

## 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.

### 5 - 4 열의 전달

열의 전달은 불의 시작과 소화에 관계가 크다. 열이 전달되는 것은 전도, 대류, 복사중 어느 한가지 또는 그 이상의 방법으로 이루어진다.

#### ● 전도 (Conduction)

가늘고 긴 금속막대의 한 끝을 불꽃속에 넣으면 불꽃이 닿지 않은 다른 부분에도 열이 전달되어 점점 뜨거워진다. 이와 같은 열의 이동은 전도(伝導)에 의한 것이다.

통상적으로 고체물질속을 경유하여 열에너지의 흐름이 일어나는 현상을 전도라고 말할 수 있는데, 유체(기체 및 액체)의 경우에 있어서도 전도에 의해 열이 전달되는 경우도 있다. 예컨

데 고체와 고체사이에 유체의 얇은 막이 형성되어 있는 경우 또는 배관속을 흐르는 유체에 있어 관의 내벽(内壁)에 인접하여 형성되는 층류(層流, Laminar Flow)와 같은 경우에는 분자들의 선회류(旋回流, Lam Current)가 없기 때문에 이들 막(膜) 또는 층에 의한 열의 전달은 전도에 의해 이루어진다. 다만 완충층(Buffer Layer)에 있어서는 전도와 대류에 의한 열전달이 동시에 일어난다. 결론적으로 일반화하여 표현하면 물질의 열전도는 다음과 같은 두가지 경우의 현상으로 인해 일어난다.

첫째는 물질의 구성분자들이 온도의 상승에 따라 진동이 심해져서 점차로 인접분자들과 충돌하여 그 운동에너지(열에너지는 분자들의 운동에너지로 보존된다)의 일부를 인접분자에게 전달함으로써 열의 이동이 일어나는 경우로서, 일반적으로 비결정체와 비금속고체에서의 열전달이 이에 따른다.

둘째는 분자들 사이의 공간에 자유전자가 존재하는 물질에 있어서 분자 상호간의 충돌(진동에 의한)에 의한 열전달은 물론, 온도의 상승과 더불어 자유전자의 흐름이 일어나면서 이 흐름이 열이동에 동시에 기여하는 경우인데, 일반적으로 결정체 및 고체금속의 열전도는 이 현상에 의한 것이다. 어느 경우에 의한 전도이든 그 물질내의 분자들은 원위치에서 진동한다. 물질의 어느 구간을 통하여 어느 시간동안 전도에 의해 전달되는 열에너지의 양 즉 전도열은 그 구간의 온도차, 그 구간에 있어서의 열전달 경로의 단면적 및 경로의 길이, 열전달시간, 그리고 그 경로가 갖는 고유적인 열전달시간, 그

\*編輯理事, 利光엔지니어링代表, 消防技術士

리고 그 경로가 갖는 고유적인 열전달능력 즉 열전도율과 함수관계가 있다.

열전달경로를 구성하는 물질이 균질성의(Homogeneous) 것이면서 그 경로를 통해 정상열류(Steady-state Flow of Heat)가 일어날 경우, 이 물리적 양들간에는 다음과 같이 비교적 간단한 방정식의 관계가 성립되는데 이것을 「후리어(Fourier)」의 방정식이라고 한다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = -kA \frac{dt}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, Q : 전도열, cal
- θ : 전도시간, sec
- k : 열전도율, cal/sec/cm/°C
- A : 열전달경로의 단면적, cm<sup>2</sup>
- t : 경로 양단간의 온도차, °C
- x : 경로의 길이, cm
- dt/dx : 열전달경로의 온도구배, °C/cm

위의 식에서 dQ/dθ를 경로의 단면적 A로 나누어 얻어진 값을 열유율(Heat Flux)이라고 한다.

즉 열유율을 q라고 하면,

$$q = \frac{dQ}{Ad\theta} \dots\dots\dots (2)$$

(2)식에서 볼 때 열유율이란 열전달경로의 단위면적을 통하여 흐르는 열에너지의 시간적 변화율을 의미한다.

(2) 식과 (1)식을 연관시키면,

$$q = -k \frac{dt}{dx}$$

$$\therefore k = - \frac{q}{dt/dx} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 식에서 볼 때 열전도율이란 그 경로가 가진 단위온도구배당의 열유율을 뜻하게 된다.

그런데 불균질성의(Heterogeneous) 경로를 통한 전도열이나 비정상열류에 의한 전도열등을 구하는 것은 대단히 복잡한 변수가 작용하므로 주로 실험데이터에 의존하여 결정하는 것

이 상례이다.

선회류가 없는 상태의 유체에 있어서도 전도에 의한 열전달이 일어나게 된다는 점은 앞에서 설명하였다. 이와 같은 기체 또는 공기에 있어서 열전도는 압력에 따라 같지 않다. 압력이 매우 낮으면 열전도는 거의 영(零)에 가까우며, 절대진공하에서는 분자가 전혀 존재하지 않기 때문에 분자간의 충돌에 의한 운동에너지의 교환이 일어나지 않아서 열이 전도되지 않는다.

그리고 고체는 기체보다 열이 잘 전달된다. 다시 말하여 고체는 기체보다 좋은 열전도체이다.

대부분의 단열재를 미세한 입자상태 또는 섬유질상태로 함으로써 입자들(또는 섬유질) 사이에 미세한 공간이 형성되도록 한 것은 이 때문이다. 그러나 단열재라고 해서 열의 전도가 완전히 차단될 수 있는 것은 아니다. 가연물과 열원 사이의 열절연물질을 아무리 두껍게 하더라도 충분한 시간의 경과에 따라 열원으로 부터 가연물로 열이 충분히 전달될 수가 있다. 이와 같은 경우 가연물에 전달된 열이 가연물층으로 부터 외부로 발산되어 나가버리는 열보다 많으면 가연물의 온도가 상승하여 발화점에 도달할 수도 있다.

어떤 물질의 특성 가운데에 열전도와 가장 밀접한 관계가 있는 것은 그 물질의 열전도율, 밀도 및 비열이다. 이들을 각각 K, ρ 및 C라고 할 때 ρC는 열전도에서 특히 흥미있는 물리적 양이 된다. ρC는 어떤 물질의 단위체적을 단위 온도 상승시키는데에 필요한 열량이 된다. 즉 단위체적당의 열용량이 된다.

소방공학에서 열전도와 깊은 관계를 가진 또 하나의 물리적 양은 물체의 어느 두께에 대한 시간정수(時間定數, Time Constant)이다. 어떤 물체가 그 물체의 온도보다 높은 온도에 노출되었을 때 노출표면으로부터 깊이가 x 되는 곳의 온도가 상승하기 시작할 때까지의 경과시간을 T에 대한 시간정수 (T)라고 하며 다음과 같은 크기를 갖는다.

$$T = \frac{x\rho C}{K}$$

이 식에서 볼 때 주어진 물질에서의 시간정수

는  $\rho$ 에 비례함을 알 수 있다.

열전도현상이 교량역활을 함으로써 화재가 야기된 경우는 흔히 볼 수 있다. 온돌과열에 의한 주택화재는 하나의 예에 속한다. 온도의 과열과정과 더불어 실내의 가연물이 발화할 때까지의 열전달은 거의 열전도에 의한 것이다. 열전도가 교량역활을 한 화재는 화재발생시까지 상당히 장시간이 경과되는 경우도 흔해서 사전에 발생위험성을 알아차리지 못하는 일이 잦다.

### ● 대류 (Convection)

증기를 포함한 기체류, 안개와 같이 공간에 분산되어 농무상태를 형성하고 있는 응축상태의 미세입자들, 그리고 액체류에 있어서 고온의 분자들(또는 응축입자들)이 한 장소에서 다른 장소로 움직임으로써 열을 이동시키는 것을 대류라고 한다. 가연성의 고체를 포함한 불의 전파요인으로서 대류에 의한 열이동이 대단히 많다. 특히 구조물내의 한정된 공간에서 화재의 전파는 열의 대류전달에 크게 기인한다.

기체 또는 액체가 가열되면 그 분자들의 운동에너지가 증가되고 분자의 병진운동 범위가 커져서 그 분자들이 차지하는 공간이 커진다. 즉 기체(또는 액체)의 체적이 팽창한다. 이것은, 같은 체적의 경우라도 뜨거운 것 속에 존재하는 분자의 수가 차거운 경우의 분자수보다 적어서 결과적으로 뜨거운 기체(또는 액체)가 차거운 것보다 더 가벼워진다는 것을 의미한다(즉 뜨거운 것의 밀도가 작아진다). 그러므로 동일한 체적의 경우라도 뜨거운 것에 미치는 중력이 상대적으로 작아서 그 체적의 기체(또는 액체)가 차거운 것보다 상부의 위치에 오게 되어 열의 이동이 일어나게 된다. 이와 같은 대류현상은 물질의 밀도차로 인해 고온의 이동성 분자들(또는 응축입자들)이 별도의 기계적 도움없이도 중력에 의하여 위치를 변화함으로써 일어난 경우이다. 이 경우의 대류를 자연대류(Natural Convection)라고 부른다. 그러나 송풍기나 펌프를 써서 고온의 물질을 강제로 이동시켜 대류가 일어나게 할 수도 있는데, 이것을 강제대류(Forced Convection)라고 한다. 대규모 건

물의 공조설비들은 대부분 강제대류에 의한 열전달방식을 활용하고 있다. 반면에 난로에 의하여 방안의 공기가 더워지는 현상은 자연대류의 일례로서, 난로에 가까운 공기가 전도에 의하여 더워져서 팽창하여 상승되기 때문에 열을 받는 물질이 이동, 순환하는, 이른바 자연대류에 의해 열이 실내의 공간에 전달되는 것이다.

열대류의 수학적 이론은 대단히 복잡하고 어려워 열전도에서와 같이 간단한 방정식이 드물다. 이것은 접촉하는 면(面)의 종류, 유체가 기체인가 액체인가 또는 유체의 밀도, 점성, 비열, 열전도율등에 관계하기 때문이다.

### ● 복사 (Radiation)

전도와 대류에 의한 열전달에 있어서는 반드시 물질이 열전달매체로 작용하기 때문에 물질의 존재없이는 전도와 대류는 일어나지 않는다. 다시 말하여 절대진공을 통하여 전도와 대류에 의한 열전달은 없다.

그럼에도 불구하고 열에너지는 절대진공상태의 공간을 가로질러 이동할 수가 있을 뿐 아니라 전도 및 대류방법에 의하지 아니하고도 때로는 물질을 통하여 전달될 수가 있는데 그것은 열에너지가 전자파의 한 형태로 이동되는 에너지 전달의 한 유형으로서 그것을 복사라고 부른다. 복사에 의해 전달되는 에너지는 열에너지에만 국한되지는 않지만 열에너지를 가진 물질로부터는 강약의 차이는 있을지언정 반드시 전자파의 한 형태로 열에너지가 복사된다. 복사에너지의 전파속도는 빛의 속도와 같고 물체에 닿으면 흡수, 반사 또는 투과된다. 복사의 예로 촛불을 들 수가 있다. 불꽃에 의하여 가열된 공기는 윗쪽으로 올라가고 찬공기는 옆으로부터 불꽃쪽으로 흘러 들어가 연소를 계속하는데 필요한 산소를 공급한다. 그러나 촛불 가까이 손을 가져가면 흘러 들어가는 공기에 의해 손이 차거워지는 것이 아니고 뜨거운 것을 느낀다. 이는 촛불에서 방출된 열이 복사에 의해 전달된 때문이다.

연소하고 있는 물질이나 고열원에 직접 접촉하지 않고 공간을 격하여 존재하고 있는 가연

성 물질이 그 공간에서의 열전도 또는 대류효과를 극히 미미한 경우에도 발화하기도 하는 현상은 복사에 의한 열전달 때문이다.

전자파중 가시광선(可視光線)의 파장폭은 매우 좁고 거기서 파장이 길어지면 적외선이 되는데 열을 느끼는 것은 적외선에 의한 것이다.

열복사의 양과 성격은 복사체 표면의 온도와 그 표면의 크기에 따라 좌우된다. 온도가 다른 두 물체를 대면시켜 놓으면 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 복사열이 전달되어 두 물체의 온도가 같아지게 된다. 이 복사열을 흡수하는 능력은 복사열을 받는 물체의 표면의 종류와 복사열을 방출하는 물체의 표면적에 따라 달라진다. 만약 흡수하는 쪽의 표면이 어두운 색이면 열을 많이 흡수하고 밝은 색이나 광택이 있으면 열의 대부분을 반사해버린다. 어떤 물질은 투명하여 복사열이 투과해버리고 적은 양의 열만이 흡수된다.

복사에너지를 반사를 이용하는 것으로는 항공기화재의 진압대원들이 착용하는 방화복이 있는데, 표면이 매끄러운 금속으로 피복된 섬유를 사용하여 복사열로부터 진압요원을 보호할 수 있게 되어 있다.

복사에너지는 전자파의 한 형태이므로 빛과 마찬가지로 직진하는 성질을 갖고 있다. 뜨거운 점복사원(點輻射源)으로부터 방출된 열은 표면이 큰 복사원으로부터 방출된 열보다 적게 흡수된다.

태양으로부터 오는 복사열은 진공상태의 공간을 아무런 손실없이 진행한다. 그래서 지상의 물체에 닿아 흡수된다. 복사열은 분자구조가 대칭인 기체, 예를 들면 수소, 산소, 질소 등의 기체속을 통과할 때는 손실이 없다. 그러므로 공기중을 통과할 때는 수증기, 탄산가스, 아황산가스, 탄화수소와 같은 비대칭성 구조의 분자들, 그리고 기타 오염물질(연기등)에 의한 것 외에는 손실없이 진행한다. 그러나 이들 오염물질들이 공기중에서 차지하는 농도는 매우 낮으므로 이것에 의해 흡수되는 열은 무시할 수 있을 정도이다. 그러나 대기중에서 수증기와 탄산가스의 농도가 매우 커지면 복사열의 흡수량

은 무시 못할 정도로 현저히 증가한다. 습도가 높은 날의 삼림화재(森林火災)나 대형의 액화천연가스(LNG) 화재가 습도가 낮은 날에 비하여 상대적으로 위험성이 보다 덜한 것은 이런 이유 때문이다.

분무상태의 미세한 물방울들은 복사열을 거의 대부분 흡수할 수 있기 때문에 물분무를 사용한 복사열의 차단은 매우 효과적인 방법이 될 수 있다. 대형의 화재에서 대량의 복사열이 발생되면 호스를 사용하여 방수함으로써 열을 제거하지 않으면 주위의 가연물로 불이 급속히 확대될 것인데, 이 때 분무노즐을 사용하여 방수하면 열복사를 차단하는 데에 탁월한 효과를 얻을 수 있다. 물분무는 복사열의 차단 및 흡수뿐 아니라 표면에서 반사하는 효과도 있어 복사열을 주위의 공간으로 분산시켜 열에너지를 희석시켜 주기도 한다.

복사체로부터 방사되는 복사열은 복사체의 단위표면적당 방사열로 정의하여 정량적으로 파악하게 되는데, 그 양은 복사표면의 절대온도의 4승에 비례한다. 이것을 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzman)의 법칙이라고 하며 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$q = \epsilon \sigma T^4$$

여기서, q : 복사체의 단위표면적으로 부터 단위시간당 방사되는 복사에너지 (Watts/cm<sup>2</sup>)

ε : 보정계수(적외선 파장범위에서 비금속물질의 경우에는 거의 1에 가까운 값이므로 무시될 수 있다)

σ : 스테판-볼츠만 상수 (≅ 5.67 × 10<sup>-8</sup> Watts/cm<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>)

T : 절대온도(°K)

지금까지 진행되어온 본 강좌의 내용속에서 심심치 않게 등장한 증발, 증기압, 기체비중등과 같은 물리적 현상들이 별다른 설명없이 사용되어 왔다. 차제에 이들의 의미에 대해 짚고 넘어갈 필요가 있을 것으로 생각되므로 이에 대

해 살펴보고 추후의 과정을 계속 진행하기로 한다.

### ● 증발, 증기압 및 비점

기체, 액체 및 고체의 상태를 물질의 3태(三態)라고 한다. 물질의 3태가 결정되는 것은 물질을 구성하고 있는 분자들의 운동과 이들 상호간의 인력등이 직접 관련되는 데에 연유한다. 그리고 분자들에 가해진 열에너지는 이들의 운동과 관계되는 여러가지 역학적에너지의 형태로 전환된다. 현실적으로 모든 물질은 온도를 가지고 있다. 그것은 물질이 열에너지를 보존하고 있음을 뜻하는데, 다만 보존되는 열에너지는 물질속에서 열 그 자체로서 보존되고 있는 것이 아니라 구성분자들의 역학적에너지로 보존되고 있으며, 우리가 뜨거운 물질로부터 열을 감지하는 것은 이들의 역학적에너지가 다시 열에너지로 전환되어 전달되는 것에 의한 것이다. 따라서 물질의 온도가 상승하였다는 것과 분자들의 역학에너지가 커졌다는 것은 동일한 의미를 갖는다. 역학적에너지를 보존하고 있는 분자들의 운동성격은 병진, 진동 및 회전 등이며 그 중에서도 물질의 3태를 좌우하는 주요인자는 병진운동으로 알려져 있다.

그런데 우리는 지구가 만유인력을 갖고 있음을 알고 있다. 그것은 미세한 분자들의 경우에도 마찬가지로 이들 상호간에도 인력이 작용하고 있다. 그러나 분자들의 병진속도가 매우 크게 되면 상호간의 인력을 이겨내고 서로 이탈하여 자유롭게 공간을 돌아다닐 수가 있게 되는데 이 상태가 곧 기체상태인 것이다. 분자들로 부터 열을 빼앗아(온도를 낮추어주어) 이들의 병진운동속도가 크게 감소된 어느 상태에 이르면 분자들은 상호간의 인력을 충분히 이기지 못하고 서로 거리가 가까와지면서 증가하는 인력과 감소하는 이탈력이 평형을 이루는 밀집상태를 보여주게 되는데 이와 같은 밀집상태를 응집(Aggregation)이라고 한다. 분자들이 응집상태로 존재할 때 우리는 액체라고 부르는 것이다. 그러나 분자들이 응집되어 액체상태에 있다고 해서 분자들의 병진운동이 중단되는 것은

아니다. 다만 상호간의 인력과 이탈력이 평형을 이루고 있을 따름이므로 액체속의 분자들 역시 기체와 마찬가지로 끊임없이 무질서하게 운동하고 있다. 뿐 만 아니라 각 분자들의 속도가 모두 같은 것도 아니다. 그러나 정해진 상태조건(온도와 압력등)하에서는 이들의 평균병진운동에너지는 일정하다.

불론 이들의 평균병진운동에너지는 온도의 상승에 따라 커지게 된다. 그러나 그 중에는 평균치보다 크거나 작은것도 섞여 있기 때문에 액체의 자유표면에 도달한 분자들중 평균치보다 큰 에너지의 분자들에는 액체의 자유표면으로부터 분자상호간의 응집력을 이겨내고 이탈하는 것이 있게 된다. 액체의 열을 가해주면 즉 액체의 온도가 상승하면 이와 같은 이탈분자의 수도 따라서 당연히 증가한다. 이와 같이 액체의 자유표면에서 분자가 이탈하는 현상을 증발(Evaporation)이라고 하며 이탈된 분자들을 집합적으로 증기(Vapor)라고 부른다. 자유표면상의 공간이 제한을 받지 않은 개방된 용기에 액체가 담겨져 있을 경우 이탈한 분자들은 멀리 달아나버린다.

반면에 용기가 밀폐된 경우 증발한 분자들중 어떤 것은 용기의 내벽에 충돌, 반사하면서 이 과정에서 병진운동에너지를 일부 상실한채 되돌아와 액체의 자유표면에 충돌하여 다시 응집됨으로써 액체상태로 되는데 이 현상을 응축(Condensation)이라고 한다. 그리하여 증발되는 분자의 수와 응축되는 분자의 수가 같아지는 상태 즉 평형상태에 이르게 되는데 이 상태의 증기 포화증기라 하고 포화증기가 나타내는 압력을 그 액체의 증기압(Vapor Pressure)이라 한다. 동일한 액체에 있어서는 증기압은 액체의 온도와 함수관계가 있다. 즉 액체의 온도가 상승하면 증기압도 따라서 증가한다. 그리하여 온도를 상승시킴에 따라 더불어 증가하는 액체의 증기압이 액체표면에 작용하는 기체(증기 단독이건 타 종류의 혼합기체인건 관계없이)의 전압력(Total Pressure) 이상이 될 경우에는 액체표면하의 분자들중 이들의 평균병진운동에너지보다 큰 값의 분자들이 급증하면서 증발

이 자유표면에 국한하여 일어나지 않고 액체의 내부에서도 진행되어 거품과 같은 증기의 방울들(기체상태의 방울)이 발생하게 되는데 이 현상을 비등(Boiling)이라고 한다. 다시 말하여 비등이 시작되는 것은 액체의 증기압과 액체표면에 작용하는 기체의 전압력이 동일하게 될 때부터이며 이 때의 액체의 온도를 비점(Boiling Point)이라고 한다. 그러므로 액체의 비점은 액체의 종류에 따라 비록 다른 값을 갖지만 동일 액체에 있어서도 액체표면에 작용하는 기체압력(전압력)의 변화에 따라 비점은 달라진다. 따라서 액체의 표면이 대기에 노출되어 있을 경우에는 액체의 증기압이 대기압과 같아질 때부터 그 액체는 비등하기 시작할 것인 바 이 때의 액체온도를 그 액체의 표준비점(Normal Boiling Point)이라고 한다. 통상적으로 표준비점을 그냥 비점이라고 부르는 일이 많다. 대체로 비점이 낮은 액체일수록 상온에서의 증기압이 높아지고 증발속도가 빨라진다.

●기체비중(Gas Specific Gravity)

물질의 비중이란 것은 동일한 상태조건하에서 즉 동일한 압력, 체적 및 온도하에서 그 물질과 기준물질의 무게를 비교하는데서 얻어지는 값이고 기준물질로는 주로 물(H<sub>2</sub>O)이 이용된다는 것을 우리는 알고 있다.

그러나 기체의 비중은 일상적인 사용상의 편의를 위해 동일한 상태조건하에서 공기의 무게와 비교한 값을 사용하는 것이 보통이다. 이 경우 건조공기(Dry Air)의 무게를 1이라고 하였을 때 이와 비교되는 기체의 상대적인 무게를 기체의 비중으로 하게 된다. 따라서 비중이 1보다 큰 기체는 공기보다 무겁고 1보다 작으면 공기보다 가벼운 것이 된다. 만약 1보다 큰 비중을 가진 인화성의 증기가 용기로부터 새어나오면 낮은 위치로 가라앉아 점화원에까지 이를 수 있다는 점을 유의해둘 필요가 있다. 기체비중은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{기체비중} = \frac{\text{기체의 분자량}}{28.8}$$

여기서 28.8은 공기의 평균분자량이다. 위의

식으로 계산한 기체 비중은 그 기체의 분자가 분해되지 않는한 비교적 정확한 값이 될 수 있다(기체분자가 분해되면 증기밀도는 떨어진다).

탄산가스는 분자량이 44이기 때문에 공기보다 무거워서 소화기에서 방출되면 낮은 아래부분에 쌓이게 된다. 온도가 올라가면 증기밀도는 작아지게 때문에 연소시 생성된 뜨거운 가스가 위로 올라가는 것은 이 때문이다.

●증기-공기비중(Vapor-Air Specific Gravity, VASG)

「증기-공기비중」은 어떤 온도와 압력에서 액체와 평형상태에 있는 공기와 증기의 혼합물이 보여주는 기체비중을 말한다. 증기-공기비중은 액체의 온도, 그 온도에서의 증기압 및 액체의 분자량에 따라 달라진다. 온도가 액체의 비점보다 매우 낮은 경우에는 액체의 증기압이 상당히 낮아지므로 증기-공기혼합물의 조성에서 공기가 거의 대부분을 차지하게 되어 증기-공기비중은 1에 가깝지만 온도가 상승하여 비점에 가까워지면 증발이 가속되어 증기-공기비중은 1에서 벗어나게 된다.

증기-공기비중이 1보다 훨씬 큰 혼합기체는 공기보다 무겁기 때문에 낮은 위치로 가라앉고 1에 가까운 비중의 것은 대류에 의해 쉽게 확산되거나 공기와 혼합하여 희석되기 때문에 증기가 먼 거리까지 이동하기가 쉽지 않게 된다.

어떤 주어진 온도에서의 증기-공기비중은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{증기-공기비중(VASG)} = \frac{P_v \times S}{P} + \frac{P - P_v}{P}$$

여기서 P는 혼합기체의 전압(Total Pressure), P<sub>v</sub>는 그 온도에서의 액체의 증기압, 그리고 S는 순수한 증기의 기체비중이다. 위의 식은 다음과 같은 방법으로 도출될 수 있다.

증기-공기비중은 증기-공기혼합기체의 무게를 동일한 상태조건의 공기의 무게로 나누어

얻어지는 값이므로 공기의 단위분자량이 갖는 체적을  $V$ 라 하고 증기-공기혼합기체를 체적  $V$ 만큼 취하였다고 상상함으로써 쉽게 구할 수 있게 된다(여기서 증기와 공기를 모두 이상기체(Ideal Gas)의 특성을 따르는 것으로 간주하여 계산한다. 엄격히 말하여 이들은 이상기체가 아니지만 그와 같이 계산하더라도 실제에 응용하는 데는 큰 오차가 발생하지 않는다).

체적  $V$ 속에서 증기와 공기가 차지하는 체적을 각각  $V_v$  및  $V_a$ , 이들의 무게를 각각  $m_v$ ,  $m_a$ , 증기와 공기의 단위분자량을 각각  $M_v$ ,  $M_a$ , 증기-공기 혼합물속의 증기와 공기의 분압을 각각  $P_v$ ,  $P_a$ , 그리고 혼합기체의 전압을  $P$ 라고 하자.

그러면 구하고자 하는 증기-공기비중은 체적  $V$ 인 혼합기체의 무게를 공기의 분자량  $M_a$ 로 나눈 값과 같아질 것이므로

$$VASG = \frac{m_v + m_a}{M_a} = \frac{m_v}{M_a} + \frac{m_a}{M_a} \dots (1)$$

여기서  $m_v$ 는 체적  $V_v$ 의 무게이고 체적  $V$ 인 증기의 무게는 곧 증기의 단위분자량이 되는데, 이상기체에 대한 「아마가」의 법칙(Law of Amagat)에 따라  $V = V_v + V_a$ 가 성립되므로  $m_v$ 의 값은 다음과 같이 된다.

$$m_v = \frac{V_v}{V} \times M_v \dots (2)$$

이와 마찬가지로,

$$m_a = \frac{V_a}{V} \times M_a \dots (3)$$

(2)와 (3)식을 (1)식에 대입하면,

$$VASG = \frac{(V_v/V)M_v}{M_a} + \frac{(V_a/V)M_a}{M_a} = \frac{V_v}{V} \times S + \frac{V_a}{V} \dots (4)$$

그런데 이상기체의 분압(Partial Pressure)에 관한 「돌턴」의 법칙(Law of Dalton)에서  $P = P_v + P_a$ 가 성립된다(여기서  $P$ 는 전압으로서 통상 대기압과 같은 값이 된다)

$$\therefore P_a = P - P_v \dots (5)$$

그리고 분압의 개념을 고려하면서 「보일」의 법칙(Law of Boyle)을 적용하면  $P_v V = P V_v$  및  $P_a V = P V_a$ 의 식이 각각 성립된다.

$$\therefore \frac{V_v}{V} = \frac{P_v}{P} \dots (6)$$

$$\frac{V_a}{V} = \frac{P_a}{P} \dots (7)$$

(6)식 및 (7)식을 (4)식에 대입한 다음 (5)식을 추가 대입하면,

$$VASG = \frac{P_v}{P} \times S + \frac{P_a}{P} = \frac{P_v \times S}{P} + \frac{P - P_v}{P}$$

식이 성립된다.

위의 공식을 활용함에 있어, 보다 이해를 돕기 위하여 하나의 예를 들어보자.

25°C에서 증기압이 76mmHg이고 기체비중이 2인 인화성 액체인 25°C에서의 증기-공기비중을 구해보자.

위의 식에서 볼 때 증기압 76mmHg는  $P_v$ 에 해당하며  $S$ 는 2이고 전압  $P$ 는 곧 대기압과 같은 값이 되므로  $P$ 의 값으로 760mmHg를 취할 수 있다.

따라서,

$$VASG = \frac{(76)(2)}{760} + \frac{760-76}{760} = 1.1 \text{이다.}$$