 1.5배 정도 증가하고, 3%의 농도에 이르면 약 2배정도의 호흡심도를 보여주는 것으로 알려져 있다. 5%의 농도에서는 호흡이 과중해지고 사람에게 따라서는 심한 고통을 느끼게 된다. 남자의 경우 5%의 농도에서 약 1시간 정도로 알려져 있다. 실제화재시에는 이

산화탄소의 농도증가에 따라 호흡속도가 빨라짐으로써 함께 존재하는 유독성가스의 흡입율이 증가하기 때문에 위험은 더욱 가속화된다. 농도가 대체로 9%정도되는 이산화탄소 분위기속에서는 거의 모든 사람이 10분이내에 의식을 잃게 되고, 그 이상의 농도가 되면 의식을 상실하는 시간도 급진적으로 단축된다. 약 20%의 농도에서 인사불성이 된 사람은 신선한 공기를 충분히 호흡할 수 있도록 매우 신속히 조치하지 않는 한 대개 약 20~30분 이내에 사망하게 된다. 20%의 농도는 특별한 전문의학적 조치에 의하지 아니 하더라도 통상적인 방법으로 신선한 공기를 충분히 호흡시켜(때로는 인공호흡) 인명의 소생을 가능케 할 수 있는 한계농도라고 볼 수 있다.

산소결핍에 의해 인체가 받는 영향을 공기중의 산소농도와 관련해 볼 때, 보통의 공기중에 약21% 정도로 함유되어 있는 산소가 17% 정도의 농도로 감소되면 이 분위기속에서는 신체의 근육이 말을 듣지 않게 되고 산소의 농도가 14~10%로 떨어지면 의식을 잃지는 않을지라도 자신도 모르게 판단력을 상실하고 피로가 빨리 오며, 10~16%의 농도에 이르면 의식을 잃게 되지만 신선한 공기중에서 소생할 수는 있다. 기진맥진한 상태에서는 산소의 필요량이 많아지므로 산소가 앞에서 말한 농도보다 높아도 증세가 나타날 수 있다.

•유화수소(H₂S)

고무, 동물의 털과 가죽 및 고기등과 같은 물질에는 유화성분이 포함되어 있어 화재시에는 이들의 불완전연소로 인해 유화수소가 발생한다. 약 0.04% 농도의 유화수소 분위기속에서 30분이상 호흡하면 위험할 뿐 아니라, 0.08% 정도의 농도에서는 치명적인 위험상태에 빠질 수가 있다. 유화수소는 썩은 달걀에서 나는 것과 같은 특유한 냄새가 있어 쉽게 감지할 수가 있으나 0.02% 이상의 농도에서는 후각이 바로 마비되고 말기 때문에 불과 몇회만 호흡하면 전혀 냄새를 맡을 수 없게 되므로 유화수소에 대해서는 냄새가 감지되는 즉시 적절한 방호조치를 취할 필요가 있다.

•아황산가스(SO₂)

유화수소의 경우처럼 유황이 함유된 물질이 연소하는 화재시에 발생된다. 유화수소의 경우와는 달리 유황이 완전히 산화될 때 생성된다. 아황산가스는 자극성이 있어 눈 및 호흡기등의 점막을 상하게 하기 때문에 약 0.05%의 농도에 단시간 노출되어도 위험하다. 동물의 털, 고무 및 나무등이 탈 때 생성되는 아황산가스는 비교적 양이 적어 크게 위험하지는 않으나 유황을 저장 또는 취급하는 산업시설의 화재시에는 대량 발생할 수 있으므로 주의를 요한다.

•암모니아(NH₃)

암모니아는 눈, 코, 인후 및 폐에 매우 자극성이 큰 유독성가스로서 사람들이 그 분위기로부터 본능적으로 피하고자 할 정도로 역한 냄새가 난다. 암모니아는 상공업용의 냉동시설에서 냉매로 널리 사용되기 때문에 이런 시설의 화재발생시 잘못 누출되면 큰 위험을 초래할 수 있다. 대체로 0.25~0.65%의 농도를 가진 암모니아의 분위기속에서 30분정도 노출되면 대개 사망하기 쉬우며, 또는 그렇지 않게된 경우라도 생체의 내부조직에 심한 손상을 입게 되어 매우 위험하게 된다.

•시안화수소(HCN)

시안화수소는 맹독성의 유독가스로서 대체로 0.3% 이상의 농도에서는 거의 즉사한다. 그러나 다행히도 대부분의 화재에서는 발생량이 매우 적다. 목재나 종이류가 탈 때도 공기중의 질소가 탄소와 결합하여 생성되기도 하지만, 주로 질소함유물로 제조되는 수지류, 모직물 및 건직물이 불완전연소되어 발생하는 경우가 많다.

•염화수소(HCl)

염화수소는 PVC와 같이 염소가 함유된 수지류가 탈 때 주로 생성되는데, PVC는 전선의 절연재 및 배관재료등으로 너무도 널리 사용되기 때문에 거의 모든 건물에서 볼 수 있는 물질이다. 그래서 염화수소는 대부분의 건물화재시 소방관을 비롯한 진압요원을 애타게 하는 연소가스의 하나이다.

암모니아처럼 염화수소 역시 자극성의 물질로서 사람들이 싫어하는 냄새가 있으며, 약 1500PPM

의 농도에서 호흡하면 불과 몇분내에 치명적인 위험을 받을 수가 있다.

염화수소는 금속에 대해 강한 부식성이 있어 콘크리트건물의 철골이 때로는 손상되기도 한다.

• 이산화질소(NO_2)

이산화질소의 독성은 매우 커서 대체로 200~700 PPM 정도의 농도에 잠시 노출되지만 해도 인체에 치명적이다. 이산화질소는 질산셀룰로스가 연소 또는 분해될 때 생성되며, 질산암모늄(NH_4NO_3)과 같은 질산염계통의 무기물질이 포함된 화재에서도 발견된다. 그외에도 질산이 금속이나 가연물과 접촉하면 발생되기도 한다. 이산화질소를 흡입하면 즉각 인후의 신경감각이 마비되어 그 존재 여부를 깨닫지 못하는 경우가 많기 때문에 저도 모르게 방심해버릴 수 있으므로 크게 주의를 요한다. 이 개스의 분위기에 그다지 심하게 노출되지 않은 경우에는 독성의 효과가 대개 8시간쯤 전후에 나타나는데, 그래도 대개는 회복이 어렵고 폐렴등의 병발증이 유발되는 경우가 잦다.

• 아크로린(CH_2CHCHO)

아크로린은 석유제품 및 유지류(油脂類)등이 탈 때 생성되는데, 너무도 자극성이 크고 맹독이어서 1PPM 정도의 농도만 되어도 견딜 수 없게 될 뿐 아니라 10PPM이상의 농도에서는 거의 즉사한다. 다만, 일상적인 화재에서는 발생되는 경우가 극히 드물기 때문에 그다지 큰 문제가 되지는 않는다.

• 포스겐(COCl_2)

2차세계대전당시 독일군이 유테인의 대량학살에 이 개스를 사용한 것으로 알려짐으로써, 전시(戰時)에 사용하는 인명살상용의 독개스라면 이것을 연상할 정도로 마치 독개스의 대명사처럼 여겨져온 물질인데, 일반가연물의 화재에서는 대개 잘 발생되지 않는다. 이것의 독성은 매우 크지만, PVC나 염소성분의 용제가 포함된 화재에서 염화물계통의 증기가 대량으로 발생하지는 않는 경우 환기조건만 좋으면 인명에 그다지 중대한 결과를 초래하지는 않는다. 과거 소화약제로 많이 사용한 일이 있는 사염화탄소(CCl_4)가 고온의 금

속과 접촉함으로써 포스겐이 발생하여 사망자를 낸 경우가 있었던 것으로 알려져 있다.

4-2. 화염(Flame)

가연물이 대기중에서 탈 때는 거의 언제나 가시성(可視性)의 불꽃이 동반됨은 우리가 경험적으로 알고 있는 사실이다. 불꽃 역시 연소에 의해 나타나는 것이므로 연소생성물이라고 할 수 있다. 화재시에 인명이 중화상을 입는 일은 화염에서 방사되는 복사열에 의한 경우도 적지 않지만 대개 불꽃과의 접촉에서 일어나는 일이 많다. 화재의 확대 역시 인접가연물이 불꽃과 직접 접촉하거나 불꽃으로부터의 복사열에 의해 일어나는 일이 많다. 불꽃을 봄으로써 가연물이 불타고 있는 사실을 확인할 수 있는 일이 많지만, 화염없이도 열과 연기 및 개스를 내면서 연소가 일어나기도 한다. 화염은 불타고 있는 물질과 거리간격이 비교적 작은 경우가 보통이지만, 확대된 화재에서는 공기의 흐름에 의해 화염이 멀리까지 전달되기도 한다.

불꽃의 성질과, 특히 반응매카니즘은 「소화(消火)」라는 문제를 다루는 데에 있어 매우 중요한 연구대상이 된다. 이에 대해서는 아직도 모든 이론이 완전히 정립된 상태는 아니나 많은 진전을 보여주고 있다. 그 이론에 대해서는 추후 별도로 살펴보기로 한다.

4-3. 열(Heat)

불이 보여주는 본질적인 특성의 하나는 곧 열의 방출이다. 불에 의한 열의 방출율과 양은 많은 요인들에 의해 좌우되기 때문에 대단히 가변적(可變的)이다. 대다수의 화재에 대해 열의 방출율과 그 양을 파악해낸다는 것은 거의 불가능에 가깝다. 그러므로 그 요인들을 파악하는 일은 단지 거시적(巨視的)인 관점에서 이루어질 수 밖에 없다. 불로 인한 인명의 피해는 화열에 노출됨으로써 입게 되는 것이지만, 화원(火源)으로부터의 거리와 노출시간, 그리고 온도에 따라 경상(輕傷)에서 사망에 이르기까지 그 영향은 여러모로 달라지게 된다.

뜨거운 공기에 대한 노출은 맥박의 증가와 더

불어 탈수, 호흡장애, 기도(氣道)의 폐쇄 및 화상 등의 원인이 된다. 그래서 대체로 120 °F~130 °F (48.8°C~54.4°C) 이상되는 장소를 소방대원이 들어갈 때에는 방화복을 착용하는 것이 바람직하다고 주장하는 사람도 많다. 대체로 약 300 °F (140.8°C)를 초과하는 기온을 가진 건조한 화열분위기에서 호흡하면 살아남기 곤란할 뿐 아니라, 이런 분위기의 공기에 습기가 있으면 위험은 더욱 가중되어 생존가능시간은 급격히 감소하는 것으로 추정되고 있다. 화재시에 안전하게 대피를 하기 위해서는 피난로의 온도가 49°C~66°C를 넘지 않도록 건축설계시에 고려하는 것이 바람직하다. 여기에서의 온도는 일반적으로 높은 온도를 나타내는 천정부분이 아니고 대략 사람어깨 높이의 온도를 말한다.

사람이 고열에 장시간 노출되면 눈에 띄는 위상은 없더라도 폐속으로 들어간 열로 인해 혈압강하와 혈액순환장애로 사망할 수가 있으며, 그 외에도 장시간의 노출로 인해 체온이 상승함으로써 뇌신경중추에 손상을 입게되어 일사병(日死病)과 동일한 결과가 초래되어 사망하는 경우도 있다.

열 또는 불에 의한 화상은 그 정도에 따라 통상적으로 1도, 2도, 3도로 분류된다. 1도 화상은 최외각의 피부가 손상되어 그 부위가 빨간 색깔을 띄고 심한 통증을 느끼는 상태로서 2도 및 3도 화상보다 중증은 아니다. 2도 화상은 보다 깊숙히 피하(皮下)까지 손상을 입어 그 부위가 분홍색을 띄고 분비물이 피하에 모여 물집이 생기는 증세이다. 3도 화상은 피하의 지방질(脂肪質)에 까지 열이 깊숙히 침투된 것으로서 가장 중화상에 속하며, 말초신경까지 손상을 입어 그 기능이 죽은 상태여서 1도나 2도 화상에 비해 통증은 거의 느끼지 못하는 증세이다. 2도 및 3도 화상을 입으면 인체의 재생능력만으로는 피부가 원상으로 회복되는 힘들다.

4-4. 연기(Smoke)

화재로부터 생성되는 연기는 화재의 성격에 따라, 그리고 하나의 화재에 있어서도 시시각각으로 천차만별의 양상을 나타내므로, 생성되는 연기의

성질과 양에 대해서는 대체로 광의적인 설명만이 가능하다. 또한 연기는 현실적으로 연소개스와 완전히 분리하여 대비책을 강구할 수가 없는 경우가 대부분이어서 거시적으로 볼 때 연기란 것은 연소개스와 공기까지 포함하고 있는, 열과 불꽃 이외의 모든 연소생성물을 포괄적으로 뜻한다고 할 수 있는데, 경우에 따라서는 연소개스와 공기를 제외한 생성물만을 연기라고 말하기도 한다.

광의적으로 본 연기는 일반적으로 다음과 같은 구성요소들로 집합되어 있다.

- (1) 연소중인 물질개스로부터 방출되는 뜨거운 증기 및 개스류(연소개스)
- (2) 아직 타지 아니한 분해생성물 및 응축물질 (열은 색깔에서부터 검고 진한 색깔에 이르기까지 다양하다.)
- (3) 위의 구성요소들에 혼입되어 있는 공기

연소개스와 혼입공기를 제외하고 협의적(狹義的)으로 볼 때 연기는 매우 작은 고체입자와 입자상체의 응축물로 구성되어 있다. 목재와 같은 일반 가연물이 탈 때 생기는 연소개스는 수증기, 탄산가스, 일산화탄소등을 포함하고 있지만, 불충분한 산소공급에 의해 통상 불완전한 연소가 동반되기 때문에 메탄(Methane), 메탄올(Methanol), 포름알데히드(Formaldehyde), 개미산(Formic Acid), 식초산(Acetic Acid)등도 생성된다. 이들 성분이 대량 발생되면서 응축되어 액상(液相)의 작은 입자 즉 타르(Tar)를 형성한다. 이 타르가 많이 분해하여 탄소입자도 생성된다. 탄소입자는 타르의 과정을 거치지 않고 가연물의 직접분해에 의해서도 다량 형성된다. 우리가 대부분의 연기를 눈으로 볼 수 있는 것은 이와 같은 탄소 및 타르 입자들 때문이다. 특수한 경우로서 연기가 전혀 눈에 보이지 아니하는 경우도 있으나 대개는 연소시 연기가 발생됨으로써 화염의 경우처럼 불타는 사실을 인지할 수 있게 된다. 연기의 발생량과 조성은 가연물의 종류, 연소속도, 가연물표면에서의 산소농도, 연소개스의 농도 및 주위의 온도등에 따라 달라진다. 연소개스가 열 및 독성으로 인체에 해를 끼치는 것과 마찬가지로 연기의 입자도 인체에 유해하다. 연기입자의 색, 크기 및 양에 따라 빛의 통과를 막아 건물내의 출구 또는 출입

구표시를 볼 수 없게 한다. 출입구를 찾지 못할 정도의 양으로 발전하는 데는 그다지 긴 시간을 요하지 않는다.

연기입자를 호흡하면 신체의 호흡기계통이 피해를 입는다. 입자가 눈에 들어가면 눈물을 흘리게 되고 시야가 흐려진다. 또한 입자에 수증기, 산(酸), 알데히드(Aldehyde)등이 응축하여 체내로 들어가면 심한 독성을 나타낸다. 화재전문가들 사이에는, 연소개스속에 포함되어 있는 연기성분이 화재시 인명피해의 가장 큰 원인으로 화재사망자의 약 50~75% 정도가 이 때문인 것으로 추정하는 사람들이 많다.

연소와 연소개스(총칭하여 광의적인 연기)는 화재시 소화활동은 물론 인명 및 재산의 보호라는 관점에서 매우 중요하다. 건물화재시 연기의 발생은 가연물의 종류, 양 및 환기조건등에 따라 매우 다양하다. 때에 따라서는 연기가 대단히 많이 발생하여 건물의 내부는 물론 주위의 거리에 까지 연기가 퍼져 건물을 볼 수 없는 경우도 있고, 어떤 경우에는 연기의 발생이 아주 적을 때도 있다. 그러나 연기의 발생이 적다고 하여 인명에 위협하지 않는 것은 아니다. 왜냐하면 인체에 해로운 다른 연소생성물이 얼마든지 발생할 수 있기 때문이다.

화재시 건물로부터 열과 연기를 어떻게 배출시켜야 할 것인가는 매우 중요한 과제이다. 이를 위하여 건물의 지붕이나 벽에 개구부를 뚫어 연기의 자연배출을 도모할 수도 있고 별도로 전용의 기계적 설비를 갖추어 강제로 배연을 하거나 기타 송풍기등을 이용할 수도 있다.

연기의 이동은 연기성분을 자신의 물리적 성질에 의하기 보다 혼입된 공기의 이동에 의해 이루어진다. 실제로 연기가 차지하는 공간의 대부분은 혼입된 공기가 차지한다. 건물내에서 환기로 인한 연기의 이동은 일반공기의 경우처럼 온도와 압력에 영향을 받는다. 건물에서의 연기이동은 온도의 상승에 따라 형성되는 압력, 굴뚝효과(Stack Effect), 외부로부터 건물에 미치는 풍압, 벽 또는 바닥으로 인한 장벽, 그리고 환기방법등 여러가지 요인에 영향을 받기 때문에 대단히 복잡하다. 연기이동에 관한 복잡한 문제들을 해결하기 위해 근래에 해

외에서는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 제연(制煙, Smoke Control)을 위한 과학적이고 실용적인 방법이 최근에는 비교적 만족스러운 정도로 많이 정립되고 있다. 제연에 관한 논의는 향후 별도로 다루게 될 것이다.

5. 열과 그 특성

5-1. 화재로부터의 열의 방출

화재시 발생하는 막대한 열은 소방대원의 진압 활동에는 물론, 건축물의 소방계획수립에 있어 고려해야 할 중요한 과제의 하나이다. 화재현장에서 진압활동의 경우를 생각해보자.

소방대원이 화재현장에서 진압에 임할 때는 그 화재로부터 막대한 열의 방출이 일어나는 주요인이 무엇인지 순간적으로 판단내릴 수 있는 준비 자세가 되어 있어야 한다. 그 요인들에 대한 판단은 언제나 다음과 같은 의문점을 상기함과 더불어 시작될 것이다.

첫째, 어떤 물질 또는 물건이 타고 있는가?

둘째, 그것은 어느 정도로 뜨거운가?

셋째, 연소중인 것 외에도 가연물은 무엇이 있으며, 어떤 가연물이 타기 시작할 것으로 보이는가?

첫번째의 의문을 해결하는 데에 필요한 것은 모든 가연물의 연소화학에 관계되는 지식이라 할 수 있다.

잘 타는 물질들은 대개 그 속에 정도의 차이는 있을지언정 탄소와 수소의 성분을 함유하고 있으며, 이 두가지 성분이 연소의 과정에서 대량의 열을 방출한다. 우리가 일상적으로 볼 수 있는 대부분의 가연성 고체, 액체 또는 기체에 이 성분들이 포함되어 있는데, 특히 이들 가연물중에는 자연계에서 생물의 유기반응과정에서 형성된 유기물질들이 많다. 목재, 종이, 그리고 면사류와 같은 섬유 물질들은 전형적으로 탄소-수소 성분을 가진 가연물이며, 이들속에는 분자구조내에 산소도 함유되어 있다. 석유계통의 전형적인 탄화수소로서는 휘발유, 등유와 같은 인화성의 액체와, 천연가스 또는 메탄과 같은 인화성의 기체를 들 수 있다. 일반적으로 이와 같은 유기질의 가연물들이 서로

비슷한 탄소-수소함량을 갖고 있으면 연소시 방출되는 열량 역시 대체로 비슷하다. 그러나 열의 방출율은 연소의 속도와 관계되므로, 결국 같은 시간에 얼마나 많은 가연물질(가연성분)이 기체 상태로 전환될 수 있는가에 좌우된다. 왜냐하면 산화제는 기체상태로 존재하고 있는 공기중의 산소이므로 연료 역시 기체상태일 때 가장 신속한 연소가 일어날 것이기 때문이다. 인화성 액체는 열에 의해 쉽게 증발됨으로써 가연성의 증가-공기혼합물이 신속, 용이하게 형성된다. 고체가연물은 가연물의 기화학적 형태에 따라 연소속도가 크게 달라질 수 있다. 예컨대 나무의 대패밥은 비표면적(比表面積, 질량에 대한 표면적의 크기)이 커서 보다 많은 열을 전달받을 수 있기 때문에, 기체화된 다량의 가연성 성분과 공기와의 혼합물이 쉽게 형성될 수 있어 타는 속도가 매우 빠르다. 반면에 이와 마찬가지로의 이유로 통나무의 연소속도는 보다 늦어지고 열의 방출율도 크지 않다.

두번째의 의문은 화열의 상태에 관한 것으로서 온도개념이 포함되는 문제이다. 온도는 물질이 가열된 정도를 나타내는 척도이다. 열과 온도는 서로 혼동되지 말아야 한다. 열은 에너지의 한 형태이지만 온도는 에너지가 아니다. 온도는 물에 대한 가열강도의 척도이다. 비유적으로 설명하면 열과 온도의 관계는 위치에너지와 높이와의 관계와 유사하다. 일정한 질량을 가진 물체의 위치에너지의 크기는 높이에 비례하지만 높이 그 자체는 위치에너지가 아니라 위치에너지의 척도가 될 수 있다. 소방대원은 연기의 모습과 양을 보거나, 연소시 생성되는 가스의 냄새를 맡거나, 그 밖의 여러가지 상황을 시각적으로 또는 촉감에 의해서 화열의 온도를 감각적으로 짐작할 수 있는데, 이때의 온도감각이 곧 열방출의 정도를 판단하게 할 수 있는 대체적인 척도가 될 수 있다. 화재경험이 풍부한 소방대원은 감각적으로 느껴지는 온도의 정도에 따라 화재상황의 변화가능성을 순간순간 예측하여 적용한 진압활동을 전개한다. 지나친 고온의 감지는 아직 타지 아니한 가연물이 재빨리 발화점에 도달하여 탈 수 있다는 것을 예측케해주는 것이므로, 무엇이 보다 신속한 냉각처리

를 필요로 하는지 판단할 수 있게 한다. 탄소-수소성분의 일반가연물은 연소시 대개 1100 °F~1800 °F(593°C~982°C)의 온도를 보여줄 수 있는 반면, 발화점은 단지 350 °F~1000 °F(177°C~538°C) 정도가 보통이다. 세번째의 의문은 가연물의 물리적, 화학적 성질에 대한 지식과 관계되는 문제이다. 이에 대한 지식이 있으면, 아직 연소되지 않은 가연물이 있달아 발화함으로써 열방출이 증가하는 것을 막을 수 있도록 즉각적이고 적절한 대응조치가 가능해진다. 이러한 대응조치로서는 통상적으로 기체가연물을 제외한 일반가연물에 있어서는 물에 의한(인화성의 액체에 대해서는 포말을 사용하는 것이 바람직한 경우가 많지만) 냉각작용이 열방출을 억제하는 가장 효과적인 수단이 된다.

화재시의 열방출에 대한 지식과 열에 대한 처리는 지금까지 설명한 바와 같이 소방활동상 반드시 필요한 요건일 뿐 아니라, 각종 공정들을 포함하는 많은 공업시설물 및 일반건축물에 있어 예방에서 진압에 이르기까지의 모든 방재계획의 수립에는 이들에 대한 구조계획에서부터 열에 대한 대책이 강구되어야만 한다는 점에서 더욱 중요한 의미를 갖는다. 그러므로 열의 본질적인 성질과 물질의 열특성 등에 대해 다소 알아둘 필요가 있다.

5-2. 열의 측정

어떤 물체의 온도는 그 물체로 열이 전달될 것인지 혹은 그 반대가 될 것인지를 결정할 수 있는 상태조건을 말한다. 힘과 마찬가지로 온도 역시 물리학에서 극히 중요한 개념의 하나로서 우리의 감각작용을 통해서 차갑고 뜨거움을 느껴 그 뜻은 잘 알고 있지만 정확한 차이를 엄밀히 정의한다는 것은 대단히 어렵다. 따라서 온도란 일단 차고 더운 감각의 정도라고만 생각해두자.

• 온도의 단위

온도를 결정하는 방법으로 일반적으로 널리 사용하는 것으로는 섭씨온도(Celsius Degree 또는 Centigrade Degree)와 화씨온도(Fahrenheit Degree)가 있으며, 열역학에서는 주로 켈빈(Kelvin) 온

도나 란킨(Rankine)온도가 사용되는 일이 많다. 이 네가지 온도단위의 정의와 상호관계를 알아 보자

섭씨온도는 1기압하에서 얼음의 용해점(또는 빙점)을 0℃, 비점을 100℃로 정하여 그 사이를 100등분한 것을 1℃의 크기로 정한 것이고, 화씨온도는 얼음의 용해점을 32°F, 물의 비점을 212°F로 정하여 그 사이를 180등분한 것이다. 섭씨온도와 화씨온도의 크기를 각각 C와 F라고 하면 이들 간에는

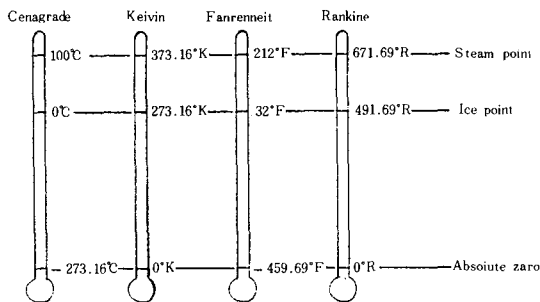
$$F = \frac{9}{5}C + 32$$

$$C = \frac{5}{9}(F - 32)$$

의 관계가 있다.

켈빈온도는 온도차만을 말할 때는 섭씨와 같으나 온도를 표시할 때는 약 -273.16℃를 0°K로 나타낸다. -273.16℃ 즉 0°K는 절대영도라고 부르며 자연계에서 그 이하의 온도는 존재할 수 없다.

란킨온도는 온도차만을 말할 때 화씨와 같으나, 온도를 말할 때는 0°R로 나타내는데, 절대영도인 0°R은 약 -459.69°F가 된다. 그러므로 켈빈온도와 섭씨와의 관계, 그리고 란킨온도와 화씨와의 관계는 각각 K(켈빈온도)=C+273.16 및 R(란킨온도)=F+459.69의 식으로 표현될 수 있다. 섭씨 및 화씨온도의 정의에서 볼 때, 켈빈온도와 란킨온도에 있어 이 둘의 온도차의 크기는 R=K×1.8 또는 K=R/1.8의 관계가 있다.



(그림) 온도단위의 눈금관계

위에서 설명한 네가지 온도의 관계를 눈금으로 나타내면 아래의 그림과 같다.

•온도의 측정

온도를 측정하는 기구는 대체로 고체, 액체, 기체의 팽창과 같은 물리적 변화, 상(相, Phase)의 변화, 또는 전기적 에너지나 파동의 강도변화와 같은 에너지의 변화를 주로 이용한다. 일상적으로 가장 많이 사용되는 온도계는 수은 또는 알콜온도계와 같은 액체팽창온도계이다. 수은 또는 알콜온도계는 온도에 따른 이들의 팽창 및 수축성질을 이용한 것으로서 한쪽 끝이 막힌 모세관에 수은 또는 알콜을 넣어 온도가 올라감에 따라 이들이 팽창하여 팽창한 차이만큼 액체가 모세관을 따라 올라가게 된다. 이 때 모세관내의 액체의 높이가 온도를 나타내도록 되어 있다. 수은은 -40℃에서 얼고 360℃이상에서는 그 증기압이 너무 크므로 수은온도계는 이 온도의 범위내에서만 비교적 정확하게 쓸 수 있으며, 낮은 온도를 측정하려면 -130℃와 -200℃에서 어는 알콜이나 펜탄(Pentane)의 액체를 사용한 온도계가 적합하다.

고체의 열팽창성질을 활용한 것으로는 바이메탈온도계가 있는데, 이것은 열팽창계수가 서로 다른 두 종류의 금속을 접합시켜서 온도에 따른 팽창의 차이로 굴곡이 생기는 것을 이용한 것이다. 열에 대한 고체의 성질을 활용한 것으로는 고체물질의 용융점을 이용해서 측정하고자 하는 온도가 그 고체의 용융점보다 높은지 또는 낮은지를 알아내는, 이른 바 고체용융법도 있다.

열에 의한 에너지의 변화중 전기적 에너지의 변화를 이용한 것으로 열전대(Thermocouple)온도계가 있다. 그것은 두 종류의 금속선의 양단을 접합하여 만들 때 접합점의 온도가 다르면 회로에 기전력이 생겨 전류가 흐르게 되는 성질을 이용한 것이다. 이러한 성질을 보여주는 장치를 열전대(熱電帶)라고 부르며, 이 열전대의 기전력은 두 접합점의 온도차에 관계되므로 열전대의 한 끝은 온도를 측정하려는 물체에 연결하고, 다른 한 끝은 일정한 온도로 하여 기전력을 측정함으로써 온도를 알 수 있다.

그 밖에 전기저항의 변화를 이용한 저항온도계

도 있다. 저항온도계는 금속의 전기저항이 온도의 상승에 따라 증가하는 현상을 이용한 것이다. 이온도계는 운모판(雲母板)에 가는 철사(보통 백금)를 감고 이것을 은(銀)으로 된 얇은 보호관내에 넣어서 만든 것이며, 적당한 장소에 저항을 측정

하는 장치를 하여 동선(銅線)으로 연결하여 측정한다. 저항은 대단히 정밀하게 측정가능하므로 저항온도계는 가장 정밀한 온도측정장치의 하나로서 보통 0.001℃의 온도범위까지 측정할 수 있다. 백금저항온도계는 약 -250℃로부터 백금이 녹는 온도인 1760℃까지 측정된다.