

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.

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.

• 열량의 단위

열은 에너지의 일종으로서 열이 어떤 물체에

*編輯理事, 利光엔지니어링代表, 消防技術士.

공급되면 그 물체의 온도를 올리고 물체에서 방출되면 온도를 내리게 하는 효과가 있음을 우리는 알고 있다. 따라서 열에너지를 측정하기 위한 열의 양과 단위는 물체의 온도변화를 일으키는 데에 필요한 열을 정량적인 기준으로 개념화함으로써 결정할 수 있을 것이다. 그러나 동일한 온도상승에 필요한 열량이라도 물질의 종류에 따라 다를 뿐 아니라, 같은 양의 동일물질에 열을 가하여 같은 온도차로 상승시킬 때도 소요열량은 그 물질이 갖는 그 때의 온도에 따라 다소 달라진다. 그러므로 순수한 물 1kg의 온도를 14.5℃로부터 15.5℃까지 1℃ 높이는 데에 필요한 열량을 열의 표준단위량으로 정의하여 사용하고 있으며 이 열량을 1킬로칼로리(KILOCALORIE, 줄여서 kcal 또는 Cal라고 쓴다.)라고 부른다. 즉 편의에 따라 1kcal의 1/1000에 해당하는 열량을 1cal라고 하여 실제에 사용하는 일도 많다. 1cal는 물 1kg의 1/1000에 해당하는 양 즉 1gr의 물을 14.5℃로부터 15.5℃까지 1℃ 높이는 데에 필요한 열량이 된다. 그런데 영미(英美) 지역에서는 오랜 관습으로 인해 열량의 단위를 그들의 전통적 단위인 이른바 영미식열단위(BRITISH THERMAL UNIT)에 따라 대부분 사용하고 있다. 영미식단위에 따르면 표준 단위열량은 1Btu이다. 1Btu는 질량 1파운드(lb)의 순수한 물을 60°F에서 1°F 올릴 때 소요되는 열량이라고 관습적으로 정의된다. 1lb는 약453.6gr이고, 1°F의 온도차는 1/1.8℃의 온도차와 같으므로 1Btu는 252cal와 같은 열량이 된다. 그러나 이러한 열량의 단위는 학자들과 기술인들 사이에 지금까지도 관습적으로 사용되어온 물리적 단위이다. 엄격히

말하면 1948년에 있었던 제9차 세계도량형회의에서 Joule을 열의 단위로 사용하기로 결의함으로써 cal 또는 Btu는 Joule과의 상당관계에서 정의되게 되었다. Joule은 일의 단위이며 일과 에너지의 단위는 동일하다. 열 또한 에너지의 한 형태로서, 열에너지가 기계적 일을 행하였다고 가정할 때, 열에 의해 행해진 일의 양과 단위를 그대로 열에너지의 양과 단위로 사용도록 한 것이다. 따라서 종래의 관습에서 사용되어온 1cal는 4.1840Joule로 정의된다. 그러나 종래의 관습적인 단위열량은 에너지단위에 입각한 국제표준단위 (INTERNATIONAL SYSTEM OF UNITS, 줄여서 「SI 단위」라고 부른다)로부터 산출된 등가열량과 거의 같은 값을 가지므로 관습대로 종전 개념의 열량을 그대로 사용하여도 좋을 것이다.

여기서 SI단위란 무엇인지 잠깐 간단히 살펴보기로 하자.

SI단위란 물리적 기본량과 그 단위를 정하는데 있어 이런 바 「미터법」에 그 바탕을 두고 있는 단위이다. 즉, MKS단위에 바탕을 두고 있다. 길이의 단위로서 「미터(METER)」, 질량의 단위로서 「kg」, 시간의 단위로서 「초(SECOND)」를 사용한 모든 물리적 양과 단위가 SI단위이다. 하나의 예로서 MKS단위의 개념에 따라 힘과 압력의 단위를 생각해 볼 때 힘의 SI단위는 「뉴턴(NEWTON, 줄여서 N으로 나타낸다)」이며, 압력의 단위는 N/m^2 이다. 「뉴-톤」은 $kg \cdot m/sec^2$ 이란 힘의 단위를 편의상 약칭한 것이며, 따라서 압력의 단위인 N/m^2 은 $kg \cdot m/sec^2/m^2$ 과 같다. N/m^2 또한 통상적으로 편의상 「파스칼(PASCAL, 약칭하여 Pa라고 나타낸다)」이라고 부르고, 100KPa을 1바-(Bar, 줄여서 B)라고 한다.

우리가 기상학에서 사용하는 「밀리바(MILLI-BAR, 줄여서 mB)」는 Bar단위에 해당하는 압력의 1/1000로서, 예컨대 1mB는 1/1000 Bar와 같다. 그런데 우리는 통상적인 kg/cm^2 을 압력의 단위로 사용하고 있는데 이것은 결코 SI단위가 아니다. 이 단위는 일본을 비롯하여 일본의 영향을 크게 받은 우리나라등 일부 동양권에서 많이 사용되고 있다. kg/cm^2 은 $kg중/cm^2$ 을 편의상 줄여서 표기한 것이다. 따라서 표준중력가속도를

$9.8m/sec^2$ 이라고 가정하면 $1kg/cm^2$ 와 SI단위량과의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} 1kg/cm^2 &= 1kg중/cm^2 = (1kg \times 9.8m/sec^2) / cm^2 \\ &= (1kg \times 9.8m/sec^2) / [(1/100)m]^2 \\ &= 98,000kg \cdot m/sec^2 / m^2 = 98,000N/m^2 \\ &= 98,000Pa = 98KPa = 0.98 Bar = 980mB \end{aligned}$$

그런데 0.98Bar는 거의 1Bar에 가깝다. 그 때문에 kg/cm^2 라는 압력단위가 마치 SI단위와 같은 것으로 생각하는 경우가 흔한데, 결코 SI단위는 아니므로 절대로 혼동하지 말아야 할 것이다.

5-3. 물질의 열특성

• 연소열(HEAT OF COMBUSTION)

연소할 수 있는 모든 물질은 산화의 과정에서 열을 발생한다. 그러나 발생하는 열량은 물질에 따라 같지 않다. 연소열이란 가연물의 단위량을 완전연소시켰을 때 발생하는 열의 양으로 정의되는데 그 양은 열량계로 측정함으로써 얻을 수 있다.

다음 표는 몇가지 가연성 물질의 연소열을 나타내고 있는데 물질에 따라 연소열이 차이가 있음을 알 수 있다. 그런데 실제 화재에 있어서는 수많은 가변적 요인이 작용함으로써 연소물질의 열방출에 크게 영향을 주기 때문에, 연료속에 연

표. 가연물의 연소열

가 연 물	연소열 (Kcal/kg)
에틸알콜	7,111
알루미늄	7,389
벤젠	10,016
탄소	7,488
목탄	7,178
석탄	7,222
코크스	8,778
휘발유	11,167
헵탄(HEPTANE)	11,476
윤활유	11,333
신문지	4,379
파라핀 왁스	11,167
인(燐)	5,878
넝마(면직유)	3,981
소나무껍질	5,276
참나무	3,987

소열이 큰 가연성분이 존재한다고 해서 반드시 열방출이 크게 되는 것만은 아니며 연소열이 낮은 성분의 가연물이라도 연소시 막대한 열의 방출을 보여주는 일도 많다. 화재시 가연물의 열방출상태는 주로 다음과 같은 요인에 의해 좌우된다.

- (1) 열 및 산소와의 접촉면적, 예컨대 가연물의 분할 또는 배열상태등(주로 고체가연물의 경우)
- (2) 액체의 자유화산면적 즉 액체의 자유표면적(인화성 액체의 경우)
- (3) 액체의 증기압(인화성 액체의 경우)
- (4) 가연물의 열전도도(고체가연물의 경우)

• 비열(SPECIFIC HEAT)

같은 질량의 물질들을 같은 온도만큼 올리는데 요하는 열량은 물질에 따라 다르다. 그것은 물질마다 열에너지의 흡수능력이 같지 않기 때문이다. 이와 같이 물질에 따라 고유한 흡열능력을 그 물질의 비열이라고 부른다.

비열을 정량적으로 나타내기 위하여 물질의 질량을 단위온도만큼 상승시키는데 필요한 열량이라고 정의한다. 비열은 일반적으로 cal/gr·°C, kcal/kg·°C 또는 Btu/lb·°F의 단위로 나타낸다.

표. 물질의 비열

물질의 종류	비열 (cal/gr·°C)
물	1.000
아세톤	0.528
공기	0.240
알루미늄	0.217
부탄 (LPG)	0.549
탄소 (목탄)	0.165
사염화탄소	0.201
구리 (銅)	0.091
유리	0.161
철 (鐵)	0.113
금 (金)	0.031
윤활유	0.510
수은	0.033
파라핀 왁스	0.700
주석	0.054
나무	0.420

물질에 따라 비열은 크게 차이가 난다. 물 이외의 모든 물질은 비열이 대체로 1보다 작다. 비열은 어떤 물체를 위험온도까지 올리는데 필요한 열량, 또는 고온의 물체를 안전한 온도로 냉각시키는 데에 제거하여야 할 열량등을 나타내는 비교척도가 되므로 중요하다. 물이 소화제(消火劑)로서 효과가 있는 이유중의 하나가 그 비열이 다른 물질보다 크다는 점이다. 다음 표에는 몇가지 물질들의 비열이 예시되어 있다.

• 잠열(LATENT HEAT)

물질이 고체에서 액체로, 또는 액체에서 기체로 변할 때는 열을 흡수하며, 반면에 액체에서 고체로 또는 기체에서 액체로 변할 때는 열이 방출된다. 이와 같이 물질의 상(相)이 변화하기 위해서는 열의 출입이 필요한데 그 중에서도 고상(固相) 및 액상(液相), 또는 액상 및 기상 간에 흡열이 동반되는 상의 변화가 일어날 때 흡수되는 열을 그 물질의 잠열(潛熱)이라고 하며, 보다 구체적으로, 고체가 녹아서 액체가 될 때 흡수되는 열을 용해열, 용해잠열 또는 용융열, 용융잠열이라 하고, 액체가 기체로 변할 때 흡수되는 열을 기화열 또는 증발열 또는 증발잠열이라고 한다.

이와 같은 물리적 양들을 정량적으로 나타내기 위하여, 용해열은 단위량의 고체가 1기압하의 용점(MELTING POINT) 또는 빙점에서 액체로 변할 때 흡수되는 열량으로, 각각 정의된다. 음료수에 얼음을 댔을 때 시원하게 되는 것은 얼음의 용융열과 관계되는 현상이다.

다음의 표들은 몇가지 물질들의 용해열과 증발잠열을 각각 보여주고 있다.

물의 증발잠열이 큰 것은 그만큼 열의 흡수능력이 크다는 것을 뜻하기 때문에 물이 좋은 소화제가 될 수 있는 가장 큰 이유가 된다. 0°C의 물 1gr이 100°C의 수증기가 되기까지에는 약 719 cal의 열량을 요한다. 대개의 물질은 그 잠열이 물보다 작다.

• 열전도율(THERMAL CONDUCTIVITY)

화재시 물질에 대한 화열의 영향과 효과를 생

표. 물질의 용융열

물질의 종류	용융열 (cal/gr)
물 (얼음)	79.7
아세톤	23.4
벤젠	30.1
이산화탄소	45.3
사염화탄소	4.16
에틸알콜	24.9
납(鉛)	5.42
수은	2.77
파라핀 왁스	35.0
주석	14.0

표. 물질의 증발잠열

물질의 종류	증발잠열 (cal/gr)
물	539.6
아세톤	124.5
에틸알콜	204.0
벤젠	94.3
사염화탄소	46.4
N-옥탄(개솔린)	70.9
납(액체상태의 것)	222.6
액화질소	47.8
액화프로판(LPG)	98.0

각해 불때, 불꽃의 전파와 직접적인 관련을 갖는 물질의 열특성으로서 중요한 것은 물질의 열전도성이다.

열원(熱源)에 의해 물질이 가열되면 열은 가열지점으로부터 그 물질 내부의 모든 방향으로 전달된다. 그러나 물질을 경유하여 같은 시간에 전달되는 열의 양은 물질마다 다르기 때문에 물질의 온도를 발화점에 도달하게 하는데에 요하는 열량 역시 물질에 따라 같지 않다. 물질의 열전도성을 논하는 것인 반대의 측면에서 불 때 물질의 단열성을 논하는 문제와 상통된다. 엄밀히 말하면 실제로 열전도에 대한 완전단열이란 불가능하다.

다른 물질에 비해 어떤 물질이 단열성이 좋다는 것은 상대적으로 그 물질의 열전도성이 보다 적다는 것은 뜻한다. 단열효과가 좋은 물질을 관습적으로 단열재라고 부르고 있지만 관습을 무

시하면 사실상 지연재(遲熱材)라고 하는 것이 보다 정확한 의미를 주는 말일런지도 모른다. 단열재란 열을 차단시켜주는 능력을 가진 것이 아니라 열의 전도를 지연시켜주는 물질인 것이다.

물질의 열전도특성을 정량적으로 나타내기 위하여, 물질의 단위두께에 대해서 그 양단의 단위 온도차에 의해 단위시간동안 양단간에 이동되는 열의 양을 그 물질의 열전도율이라고 정의한다. 물질들 상호간의 열전도특성에 대한 비교는 이들의 열전도율을 직접 비교함으로써 가능해진다. 다음 표는 주요 건축재료의 열전도율을 보여주고 있는데, 이 표에서 볼 때 건축재료중 금속성의 것과 그외의 것 사이에는 열전도율에 엄청난 차이가 있음을 알 수 있다.

표. 주요 건축재료의 열전도율

건축재료	열전도율 (cal/sec/cm/°C)
알루미늄	0.50
벽돌	1.70×10^{-3}
목탄	0.21×10^{-3}
콘크리트	4.10×10^{-3}
동(銅)	0.91
코르크보드 (CORKBOARD)	0.10×10^{-3}
화이버보드 (FIBERBOARD)	0.14×10^{-3}
유리	2.30×10^{-3}
철재(鐵材)	0.15
대리석	6.20×10^{-3}
광물섬유(암면)	0.10×10^{-3}
종이	0.30×10^{-3}
석고	1.70×10^{-3}
합성수지류	0.45×10^{-3}
질석(蛭石)	0.14×10^{-3}
목재(참나무)	0.41×10^{-3}
목재(소나무)	0.29×10^{-3}

건축물의 콘크리트 구조물내에 들어있는 철근이나 금속지지물이 화재시 심하게 열을 받을 경우 금속의 큰 열전도율 때문에 구조물의 다른 부분으로 열이 신속히 전달됨으로써 화재의 확대요인이 될 수도 있다.

오늘날의 현대식 건물에서 반자용 재료로

많이 사용되는 석고나 광물섬유의 건축자재들은 상당히 낮은 열전도율을 갖고 있기 때문에 화재시 반자의 붕괴나 화재의 장시간 지속이 일어나지 않는 한 반자와 천정 사이의 공간으로 화열이 심하게 침투하는 일은 비교적 흔치 않다.

● 열팽창(THERMAL EXPANSION)

건축물의 화재문제를 논할 때 물질의 열전도성 외에도 화열의 영향 및 효과와 관련하여 제기되는 또하나의 열특성은 물질의 열팽창이다. 건축자재의 열팽창은 건물의 구조물에 결합을 초래케함으로써 화재로 인한 건물붕괴의 주 인자가 된다. 화재현장에서 소방진압대원이 이 때문에 생명을 잃는 일도 적지 않다.

철재, 벽돌, 콘크리트, 목재와 같은 건축자재와 화염에 노출되어 가열되면 이들은 서로 갖지 않은 비율로 종적, 횡적으로 팽창함으로써 구조물과 상호 견고하게 결합되어 있는 자재들의 표면이 파괴되고 구조물들의 강도와 상호협력이 상실되어 건물의 붕괴가 일어날 수 있다. 물질의 열팽창에 대한 정량적인 비교평가는, 단위길이의 물체의 온도를 단위온도만큼 상승하도록 가열하였을 때 열팽창에 의해 나타나는 길이의 증가분이 얼마나 되는지를 알아봄으로써 가능해지는데 이 증가분을 그 물체의 열에 대한 선팽창계수(COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION)라 부른다. 다음 표는 주요 자재의 선팽창계수를 나타내고 있다. 그러나 이 값들만으로 실제 화재시에 직면하는 물질들의 열팽창특성이 전부 설명될 수 있는 것은 아니다. 예컨대 이 표에서 보면 벽돌, 철재, 콘크리트와 같은 자재들은 대체적으로 열팽창율이 비슷하다. 다시 말하여 이런 자재들은 열에 노출될 때 서로 거의 같은 정도의 팽창을 보여준다. 이런 사실만으로 볼때는, 이와 같은 자재들로 구성된 벽은 화재도중 분리, 이탈되거나 붕괴하는 일이 없이 온전하게 보존될 수 있을 것으로 추측해 볼 수 있을 것이다. 그런데 실제로는 그렇지 않은 현상이 흔치 않게 일어나는데, 철재가 벽돌 및 콘크리트로부터 분리되고 이에 따라 벽돌과 콘크리트의 연결부분이 파손되면서 건물의 골조와

벽사이의 결합력이 상실되는 일이 많다. 그 이유는 이들 자재의 열전도율에서 찾아볼 수 있다. 열전도율에 대한 앞의 표에서 보면 철재와 같은 금속자재와 벽돌 또는 콘크리트와 같은 비금속 자재는 상대적으로 엄청난 차이의 열전도율을 보여준다. 그리고 비금속자재에 있어서도 콘크리트가 벽돌보다 두배이상의 열전도율을 갖고 있다. 열전도율이 크다는 것은 열전달속도가 빠르다는 것을 뜻하며 그것은 곧 열팽창율이 비슷한 물체라도 열전도율이 큰 물체의 팽창속도가 크다는 것을 의미하게 된다. 따라서 화재시 열을 받는 과정에서 콘크리트와 벽돌에 비해 철재가 팽창하는 속도가 대단히 크기때문에 이들간의 접촉이 파괴되는 현상이 일어나게 되는 것이다.

표. 주요 물질의 열팽창계수

물 질	선팽창계수 (°C ⁻¹)
알루미늄	2.50 × 10 ⁻⁴
황동(黃銅)	1.87 × 10 ⁻⁴
벽돌	9.50 × 10 ⁻⁵
콘크리트	(1.00~1.40) × 10 ⁻⁴ 00
동(銅)	1.66 × 10 ⁻⁴
유리	9.20 × 10 ⁻⁵
철재	1.15 × 10 ⁻⁴
석고	(4.00~7.00) × 10 ⁻⁵
목재(참나무)	4.92 × 10 ⁻⁵

콘크리트와 벽돌간에도 비교적 큰 차이의 열전도율 때문에 이와 같은 팽창이 일어날 수 있어서 화열을 받는 과정에서 벽돌간의 시멘트접합부분이 파괴되어 벽의 견고성이 상실될 수 있다.

또 하나의 흥미있는 예는 대규모의 목재지붕틀(TRUSS)을 사용한 실내가 특터진 건물의 경우인데, 목재는 가연물이니까 화재로부터 지붕틀의 손상을 가급적 줄여주기 위해서는 철재지붕틀을 사용하는 것이 보다 바람직할 것 같이 여겨질 수가 있다. 그런데 위의 표를 보면, 같은 화염에 노출되었을 때 철재가 목재보다 거의 두 배이상 팽창하는데다가 열전도율은 물경 360배가 넘는다. 따라서 이런건물에 대해 목재지붕틀을 사용한 경우와 철재지붕틀을 사용한 경우를

비교해 볼 때 화재시 각각의 경우에 대해 다음과 같은 일련의 사태가 일어날 수 있는 가능성을 추측해 볼 수 있다.

목재는 열전도율이 상당히 낮으므로 비교적 천천히 뜨거워지며, 열과 화염에 노출되는 표면에서 연소가 일어난다. 그리하여 그 표면이 검게 탄화되는 현상이 진행되는데 탄화된 부분의 열전도율은 보다 더 낮아서(열전도율에 대한 앞서의 표 참조) 결과적으로 목재의 흡열속도가 더욱 지연된다. 그 때문에 목재지붕들의 전장(全長)

이 각각 횡방향으로 느린 속도로 팽창하게 되어 화재가 장시간 지속되지 않는 한 벽체에 대해 밀어부치는 힘이 별로 작용하지 않는 결과가 된다. 이와는 대조적으로, 철재지붕들은 가열되는 속도가 크기 때문에 열이 그 지붕들의 전체부분에 급속히 전달되어 옥외방향으로 벽체를 밀어주는 힘이 강하게 작용함으로써 벽체의 붕괴가 초래될 수가 있다.

(다음 호에 계속)