

A Room-Corner Fire Model을 적용한 건축내장재의 화재확산 특성 평가(1)

김운형 / 공학박사, 호서대 강사

Abstract

A room-corner fire scenario of ISO 9705 with flame spread model developed by Quintiere is applied to the interior finish materials to show the sensitivity of thermal properties affecting actual fire hazard in a compartment fires. The analysis process of properties derived from ASTM E-1321 and ASTM E-1354 is investigated and various range of thermal properties by the author were analyzed in the model. These are including flame heat flux and thermal inertia, lateral flame spread parameter, heat of combustion and effective heat of gasification. The time for total energy release rate to reach 1MW is examined. Though some areas are needed for improvements, The model appears to predict a good results with all the range of input properties and could be

1 서론

본 글의 목적은 Room-Corner Fire Model을 이용하여 실내 가연성 벽 및 천장 마감재의 화재 확산 여부를 결정하는 건축재료의 특성을 분석하고자 한다. 한국화재보험협회의 통계에 따르면 1985년부터 1995년 사이 국내화재의 67.5%가 건물에서 발생되어 같은 기간 일본의 60.3%, 미국의 32.5%에 비교하여 상대적으로 높은 비율을 차지하고 있다. 모든 용도의 건물에는 가연성 마감재가 사용되고 있으며 발화 시 재료에 의한 화염확산 속도나 강도 여부에 따라 공간 내 인명 안전에 매우 큰 영향을 주게된다. 실제로 건물화재의 대부분을 차지하는 주택(아파트 포함)

이나 많은 인명피해가 예상되는 다중집회시설, 위락시설등의 화재는 좋은 예가 된다.

가연성 내장재의 사용은 공간내 화재하중의 증대를 의미하며 표면의 화염확산을 통한 화재 성장을 촉진시켜 소위 플래쉬 오버 현상을 유발하게 된다. 또한 유독성 가스나 연기의 생성을 통해 피난 상 필요한 거주조건을 악화시킨다. 따라서 건축재료의 물리적, 화학적 특성과 마감조건 등을 고려한 종합적인 위험성 분석을 통하여 내장재가 공간내 화재위험성에 미치는 영향을 최소화하는 방법을 마련해야 한다. 실내 가연성 내장재로 인한 대형 화재 경험은 오래 전부터 많은 나라에서 법적인 사용 제한이나 금지규정을 제정한 직접적인 계기가 되었다. 내장재의 실

재 화재성능을 정확히 예측하는 것은 인명 안전 상 매우 중요하며 이를 위해 여러 나라에서 많은 시험방법이 개발되고 연구되고 있다. 대다수의 관련규정은 재료의 시편을 통해 등급을 부여하거나 상대적인 수치로 분류하는 소위 bench-scale test 방법을 사용하고 있으며 그 결과는 실제 화재시 재료의 성능과는 상당히 다를 수 있다. 국내에서는 KS F 2271에서 건축재료의 연소 성능을 평가하고 있으며 각국마다 연소시험 기준과 평가 방법이 다르게 적용되고 있다. 한편, 이러한 bench-scale test에 의한 결과를 이용하여 full-scale 공간에서 내장재가 갖는 화재성능을 평가할 수 있다면 시험상의 한계를 극복하고 이에 따른 시험시간과 경비절감등 많은 이점을 기대할 수 있다. 이러한 배경에서 Quintiere는 Lateral Ignition and Flame Spread Test (LIFT) 와 Cone Calorimeter 시험결과를 이용하여 가연성 내장재의 화재성능을 평가하는 컴퓨터 모델을 개발하였다.

본 글에서는 Room-Corner Fire 시나리오를 Quintiere의 모델에 적용하여 내장재의 화재성능을 분석하였다. 이를 위해 건축재료의 시험 및 자료 분석 방법을 제시하였으며 가상의 재료 범위에 대한 모델링을 통해 화재확산 특성을 분석, 평가하였다.

2 건축재료의 화재시험

2.1 Cone Calorimeter

2.1.1 시험방법

공간화재시 가연성 재료에 의한 열 방출 비율 (Energy release rate)은 연소과정 및 화재성장을 결정하며 플래시 오버 현상을 예측하기 위한 매우 중요한 요소로서 이는 화재위험성 평가에 기준이 된다. 재료의 열 방출 비율을 측정하기 위한 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 우선 열적측정을 통해 평가하는 Ohio State University (OSU) Calorimeter가 있으며 ASTM E-906의 기준으로 사용되었다. 다른 방법으로는 연소시 산소의 소비량을 기준으로 하는 Cone Calorimeter 방법으로 ASTM E-1354에서 사용되고 있다. 두

방법 모두 일정한 열 플럭스를 받는 작은 시편의 열 방출 비율을 계산하여 이를 full-scale 시험시 동일재료의 열 방출 비율로 평가하는 시험방법이다. 재료의 열 방출 비율과 연소비율(Mass loss rate)을 통해 연소열량(Heat of combustion)을 계산할 수 있다. 시험시 적용되는 열플럭스에 따른 재료의 연소열량과 burning rate는 실제 화재성능 평가에 중요한 요소이며 이는 Cone calorimeter로 측정할 수 있다. 열 방출 비율을 구하기 위한 산소소비량 계산시 아래와 같은 가정이 필요하다.

첫째 모든 가연물은 연소시 산소 1kg에 대해 13.1 MJ의 열량을 방출한다.

둘째 연소과정 중 chamber 내부는 steady state 조건의 control volume(CV)을 구성하며 여기서 질량의 변화량은 다음과 같다.

$$dm_{cv} / dt = \dot{m}_{air} + \dot{m}_f - \dot{m}_{exh} \quad (2.1)$$

또한 CV로 구성되는 계가 평형 또는 steady state로 가정하면 온도, 압력 및 질량은 모두 일정하게 된다.

셋째 모든 가스체는 연소생성물을 포함하여 이상기체로 본다. 따라서 (2.1)식은

$$\dot{m}_{air} + \dot{m}_f = \dot{m}_{exh} \text{로 정리된다.}$$

한편 유입된 공기중의 산소는 연소시 소비되며 일부는 그대로 배출된다.

$$\Delta \dot{m}_{o_2} = \dot{m}_{o_2,in} - \dot{m}_{o_2,exh} \quad (2.2)$$

이러한 가정을 통해 열 방출 비율 \dot{q} 를 계산하면

$$\dot{q} = (13.1 \text{ MJ/kg}) \times (\dot{m}_{o_2,in} - \dot{m}_{o_2,exh}) = 13.1 \Delta \dot{m}_{o_2} \quad (2.3)$$

시험방법은 전기 가열로를 이용하여 콘 가열로 속의 100mm x 100mm 시편에 20-75kw/m²의 일정한 열 플럭스를 공급하며 점화를 위해 spark igniter를 사용한다. 시간이 지나면서 외부 복사열로 인해 재료표면의 온도가 상승하고 열분해가 시작된다. 가연성 기체가 연소 하한범위를 넘게

되면 발화하며 발화시간이 측정된다. 연소생성물은 배출구에서 수집되고 산소농도와 공기량이 측정된다. 따라서 시험결과로서 각 열 플럭스에 따른 발화시간, 연소비율 및 열 방출 비율을 알 수 있으며 이를 이용하여 Quintiere 모델의 입력에 필요한 재료특성인 발화온도, 열 관성(thermal inertia) 및 기화열 등을 결정할 수 있다.

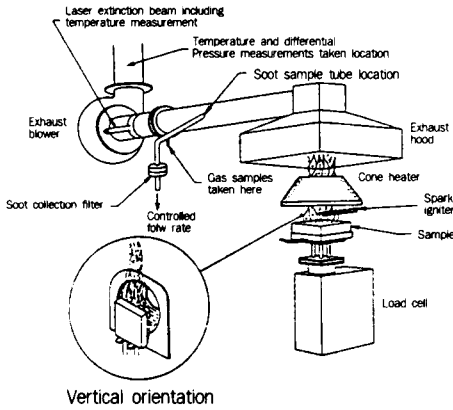


그림2.1 The Cone Calorimeter

2.1.1 재료특성 분석

a) 발화온도(T_{ig})와 열 관성(ρc) 결정

Cone calorimeter test를 이용하여 각기 다른 열 플럭스(\dot{q}_{ext})를 적용한 재료의 최대 열방출 비율과 평균 발화시간(t_{ig})을 결정할 수 있다. 우선 x축에 표시되는 열 플럭스(예로서 25KW/m^2 부터 50KW/m^2)에 대한 재료의 발화시간을 y축

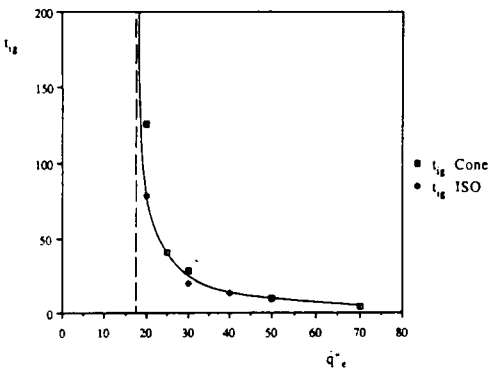


그림2.2 발화시간과 열 플럭스(\dot{q}_{ext})

에 표기한다. 열 플럭스가 증대하면 발화시간은 함수형태로 감소한다. 다음에는 동일한 x축에 대해 $[1/(t_{ig})^n]$ 값을 표시한다. 여기서 n은 1/2 또는 0.547을 적용하며(Janssens, Atreya) x축과의 교점이 재료의 발화에 필요한 최소열 플럭스(\dot{q}_{crit})가 된다. 이를 통해 재료의 발화 온도를 결정한다.

미국 ASTM E-1321(Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties)에는 열 플럭스와 발화 온도와의 관련식이 있으며 임의의 \dot{q}_{crit} 에 대한 재료의 발화 온도를 결정할 수 있다. 발화 온도 결정을 위한 식은 아래와 같다.

$$\epsilon \dot{q}_{crit} = \epsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_{\infty}^4) + h_c (T_{ig} - T_{\infty}) \quad (24)$$

여기서 발화시 대류 열 전달계수 h_c 와 표면 방출비율 ϵ 는 재료에 따라 결정되며 Cone test 경우, 각각 $10\text{W/m}^2\text{K}$ 와 1.0을 적용한다. 또한 주위 온도는 300K 로 가정하며 $\sigma = 5.67 \times 10^{-11}$

$\text{KW/m}^2\text{K}$ 를 적용한다. 한편, 표면의 총 열 전달 계수를 h 라 하면 (24)식은

$$\dot{q}_{crit} = h (T_{ig} - T_{\infty}) \quad (25)$$

가 되며 h 값을 결정할 수 있다.

재료의 열 관성 값은 위에서 계산된 값들을 이용하여 구할 수 있다. 우선 ($\dot{q}_{crit} / \dot{q}_{ext}$)를 y축에, ($\sqrt{t_{ig}}$)를 축에 표기하고 y축의 값이 1이 되는 위치까지 자료의 가장 근사한 직선식을 그린다. 여기서 발화관련 변수 b 가 결정되고 재료의 열 관성은 아래 식으로 구할 수 있다.

Data from "S5.ign"

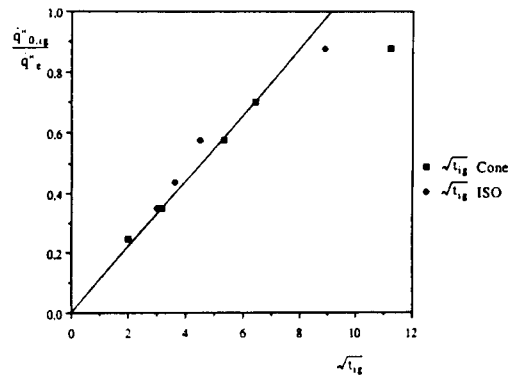


그림2.3 ($\dot{q}_{crit} / \dot{q}_{ext}$) vs $\sqrt{t_{ig}}$

$$\dot{q}_{crit} / \dot{q}_{ext} = b \sqrt{t_{ig}} \quad (2.6)$$

$$t_{ig} = \pi / 4 \kappa \rho c \{ (T_{ig} - T_{\infty})^2 / (\dot{q}_{ext})^2 \} \quad (2.7)$$

여기서 식(2.5)의 h 와 식(2.6)의 b 를 대입하면

$$\kappa \rho c = 4 / \pi (h/b)^2 \quad (2.8)$$

b) 연소열(ΔH_c)과 기화열(L)

재료의 기화열은 Cone calorimeter에서 측정되는 단위 면적당 최대 방출열량(Rate of Heat Release, RHR)과 \dot{q}_{ext} 과의 기울기를 통하여 구한다. RHR은 화재시 공간내 플래쉬 오버를 예측하는 매우 중요한 요소가 된다.

재료의 연소열(Effective Heat of Combustion)은 연소시 단위 중량당 발생하는 열량이며 각 열 플럭스에 대해 Cone test에서 측정된다. 기화열 L은 연소시 고체의 기화에 필요한 에너지를 의미하며 재료의 연소열을 RHR의 기울기로 나누어 구할 수 있다.(Quintiere)

$$L = \Delta H_c / \text{Slope} \quad (2.9)$$

2.2 Lateral Ignition and Flame Spread Test (LIFT)

International Standards Organization(ISO)과 American Society for Testing and Materials (ASTM)은 재료의 화염확산 성능을 평가하기 위한 시험방법을 만들었다. 이들은 International Maritime Organization(IMO)의 방법을 기준으로 하고 있으나 시험기준 및 자료분석은 Quintiere의 화염확산 이론을 적용하여 진행된다는 점이 다르다. 본 시험을 통해 재료의 발화와 수평방향의 화염확산이 측정된다.

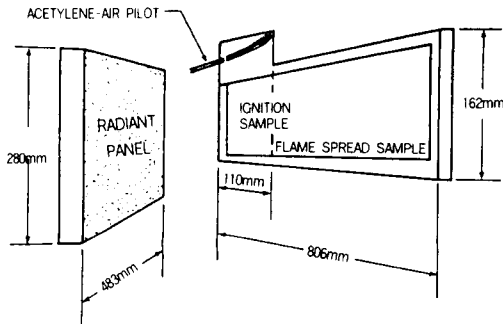


그림2.4 LIFT Apparatus

수직으로 놓이는 시편은 15°로 기울어진 공기와 가스를 이용한 수직 복사 열 패널에 의해 가열된다. 발화시험을 위해 크기 155mmx155mm의 시편들은 균등한 열 플럭스에 가열되며 발화시간이 기록된다. 화염확산 시험을 위해 크기 155mmx800mm의 시편이 길이방향으로 점점 줄어드는 열 플럭스에 의해 가열된다. 일단 발화되면 시편의 길이방향으로 화염확산 속도(V)가 측정된다. 발화시간과 화염확산 속도는 재료의 연소성능 평가를 위한 Quintiere의 이론을 적용하여 분석된다. Cone test와 동일한 방법을 통해 \dot{q}_{crit} , T_{ig} , $\kappa \rho c$ 등을 구할 수 있으며 다른 점은 천장에서 바닥으로 확산되는 화염확산을 평가하기 위해 최소표면 온도 $T_{S,min}$ 을 계산할 수 있다. 또한 수평 화염확산 계수(ϕ)는 화염확산 시험을 통해 구한다. 균등한 열 플럭스를 받는 수직 표면에서의 열 플럭스와 발화시간과의 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{q}_{crit} / \dot{q}_{ext} = b \sqrt{t} \quad (2.10)$$

화염 확산 속도 V는 시험중 측정되는 화염선단 위치와 시간을 기준으로 계산된다.

여기서 $V^{-1/2}$ 과 $\dot{q}_{ext}^{-1/2} F(t)$ 를 그래프로 표시하면

$$F(t) = b \sqrt{t}, \quad t \leq t^* \\ = 1, \quad t > t^* \quad (2.11)$$

화염확산 변수(C)는 자료의 직선성을 연결한 기울기로 결정되며 t^* 은 열적 평형에 도달한 시간을 나타내는 특성시간으로 $t=t^*$ 가 되면 $F(t) = 1$ 이 된다.

또한 수평방향의 화염확산 변수, ϕ 는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\phi = 4 / \pi (Cb)^2 \quad (2.12)$$

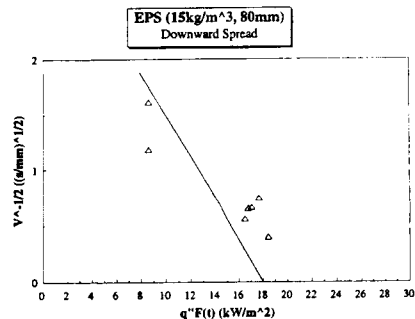


그림2.5 $V^{-1/2}$ vs $\dot{q}_{ext}^{-1/2} F(t)$

2.3 ISO 9705 Test

건물화재시 가연성 내장재로 인한 화재확산은 공간의 크기, 내장재의 종류 및 열적 특성 그리고 화원의 위치등에 따라 결정된다. 비교적 작은 공간내 화재시 최초로 발화된 가연물로 인해 가연성 마감재로 확산되어 실내온도를 증대시키며 플래쉬 오버에 이를 가능성이 높다. 반대로 넓은 공간의 경우, 최초 가연물의 열량은 주변의 일부 가연물의 연소는 가능하나 실내온도 상승은 상대적으로 낮게 된다. 한편 건물 입주후 거주자가 사용하는 실제 벽, 천장마감재의 화재성능을 평가하기 위한 화재시험방법(large-scale test)이 여러 나라에서 개발되었다. ISO 9705 Room-corner standard test는 유럽을 중심으로 시행되고 있는 대표적인 내장재의 화재확산 시험으로 실의 크기 2.4m x 3.6m 천장고 2.4m에 0.8m x 2.0m의 문이 있는 Full-scale test 방법이다. 가장 불리한 화재상황을 고려하여 방의 구석에 화원(Corner-fire)을 가정하여 화원의 크기는 최초 100KW에서 시작하여 10분 후 300KW로 증대된다. 재료의 열 방출열량은 문에서 배출후드로 나가는 연소가스중 측정된 산소를 기준으로 계산한다.

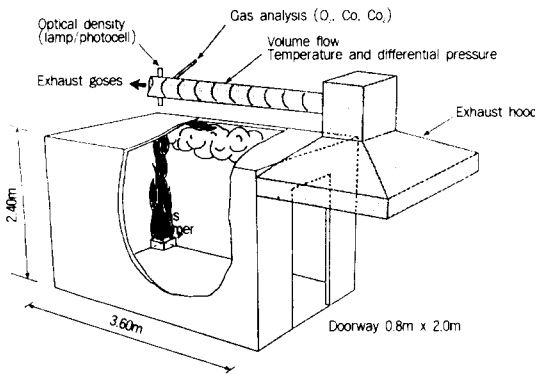


그림2.6 ISO Room-Corner Test

그러나 이러한 Full-scale test 방법은 시험을 위한 비용이나 시간이 많이 소요되는 문제가 있다. 따라서 Bench-scale tests(예로서 Cone Calorimeter를 이용한 ISO 5660)를 통한 재료의 발화시간과 열 방출 비율등을 이용하여 가연성 내장재의 화

재성능을 평가할 수 있는 컴퓨터 모델들이 개발되었다. 미국의 Ohio State University에서 Smith가 최초로 모델을 개발한 이후(1980년-1987년) Janssen은 이 모델의 몇가지 문제점을 수정하여 수정된 모델인 MOSURF (Modified Ohio State University Room Fire Model)을 제시하였다. 스웨덴의 Lund University에서는 Magnusson과 Karlsson이 수학적 모델을 연구하여 Karlsson의 박사학위 논문에서 두 가지 모델 즉 가연성 벽 및 천장재를 위한 Model A와 가연성 벽만을 위한 Model B를 제시하였다.(1992년) 또한 Quintiere와 Cleary는 내장재의 벽과 천장의 화염확산 해석을 위한 완결된 이론을 제시하였으며(1991년) 이를 토대로 수학적 모델을 개발하였다.(1993년) 한편, Wade는 Karlsson과 Quintiere의 화염확산 모델을 이용한 존 모델인 BRANZFIRE을 개발 하였다.(1997년) 대부분의 존 모델이 내장재의 화재확산 가능성 또는 화재위험성을 평가하지 못하는 한계가 있음을 고려할 때 이 모델은 가연성 내장재가 있는 공간에 적용할 수 있다.

3. Quintiere 모델

3.1 개요

본 모델은 단일 개구부(창 또는 문)를 가진 Room-corner fire에서 가연성 벽 및 천장 마감재의 발화, 화염확산, 연소 비율 및 연소원료를 평가하는 수학적 모델이다. 열분해 면적 및 연소거리의 벽 상부로 확산되고 천장을 가로질러 양쪽 벽으로 확산되는 형태(wind-aided or upward flame spread)와 천장의 ceiling jet에서 아래 바닥 쪽으로 확산되는 형태(lateral or downward flame spread)로 구분되어 계산된다. 화재시 발화된 액체나 고체 가연물 표면은 화염의 확산(Flame spread)이 진행된다. 화염확산은 발화에 필요한 온도이상 가열된 가연물의 표면에서 발생하는 열분해 선단(pyrolysis 또는 vaporization)의 이동을 의미하며 화염확산 속도는 이 선단의 변화율로 정의할 수 있다. 고체 가연물의 경우(두께>2mm), 화염확산 속도는 아래와 같다.

$$V = dx_p / dt = \dot{q}_f \delta_f / \kappa \rho c (T_{ig} - T_S)^2 \quad (3.1)$$

여기서 x_p : 기화면 위치
 \dot{q}_f : 화염 열 플럭스
 δ_f : 화염 가열길이
 T_S : 가열이전의 재료표면 온도

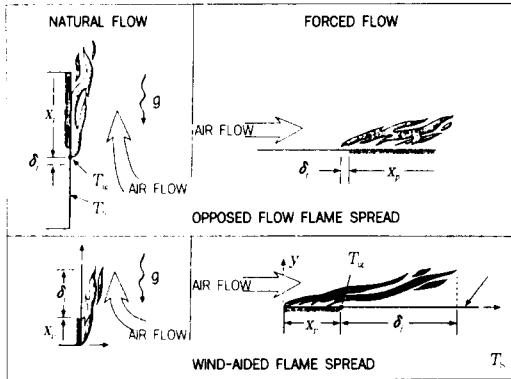


그림3.1 화염확산 형태

화재시 화염확산 형태는 벽과 벽 또는 벽과 천장 등 공간 교차면의 화재특성을 고려할 필요가 있다. 화재시 천장면의 고온의 연기층은 실내표면에 복사열을 주게되며 이는 열 플럭스의 증대로 인해 연소속도가 더욱 촉진된다. 또한 천장면의 화염확산으로 화염과 가연물의 view factor로 인해 열 플럭스가 증대된다. 그리고 가연성 천장 마감재로 인한 열 방출이 증대되며 화재가 확산되며 벽과 천장면을 따라 확산된 화재는 상부 벽에서 바닥쪽으로, 양 벽쪽으로 화염확산이 진행된다. 화염은 가연물의 열적 특성(thermally thin 또는 thick)에 따라 복사와 대류형태로 열 전달이 진행된다.

한편, 확산형태는 화염 선단의 방향과 같은 방향의 공기흐름(wind-aided)과 반대방향의 공기흐름(opposed)에 따라 두 가지로 구분되며 후자의 경우, 화염확산 속도는 아래의 실험결과 식으로 결정된다.(두꺼운 고체, 자연대류 경우)

$$V = \phi / \kappa \rho c (T_{ig} - T_S)^2 \quad (3.2)$$

재료의 단위 면적당 방출 열량은 열분해 면적의 순 열 플럭스에서 계산된다. 화염의 열 플럭스는 열분해 면적과 그 위부분 즉 화염이 도달하는 곳에 걸쳐 일정한 값을 갖는다고 가정한다.

본 모델을 구성하는 6개의 방정식은 아래와 같다.

- (1) Wind-aided flame spread position, y_p
- (2) Wind-aided burn-out front position, y_b
- (3) Opposed-flow flame spread position, x_p
- (4) Opposed-flow burn-out front position, x_b
- (5) Gas temperature, T
- (6) Surface temperature, T_S

3.2 이론적 배경

3.2.1 발화시간

재료의 표면온도는 아래 식으로 구하며 발화 시간은 화원의 화염이 벽재료의 발화점에 도달한 시점 즉 $T_S = T_{ig}$ 으로 계산한다.

$$T_{ig} - T_\infty = 1 / \pi \kappa \rho c \int_0^t q(t) / \sqrt{t - \tau} d\tau \quad (3.3)$$

여기서 $q(t) = \dot{q}_{ig} + \sigma(T^4 - T_S^4)$

\dot{q}_{ig} : 화원의 열 플럭스(60KW/m² 가정)

T : 고온의 연기층 온도

3.2.2 연기층 온도

실내 온도는 quasi-steady 조건의 McCaffrey, Quintiere, Harkleroad 식을 이용하여 계산한다.

$$T = T_\infty \{ 1 + C [Q / \rho_\infty C_p \sqrt{g} T_\infty A_0 \sqrt{H_0}]^{0.4} [\sqrt{\kappa \rho c / t} A_s / \rho_\infty C_p \sqrt{g} A_0 \sqrt{H_0}]^{0.6} \} \quad (3.4)$$

여기서 Q : 총 방출열량

A_s : 공간내부 표면적

$\rho_\infty C_p \sqrt{g}$: 3.44 KW/m^{3/2}K

A_0 : 개구부 면적

H_0 : 개구부의 높이

$\kappa \rho c$: 내장재의 열 관성

C : 2.2 (corner-fire 계수,

center-fire의 경우 1.63)

3.2.3 열방출 비율

화재시 공간내 총 열 방출 비율은 화원과 가연성 마감재의 열 방출의 합계로 결정된다.

$$\text{즉 } Q(t) = \dot{Q}_{ig} + \dot{Q} A_p(t) \quad (3.5)$$

여기서 \dot{Q}_{ig} : 화원의 열 방출 비율

$Q(t)$: 내장재의 단위면적 당 열 방출

A_p : 열분해 면적

3.2.4 재료의 방출 열량

내장재의 단위면적 당 열방출 비율은 어느 시간에도 열분해 면적에 걸쳐 일정하다고 가정한다.

$$\dot{Q} = \Delta H_c / L (\dot{q}_f - \sigma T_{ig}^4 + \sigma T^4) \quad (3.6)$$

여기서

ΔH_c : 연소열

L : 기화열

\dot{q}_f : 열분해 면적에 걸친 화염의 열플럭스

σT_{ig}^4 : 재방사로 인한 열 플럭스 손실

σT^4 : 실내로부터 열 플럭스

3.2.5 Wind-aided flame spread position, y_p 계산

화재 확산으로 바닥에서 천장쪽으로 이동하는 열분해 위치의 계산은 아래 방정식을 적용한다.

$$dy_p / dt = y_f - y_p / t_{ig}$$

여기서 t 는 화원의 지속시간이며 화염확산에 따른 발화시간은

$$t_{ig} = \pi/4 \kappa \rho c [(T_{ig} - T_s)^2 / (\dot{q}_f)^2] \quad (3.7)$$

벽의 경우 \dot{q}_f 는 25 ± 5 KW/m²(화염높이 < 2m경우)이므로 본 모델에서는 30KW/m²로 가정함.

또한 벽의 구석, 천장 ceiling jet 그리고 천장 화염의 경우도 벽에서와 동일한 해석을 적용한다.

화염의 높이 y_f 는 벽의 경우 $y_f - y_b = K_f (Q')^n$ 으로 결정된다.

여기서 y_b : burn-out front

Q' : 단위폭 당 벽의 방출열량

(화원과 벽 재료열량의 합)(KW/m)

$$y_f = y_b + k_f Q'_{ig} + Q'' (y_p - y_b)^n \cdot y_b < k_f Q'_{ig} \\ y_f = y_b + k_f Q'' (y_p - y_b)^n \cdot y_b < k_f Q'_{ig} \quad (3.8)$$

여기서 $k_f = 0.01m^2/kw$ ($n = 1$)

Q'_{ig} 은 $Q_{ig} = k_f Q'_{ig}$ 인 화염길이의 화원의 열 방출비율이다. 스웨덴의 시험기준 경우 $Q_{ig} = 100$ KW의 경우 화염높이는 1.3m, 300KW의 경우 화염높이는 3.6m이다.

따라서 $Q'_{ig} = 1.3/k_f = 130KW/m$ (100KW)

$Q'_{ig} = 3.6/k_f = 360KW/m$ (300KW)

재료표면 온도, T_s 는 공간내 복사열 (configuration factor = 1)과 균일한 가스온도를 갖는 때

류열의 합으로 계산한다.

$$\text{즉 } \dot{q}''_r = \sigma (T^4 - T_s^4)$$

여기서 $\sigma = 5.66 \times 10^{-11} KW/m^2 \cdot K^4$

$$\dot{q}''_c = h(T - T_s)$$

여기서 $h = 0.01 KW/m^2 \cdot K$ (3.9)

3.2.6 Wind-aided burn-out front position, y_b

$dy_b / dt = y_p(t) - y_b(t) / t_b$ 에서

$$t_b = Q'' / Q'' \quad (3.10)$$

Q'' (KJ/m²)는 cone data로 결정되며 재료의 두께에 따라 일정한 값을 갖는다고 가정한다.

3.2.7 Opposed-flow flame spread position, x_p

$$dx_p / dt = \phi / \kappa \rho c (T_{ig} - T_s)^2 \text{ 단 } T_s \geq T_{s,min} \quad (3.11)$$

만일 $T_s < T_{s,min}$, $x_p = x_{po} (t)_{t_{ig,o}}$

$$x_p = 0 (t < t_{ig,o})$$

$y_p = H(t)_{t_H}$ 의 경우, 천장에서 아래로 진행되는 열분해 선단의 위치는

$$z_p = x_p (t) - x_p(t_H) \quad (3.12)$$

한편, ϕ 와 $T_{s,min}$ 은 재료특성으로 ASTM E-1321(LIFT test)로 결정된다.

3.2.8 Opposed-flow burn-out front position, x_b

$$dx_b / dt = x_p - x_b / t_b \quad (3.13)$$

여기서 t_b 는 (8)과 같으며

$$z_b = x_b(t) - x_b(t_H), t_H \text{ 는 } y_b = H \text{의 경우임.} \quad (3.14)$$

3.2.9 열분해 면적계산

그림에서와 같이 시간에 따른 열분해 및 연소 위치에 따라 면적을 계산한다.

$$A_p = A_p (y_p, y_b, x_p, x_b, z_p, z_b) \quad (3.15)$$

3.3 입력자료

본 모델은 FORTRAN으로 작성되었으며 화재 시나리오에 따른 총 29개의 입력자료를 요구한다. 이 중에는 ASTM E1354 "Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rate for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter" 과 ASTM E1321 "Standard Method for Determining Material

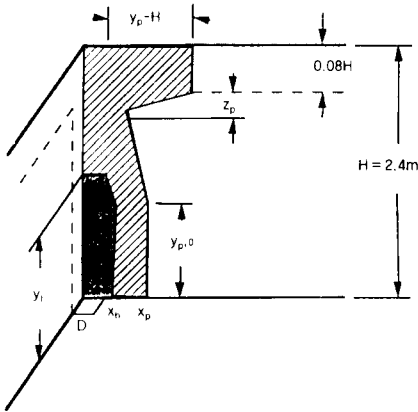
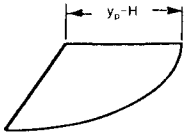


그림3.2 모델의 화염확산 패턴

Ignition and Flame Spread Properties" 시험을 통한 아래와 같은 입력자료를 필요로 한다.

1. 발화점 (Ignition Temperature, T_{ig})
2. 재료의 열 관성 (Thermal inertia, $k\rho c$)
3. 수평 화염확산 변수
(Lateral Flame Spread Parameter, ϕ)
4. 수평 화염확산 최소 온도
(Minimum Temperature for Lateral Spread, $T_{s,min}$)
5. 연소열 (Heat of Combustion, ΔH_c)
6. 기화열 (Effective Heat of Gasification, L)
7. 단위면적당 발생열량
(Total Energy per Unit Area, Q'')

본 모델은 현재 적용상 존 모델로서의 몇 가지 한계를 가지고 있다. 예로서 상부 고온층의 온도계산, 열분해 및 화염전달 부분의 일정한 열 플럭스 가정, 열분해 면적의 계산을 위한 간략화한 치수가정 그리고 모델의 예상결과는 정확한 재료 특성치에 의존한다는 것이다. 이러한 부분은 향후 관련분야의 연구 및 시험결과를 통해 개선될 필요가 있다. (FLU)

표 3.1 입력자료 예

POLYMETHYLMETHACRYLATE: PMMA(MATNAME)	
298.	{tinf} ambient temperature [K]
3.91	{c1} gas parameter
1.02	{xrc} thermal inertia
2.03	{h0} vent height [m]
0.76	{w0} vent width [m]
0.15	{yp0} ignitor flame height [m]
0.15	{xp0} ignitor flame half-width [m]
1.01	{qig} ignitor energy release rate [kw] :????
45.84	{as} room surface area [m ²]
14.82	{qfnet} flame net heat flux [kw/m ²] = qfixig-(sb*tig ⁴)
25.	{hc} heat of combustion [KJ/g]
1.6	{x1} (effective) heat of gasification [KJ/g] :?????
0.	{qrfig} config. rad. heat flux [kw/m ²]
0.01	{toi} tolerance on iterations
0.00	{r} ceiling area parameter [r = .5; wall, r = .25; corner]
25.	{qfixig} ignitor incident heat flux [kw/m ²]
3.37	{qigw} ignitor energy release per width [kw/m] :?????
0.0667	{c2} flame length coefficient
0.667	{c3} flame length power
375920.	{c4} total energy per unit area [KJ/m ²] :?????
651.	{tig} ignition temperature [K]
14.43	{phi} lateral flame spread parameter
2.43	{h} room height [m]
2.43	{w} room width [m]
3.66	{d} room depth [m]
25.	{qf} flame heat flux in spread [kw/m ²] :???????
40000.	{qmax} maximum fire size, stops run [kw]
298.	{tsmin} minimum temperature for flame spread [K]
1.	{dtime} time steps [S]

<다음호에 계속>