

# 화재에서의 복사열 전달 현상

## □ 개요

특성 길이(characteristic length)가 0.2 m를 넘는 화염에 대해서는 복사가 지배적인 열전달방식이고, 대류는 그보다 소규모 화염에서 더 큰 의미를 갖는다는 사실이 알려졌다. 화재성상을 이해하기위해 열복사에 대한 이해가 필요하다.

화재 내에서 열복사가 발생할 때는 다양한 기체 및 그을음 입자들에 의한 방사(emission) 및 흡수도 일어난다. 이런 면에서 매우 큰 실질적 중요성을 갖고 있는 기체 중에 수증기와 이산화탄소가 있다. 또 석유계 물질(예를 들면, 플라스틱류) 중 상당수는 열을 받으면 탄화수소 가스를 방출하는데, 이 또한 강력한 흡수 체다. 아울러 관여 매질의 특성 평가에 있어서 그을음 입자의 기여도는 매우 중요한 의미를 갖고 있으며, 상당수의 경우에 그을음 복사는 기체 복사보다 큰 영향을 미친다.

## □ 기본 개념

### 복사강도 및 에너지 선속(flux)

일반적인 양자역학적 해석에서 전자파 복사는 광자의 이동으로 설명되고 있다. 임의의 방향으로 놓여진 표면에 대한 단위 주파수 열복사에너지의 순 유량은 스펙트럼 복사 에너지 선속으로 표현된다.

복사 광선의 강도는 비관여 매질을 통과하는 동안에도 일정하게 유지되므로 유용한 열복사 척도 역할을 한다.

### 플랑크의 법칙

플랑크의 양자 이론을 통해 완전 방사체 및 흡수체 표면, 즉 흑체 에서 방출되는 복사에너지 스펙트럼을 계산할 수 있다. 흑체 복사로부터 나오는 총 복사강도는 (1)식과 같다.

$$I_b = \int_0^{\infty} I_{b\lambda} d\lambda = \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (1)$$

### 키르히호프의 법칙

화재가 평형상태에 도달했다면, 각 매질 간의 경계면에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$a_v + \rho_v + \tau_v = 1 \quad (2)$$

여기에서,  $a$ ,  $\rho$ ,  $\tau$ 는 각각 경계면을 통해 흡수, 반사, 그리고 투과되는 에너지 분율을 의미한다. 키르히호프 법칙에 따르면, 평형을 유지하기 위해 스펙트럼 흡수율 및 스펙트럼 방사율은 같아야 한다.

## □ 기본 계산방식

### 비관여매질 내의 에너지 교환

여러 표면 간에 발생하는 복사에너지 전달의 특성은 표면의 기하학적 형상, 방향, 그리고 온도에 따라 결정되는 반면에, 물질 표면의 복사 특성은 온도, 경계 매질, 방향, 그리고 복사의 극성에 따라 달라진다. 각 표면의 기하학적 형상 및 방향은 보통 하나 이상의 형상계수에 의해 반영된다. 형상계수는 하나의 표면에서 나와 다른 표면에 의해 차단되는 복사선속의 비율로 정의된다.

**형상계수 및 상관식:** 2개의 표면으로부터 나오는 복사선속이 균일하게 확산 분포 되어 있다면(일반적으로 적용되는 공학적 가정), 임의의 교환표면 쌍의 형상계수에 대한 상호 관계를 (3)식과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (3)$$

합법칙은 미지의 형상계수를 계산하는 유용한 수단이다. 이를 이용해 이미 알고 있는 형상계수로부터 미지의 형상계수를 (4)식과 같이 구할 수 있다.

$$\sum_j F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (4)$$

복사에너지의 실제 손실은 조사량과 방사량의 차이로 구해진다.

**관여매질의 스펙트럼 방사율 및 흡수율의 열복사:** 미시적인 관점에서 복사의 방출 및 흡수는 광자의 상호작용으로 인해 발생하는 원자 및 분자 에너지 레벨의 변화 때문에 발생한다. 두께가  $L$ 인 복사 층을 통과하는 단색 복사광선을 생각해 보자. 매질의 온도와 특성이 경로를 따라 일정하다면, 점  $x$ 에서 복사광선의 강도는 (5)식과 같다.

$$I_\lambda(x) = I_\lambda(0)e^{-\kappa_\lambda x} + I_{b\lambda}(1 - e^{-\kappa_\lambda x}) \quad (5)$$

균일 기체 공간 내의 경로길이  $S$ 에 대한 스펙트럼 방사율은 입사 복사가 없는 경우( $I_\lambda(0) = 0$ )를 고려해 (6)식과 같이 쉽게 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{b\lambda}} = 1 - e^{-\kappa_\lambda S} \quad (6)$$

이 방정식은 대상 물질을 통과하는 경로길이  $S$ 에 동일 온도에서 최대 방출 에너지(흑체)에 대한 실제 방출 에너지의 비를 의미한다. 방정식 (6)에서  $\kappa_\lambda S$  (광학적 경로길이 혹은 불투명도라고 불림)를 비균질 매질에 대해 다음과 같이 보다 일반적으로 정의할 수 있다.

$$\tau_\lambda = \int_0^S \kappa_\lambda(x) dx \quad (7)$$

만약  $\tau_\lambda \ll 1$ 라면 과장  $\lambda$ 에서 해당 매질은 광학적으로 얇다고 표현하고,  $\varepsilon_\lambda \approx \tau_\lambda$ 라는 매우 간단한 근사를 통해 해당 되는 관여매질의 특성을 보다 일반적으로 표현할 수 있게 된다.  $\tau_\lambda \gg 1$ 인 매질은 광학적으로 두껍다고 표현하며, 이는 평균관통거리가 해당 매질의 특성 길이보다 훨씬 더 작음을 의미한다.

**총 방사율:** 총 방사율이란 모든 과장에 대한 평균특성을 의미하며, 다음 (8)식과 같이 정의한다.

$$\varepsilon_t = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty \varepsilon_\lambda I_{b\lambda} d\lambda \quad (8)$$

**평균흡수계수:** 플랑크 평균흡수계수의 정의는 (9)식과 같다.

$$\kappa_p \equiv \frac{\int_0^\infty I_{b\lambda} \kappa_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty I_{b\lambda} d\lambda} = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty I_{b\lambda} \kappa_\lambda d\lambda \quad (9)$$

**균질 기체의 평균 광선길이:** 평균광선길이의 개념은 균질 복사기체로부터 경계표면으로 나오는 에너지 선속을 계산하는 데 있어서 강력하고 편리한 도구이다. 평균광선 길이는 비균질 기체에 대한 복사에너지 선속을 근사할 때 사용한다. 여기에서,  $L_0$ 는 기하학적 평균광선길이를 의미한다. 광학적으로 두꺼운 한계 범위 내에서는 간단한 보정계수를 사용해 합리적인 복사선속을 구할 수 있다는 사실이 밝혀진 바 있다.

$$L \approx CL_0$$

임의의 형상을 갖고 있는 기체에 대해 기체 체적으로부터 전체 경계표면까지의 기하학적 광선길이는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$L_0 = \frac{4V}{A}$$

여기에서  $V$ 와  $A$ 는 각각 기체 경계표면의 체적과 면적을 의미한다. 보정계수  $C$ 는 0.9라고 추정해야 한다. 0.9는 광범위한 형상에 대해 이미 알려진 값과 비슷한 수치다.

## □ 연소생성물의 열복사 특성

### 기체의 복사 특성

기체의 열복사특성은 방사율 표의 형태로 제시된다. 각 기체의 분압 및 온도, 그리고 기체 체적 형상에 대한 평균광선길이를 알고 있으면, 이 표를 통해 기체의 방사율을 구할 수 있다. 서너 가지의 탄화수소 기체로 구성된 혼합물의 경우에는 대역 중첩이 일어날 수 있다. 그러므로 그에 따라 적절한 보정조치를 취해 혼합가연물의 총 방사율이 과장되는 일이 없도록 해야 한다.

### 그을음의 복사 특성

비균질 매질(예를 들면, 그을음이 포함된 경우)의 경우에는 흡수 및 복사와 함께 산란이 중요한 복사 메커니즘 역할을 한다.

그을음 입자는 불완전한 그을음 연소의 결과로 발생하며 구체, 덩어리, 긴 사슬 등의 형태로 관찰되는 경우가 많다. 열전달 관점에서 그을음 구름에서 나오는 복사는 입자의 크기 분포에 따라 큰 영향을 받으며 화학조성과는 무관하다고 간주할 수 있다.

### 기체-그을음 혼합물의 복사 특성

균질 기체 그을음 혼합물에 대한 총 방사율을 예측하기 위한 간단한 형태의 정확한 방정식을 도출해 내기 위한 최근의 연구 활동을 통해 다음 방정식 (10)이 훌륭한 근사 결과를 제공해 준

다는 사실이 밝혀졌다.

$$\varepsilon_t = (1 - e^{-\kappa_s S}) + \varepsilon_g e^{-\kappa_s S} \quad (10)$$

여기에서,  $S$  = 물리적 경로길이,  $\varepsilon_g$  = 기체만의 총 방사율,  $\kappa_s$  = 그을음의 유효흡수계수

## □ 화염 및 화재에 대한 응용

### 화염의 열선속 계산

화염으로부터 나오는 복사 열선속 예측은 화재 전파위험의 결정 및 화재감지 장치의 개발에 있어 중요한 의미를 갖고 있다. 실제 상황의 화염 형태는 임의적이고 시간에 따라 변화하는데, 이로 인해 상세한 복사 분석은 매우 지루하고 비경제적인 특성을 갖게 되었다. 대부분의 계산에 대해 화염은 평면 층, 선대칭 원통 및 원추 등과 같은 간단한 기하학적 형상으로 이상화 된다

### 연기층의 열선속 계산

천장 아래에 연기층이 형성되어 있는 실내 화재 상황에서 발생하는 복사 열전달을 생각해 보자. 일반적인 연기층의 최대 온도는 보통 1,100 ~ 1,500 K 정도이고, 그 구성 성분은 강력한 관여매질(예를 들면, 이산화탄소, 수증기, 그을음 입자 등)이다. 연기층에서 나오는 열선속은 가구나 바닥용 카펫과 같은 원거리 표면의 발화와 직접 연관지어진다.

연기층의 복사 강도는 온도의 4제곱에 비례하고, 연기층의 경로길이  $S$ 에 대해 지수감소함수로 나타난다.

기본적인 계산방식으로부터 방호구역 내의 각 표면에 대한 방사량 및 조사량을 구할 수 있다.

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (11)$$

$$G_i = \sum_j F_{i-j} J_j \quad (12)$$

$J_i$  및  $G_i$ 에 대한 연립방정식을 풀 후, 임의의 표면에 대한 순 열선속은 조사량과 방사량의 차이이다.

### 가연물의 열분해율

경우에 따라서는 기화율을 열분해율이나 연소율이라고 하기도 하며, 기화율은 화재 성장률에 정비례 하므로, 화재위험의 척도 역할을 하기도 한다. 열분해율의 판정은 에너지 및 질량의 보존을 근거로 하고 있으므로, 가연물 표면에 도달하는 총 열선속을 반드시 알고 있어야 한다. 정상상태 조건을 가정하면, 에너지 수지를 식(13)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_e + q_c + q_r + q_{rr} = \dot{m}'' \Delta H \quad (13)$$

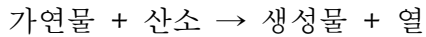
여기에서,

$q$  = 열선속(아래 첨자의 의미는 각각 외부, 대류, 복사, 그리고 재복사 등을 의미)

$\dot{m}''$  = 열분해율,  $\Delta H$  = 기화 잠열

확산 화염에서는 종의 전달에 걸리는 특성 시간이 화학반응에 대해 필요한 경우보다 훨씬 더 길다. 초기에 산소가 가연물로부터 분리되어 있는 화염은 확산 화염으로 간주하는 경우가 많

다. 예혼합 화염에서는 연소 구간에 도달하기 전에 가연물 및 산소가 함께 혼합되어 전달 및 반응에 대한 특성 시간을 서로 비교할 수 있는 정도가 된다. 복사 분석에서 화학 반응에 대한 세부사항(단순한 반응에 대해서도 여러 가지 중간 반응 및 종별 중간 생성물의 보존원리가 개입되는 경우가 많음)은 다음과 같은 1단계 비가역 전체 관계식으로 단순화 되는 경우가 많다.



자주 사용되는 또 하나의 중요한 단순화가 ‘화염 박판(flame sheet)’ 근사이다. 화염 박판 근사란 가연물 및 산소가 접촉과 거의 동시에 반응해 무한히 얇은 반응구간을 형성 한다는 가정이다. 화염 박판 근사에 대비되는 개념이 ‘화염층(flame layer)’ 근사이다. 화염층 근사에서는 화학반응이 유한한 속도로 발생해 유한한 두께를 갖는 반응구간을 형성한다고 가정한다. 화염층 근사는 발화, 소화, 화염 안정성, 그리고 기타 과도화염현상에 적용할 수 있다.

**경계층 내의 열분해율:** 복사 계산의 복잡성으로 인해 광학적으로 얇은 한계 범위 내의 1차원 복사에 한해서만 경계층 분석이 시도되었다. 일반적으로 복사의 영향은 1) 보상차원의 표면복사 및 2) 화염으로부터 저온 환경으로 전달되는 화염 복사 손실을 통해 열분해율을 떨어뜨리는 효과를 갖고 있다. 이로 인해 화염온도는 떨어지고, 전도 열전속도 감소한다.

**풀 파이어(pool fire) 내의 열분해율:** 대류 열전달 및 복사 피드백에 대한 정보 부족으로 인해 에너지보존을 적용해 풀 파이어(pool fire) 내의 가연물 열분해율을 구하기가 어렵다. 열분해율의 예측은 제한적인 실험 데이터의 상관관계에 크게 의존하고 있다.

대규모 화재는 온도 및 기체 종별 농도 면에서 비균질성이 눈에 띄게 심하며, 이로 인해 단일 구간 화염 모델을 가용 실험 데이터와 연계시키기가 어렵다. 최근에는 2구간 모델이 제안된 바 있다. 2구간 모델은 대형 PMMA (Plexiglas) 화재의 열분해율을 예측하는 데 성공적인 도구이다. 이 때 화염은 1) 열분해를 거친 가연물 기체로 이루어진 하단의 저온층과 2) 생성 가스 및 그을음으로 이루어진 상단의 고온 층 등 2개의 원추형 균일 층으로 모델링 된다. PMMA를 제외한 가연물에 대한 모델을 검증하기 위해서는 대규모 풀 파이어(pool fire)에 대한 보다 많은 실험적 데이터가 필요하다.

## 발화에 대한 응용

발화는 연소의 개시와 관련된 인화성을 제한하는 거동의 일부로서 화학반응속도가 중요한 역할을 하는 속도 제어 메커니즘이다. 발화현상의 예측은 분석에서 선정한 발화 기준에 따라 크게 달라진다. 화재 예측을 위해서는 가연물 표면이 주어진 열전속도에 노출된 후의 발화지연시간을 구해야 한다.

유도발화 및 자연발화는 광범위한 발화 분류 중 두 가지의 중요 등급이다. 자연발화 메커니즘에서는 물리적 이해와 실제 계산방식의 결핍으로 인해 현재까지는 복사 열전달을 무시하는 경우가 많았다.

방호구역 화재에서는 화재로부터 공급되는 과도한 열로 인해 화염으로부터 멀리 떨어져 있는 물질이 발화되는 현상이 발생한다. 간단한 형상을 갖고 있고 기체에 둘러싸인 반무한 고체는 1차원 복사 분석으로 설명할 수 있다. 과도에너지보존방정식을 식(14)와 같이 표현할 수 있도록

경계면 부근의 고체 영역에 초점을 맞추도록 한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

( $\alpha$ 는 해당 고체의 열 확산율)

경계 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$T = T_i \quad \text{at } t = 0, \quad x \rightarrow \infty \quad (15)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon_s q_r = h_c(T - T_i) \quad \text{at } x = 0 \quad (16)$$

방정식 (16)은 가연물 표면에서 전도, 대류, 그리고 복사가 균형을 이루고 있음을 의미하고, 방정식 (15)는 온도 레벨을 구하는 데 사용된다. 라플라스 변환기법을 이용하면, 방정식 (14)는 쉽게 풀 수 있으며, 그 결과는 다음 식(17)과 같다.

$$T(x, t) = \left( T_i + \frac{\varepsilon_s q_r}{h_c} \right) \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \exp(h_c x + \alpha h_c^2 t) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h_c}{k} \sqrt{\alpha t} \right) \right] \quad (17)$$

발화지연시간(초기 열전속 적용 시점으로부터)은 복사 열전속  $q_r$ 를 알고 있으면, 위의 방정식으로부터 정확히 계산할 수 있다. 발화지연시간의 계산은  $q_r$ 의 변화에 따라 크게 영향을 받는다.  $q_r$ 은 천장 화염 아래의 연기층 및 가연물 표면에 존재하는 상대적으로 차가운 열분해가스가 갖고 있는 복사 특성에 따라 달라진다. 이러한 효과를 '복사 차단 (radiation blockage)' 효과라고 하며 이는 화염 복사 연구분야에서 현재 주목을 끌고 있는 부문이기도 하다. 연기층의 조성 및 특성을 알고 있다면, 복사차단효과를 정확히 계산할 수 있다.

가연물 표면을 향하는 열에너지를 차단하는 또 다른 요소는 매우 높은 파장 의존성을 보이는 방사율  $\varepsilon_s$ 이다. 예를 들어, PMMA와 같은 가연물은 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 파장 범위(일반적인 화염 및 연기 온도에서 나오는 복사강도가 최대인 범위) 내에서 복사에너지를 잘 흡수하지 못 하는 반면 2.5  $\mu\text{m}$ 를 초과하는 범위에서는 복사 흡수성이 탁월하다. 아울러, 표면의 총 방사율은 가연물 표면이 열분해로 인해 탄화하기 시작하거나 액화하면서 변할 수 있다. 표면 조건에 따라 크게 달라질 수 있는 가연물 표면의 복사 특성을 고려할 때는 주의를 기울여야 한다.

상기 내용은 SFPE 방화공학핸드북(CHAPTER 1-4, Radiation Heat Transfer) 본문을 요약·정리한 자료입니다.

정리 : 위험조사부