

# 防火區劃에 있어서 水幕設備의 理論的 考察

## An Analytical Study of Water Curtain in Fire Partition

金 和 中\*  
Kim, Wha Jung

### Abstract

This paper is study that the mathematical model of water mebrane splinklikler capacity in fire prevention block.

The methmetical investigation are performed about prediction of five temperature in room and water membrane splinkler capacity by use of experimental model.

The good correlation between predicted and experimental results is indication the adequacy of the methemetical model.

However, further experimental and analytical worke are needed before a more general mathematical model can be proposed.

### 1. 序

特殊建築物의 防火區劃에 있어서 建物 用途上 設置가 不可能한 경우, 이를 水幕設備로 대치시킬 수 있는가에 對해서는 前報에 實驗 結果로서 檢討되어졌다."

本報에서는, 그 實驗 結果를 基本으로 하여 理論的으로 分析하여 보고자 한다.

理論的 檢討는 火災溫度와 水幕性能에 對하여 實驗狀態를 모델化하여 數學的 分析을 行하고, 그 結果와 實驗結果를 比較하여 그 理論的 모델의 타당성을 證明하는 同時에, 防火區劃에 있어서 水幕設備의 活用如否를 理論的으로 判斷할 目的으로 行한 것이다.

### 2. 火災 溫度

室內의 火災溫度 推定에 관한 從來의 研究는 多數있으나, 그 計算에 있어 可燃物의 燃燒特性에 關連하여 많은 假定이 設定되어 있다. 여기서는 그 假定 中에 가장 合理的이라고 생각되는 假定을 選擇하여, 다음과 같은 熱平衡 方程式을 求解 火災溫度를 推定했다.

$$Q_h(\text{室內發熱量}) = Q_w(\text{內周壁의 吸收熱量}) + Q_b(\text{窓으로부터 밖으로 放熱되는 熱量}) + Q_L(\text{噴出炎의 持出熱量})$$

$$1) Q_h = M_p \times \text{等價木材發熱量} \times \text{完全燃燒率}$$
$$M_p = M_{air} / \text{理論空氣量 or } 3/c \times (1-t/c)^2 \times M_0$$

\* 正會員, 慶北大 建築工學科 專講·工博

$$M_{air} = 2/3 \cdot C_a \cdot B_a \cdot (H_f^{3/2}) \cdot q_f / \sqrt{2g \cdot (q_0/q_f - 1)}$$

$M_{air}$  : 流入空氣量

$C$  : 可燃物量이 0 가 되는 時間(可燃物量/平均燃燒速度 =  $5.5 \cdot A_B \cdot \sqrt{H_a}$ )

$t$  : 時間(hour)  $M_0$  : 初期의 可燃物量(kg)

$C_a$  : 開口係數  $B_a$  : 窓의 幅(m)

$A_B$  : 窓의 面積( $m^2$ )

$H_f$  : 中性帶에서 開口上端까지의 거리(m)

$H_f = H_a - H_0$  ( $H_a$  : 窓의 높이)

$q_f$  : 室內氣體의 密度( $kg/m^3$ )

$q_0$  : 外部氣體의 密度( $kg/m^3$ )

$q$  는(氣體의 分子量×氣壓) / (理想氣體常數×溫度) 관계에서

$$q = (28.25/1000) / (T + 273) \cdot 0.82056 \times 10^{-4}$$

$$H_0 = \frac{1}{1 + (q_0/q_f \cdot (1+r/\phi)^2)} \cdot H_a$$

$r/\phi$  : 理論空氣量(5.64kg)

$$2) Q_w = A_w \cdot \left\{ \sigma \left( \frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1 \right) (T_f^4 - T_w^4) + h (T_f - T_w) \right\}$$

$A_w$  : 壁의 總面積( $m^2$ )

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定數( $4.87 \times 10^{-8} \text{ kcal/h} \cdot m^2 \cdot ^\circ C^4$ )

$\epsilon_w, \epsilon_f$  : 壁과 火災가스의 放射率

$T_f$  : 室內火災溫度(K)

$T_w$  : 壁의 溫度(K)

$h$  : 熱傳達率( $kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$ )

$$3) Q_b = A_b \cdot \sigma (T_f^4 - T_\infty^4)$$

$A_b$  : 窓의 面積( $m^2$ )

$T_\infty$  : 外部의 溫度(K)

$$4) Q_L = M_{air} \cdot (C_{p0} \cdot T_\infty - (1 + \phi/r) \cdot C_{pf} \cdot T_f)$$

$C_{p0}, C_{pf}$  : 外部와 室內氣體의 比熱( $kcal/kg \cdot ^\circ C$ )

그림-1에 그 計算흐름도를 나타낸다. 또한 理論의 타당성을 檢討하기 위해 從來의 實驗結果와 計算結果의 比較를 그림-2에 나타낸다.

實驗의 火災溫도를 理論的으로 推定하기 위해 解析에 사용된 모델의 平面과 立面을 그림-3에 表示한다. 計算에 使用된 入力데이터는 表

-1과 같으며, 또한 그림-4에 實驗結果와 解析結果를 表示한다. 이 그림에서 보면 解析結果가 實驗結果를 어느정도 近以하고 있다고 示 료된다.

### 3. 水幕性能과 火災隣接室의 溫度分布

火災室의 溫度가 隣接室에 傳導되어졌을때, 水幕設備가 어느정도 溫度傳導를 抑制할 것인 가에 대하여 理論的으로 檢討를 하고자 한다.

#### 1) 自然對流의 方程式

流體의 어느 部分이 加熱되면 最初에는 熱傳導에 의해 溫度가 傳해진다. 그러나 熱傳導에 의해 流體의 溫度가 變化하게 되면 壓力差에 의한 流體의 運動에 의해서 熱輸送이 시작하게 된다.

따라서 本 論文에서는 火災隣接室의 溫度分布를 理論的으로 檢討하기 위해서 粘性流體에 흐름을 解析하는 方程式에 浮力의 效果를 고려하여, 溫度를 變數로 한 熱의 移流擴散 方程式을 連立시켜 自然對流의 問題를 二次元 有限 요소法을 利用하여 解析한다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -w$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} = g\beta \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \nabla^2 w$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T$$

$\psi$  : 흐름함수

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad \nu = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$u, \nu$  : 流速의  $x, y$  成分

$$w : \text{渦度} \quad w = \frac{\partial \nu}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

$T$  : 溫度

$g$  : 重力加速度( $9.8m/s^2$ )

$\beta$  : 體積膨脹率( $K^{-1}$ ),  $\nu$  : 動粘性係數( $m^2/s$ )

$\alpha$  : 溫度傳導率( $m^2/s$ )

$$\alpha = \frac{K}{c \cdot \rho} \quad (c : \text{비열}, \rho : \text{밀도}, K : \text{열전도도})$$

境界條件

基本境界條件  $\psi_B = \psi_0 (x, y \in s_1)$

$w_B = w_0 (x, y \in s_2)$

自然境界條件  $\partial\psi/\partial n|_B = -V_s (x, y \in s_3)$

$\partial w/\partial n|_B = w_n (x, y \in s_4)$

溫度規定의 경우  $T = T_0 (x, y \in s_5)$

境界上의 熱流速  $q_0$ 가 流出( $\lambda$ )하는 경우

$$q = \alpha \frac{\partial T}{\partial n} = q_0 \quad (x, y \in s_6)$$

境界上에서 熱傳達이 있을 경우

$$q = H(T - T_c) = q_1 \quad (x, y \in s_7)$$

$n$  : 境界上에서의 外向法線

$T_c$  : 外部溫度

$H$  : 有効熱傳導係數  $H = h/c \cdot \rho$  ( $h$  : 熱傳達係數)

2) 基本方程式의 離散化

解析對象을 有限要素로 分割하여 要素內의 흐름함수 溫度, 溫度를 다음과 같이 表現한다.

$$\psi(x, y) = [N(x, y)]^T \{\psi'\} \quad (4)$$

$$w(x, y, t) = [N(x, y)]^T \{w'(t)\} \quad (5)$$

$$T(x, y, t) = [N(x, y)]^T \{T'(t)\} \quad (6)$$

여기서  $[N]$ 는 節點의 各값과 要素의 各값을 연결시켜 주는 補間함수이다.

$[N]$ 를 무게함수로 하여 式(1), (2), (3)에 Galerkin法을 適用하여 領域 $\Omega$ 에서 積分하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} [N] \left\{ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + w \right\} d\Omega = 0 \quad (7)$$

$$\int_{\Omega} [N] \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} - g \cdot \beta \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \nu \nabla^2 w \right\} d\Omega = 0 \quad (8)$$

$$\int_{\Omega} [N] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial n} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} - d \nabla^2 T \right\} d\Omega = 0 \quad (9)$$

여기서 境界條件을 導入하기 위하여 2階微分을 가진 項을 部分積分을 行한다. 즉,

$$\int_{\Omega} \nabla [N] \nabla \psi d\Omega - \int_{\Omega} [N] w d\Omega - \int_s [N] \frac{\partial \psi}{\partial n} ds = 0 \quad (10)$$

$$\int_{\Omega} [N] \frac{\partial w}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} [N] \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \nu \nabla [N] \nabla w d\Omega - \int_{\Omega} [N] g \cdot \beta \frac{\partial T}{\partial x} d\Omega - \int_s \nu [N] \frac{\partial w}{\partial n} ds = 0 \quad (11)$$

$$\int_{\Omega} [N] \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} [N] \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \alpha \nabla [N] \nabla T d\Omega - \int_s [N] q_0 ds - \int_s [N] q_1 ds = 0 \quad (12)$$

(10), (11), (12)式에 (4), (5), (6)式을 代入하면 한 要素에 對해 다음 方程式을 얻는다.

$$\int_{\Omega} \left( \frac{\partial [N]}{\partial x} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} + \frac{\partial [N]}{\partial y} \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \right) d\Omega \{\psi'\} - \int_{\Omega} [N] [N]^T d\Omega \{w'(t)\} - \int_s [N] \frac{\partial \psi}{\partial n} ds \quad (13)$$

$$\int_{\Omega} [N] [N]^T d\Omega \frac{\partial \{w'(t)\}}{\partial t} + \int_{\Omega} [N] \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \{\psi'\} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \{\psi'\} \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \right) d\Omega \{w'(t)\} + \int_{\Omega} \nu \left( \frac{\partial [N]}{\partial x} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} + \frac{\partial [N]}{\partial y} \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \right) d\Omega \{w'(t)\} - g \cdot \beta \int_{\Omega} [N] \frac{\partial [N]^T}{\partial x} d\Omega \{T'(t)\} - \int_s \nu [N] \frac{\partial w}{\partial n} ds = 0 \quad (14)$$

$$\int_{\Omega} [N] [N]^T d\Omega \frac{\partial \{T'(t)\}}{\partial t} + \int_{\Omega} [N] \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \{\psi'\} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \{\psi'\} \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \right) d\Omega \{T'(t)\} + \int_{\Omega} \alpha \left( \frac{\partial [N]}{\partial x} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} + \frac{\partial [N]}{\partial y} \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \right) d\Omega \{T'(t)\} - \int_s [N] q_0 ds - \int_s [N] q_1 ds = 0 \quad (15)$$

위의 3式을 matrix로 表示하면

$$[K] \{\psi'\} - [C] \{w'\} = \{f_1\} \quad (16)$$

$$[C] \left\{ \frac{\partial w'}{\partial t} \right\} + [A(\psi')] \{w'\} + \nu [K] \{w'\} = \{F_2\} + \{F_3\} \quad (17)$$

$$[C] \left\{ \frac{\partial T'}{\partial t} \right\} + [A(\psi')] \{T'\} + \alpha [K] \{T'\} = \{F_4\} + \{F_5\} \quad (18)$$

式 17 과 18 式의 時間 微分은 Crank-Nicolson 法을 利用하면, 結局 matrix는 다음과 같이 된다.

$$[K] \{\psi\}^{n+1} = [C] \{w'\}^n + \{F_1\}^{n+1} \quad (19)$$

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{1}{2}[A(\psi^{n+1})] + \frac{\nu}{2}[K] \right) \{w'\}^{n+1} = \left( \frac{[C]}{\Delta t} - \frac{1}{2}[A(\psi^n)] - \frac{\nu}{2}[K] \right) \{w'\}^n + \frac{1}{2}(\{F_2\}^{n+1} + \{F_2\}^n) + \frac{1}{2}(\{F_3\}^{n+1} + \{F_3\}^n) \quad (20)$$

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{1}{2}[A(\psi^{n+1})] + \frac{\alpha}{2}[N] \right) \{T'\}^{n+1} = \left( \frac{[C]}{\Delta t} - \frac{1}{2}[A(\psi^n)] - \frac{\alpha}{2}[N] \right) \{T'\}^n + \frac{1}{2}(\{F_4\}^{n+1} + \{F_4\}^n) + \frac{1}{2}(\{F_5\}^{n+1} + \{F_5\}^n) \quad (21)$$

補間함수[N]는 삼각형 要素를 利用할 경우에 는 다음과 같다.

$$[N] = \frac{1}{2\Delta^e} (a_d + b_d x + c_d y) \quad (d=1, 2, 3)$$

$$a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2 \quad b_1 = y_2 - y_3$$

$$c_1 = x_3 - x_2$$

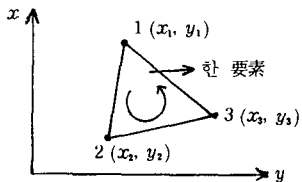
$$a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3 \quad b_2 = y_3 - y_1$$

$$c_2 = x_1 - x_3$$

$$a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 \quad b_3 = y_1 - y_2$$

$$c_3 = x_2 - x_1$$

$$\Delta^e : \text{한 삼각형 要素의 面積} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$



### 3) 數值計算

計算 順序를 그림-5에 表示한다. 計算에 利用된 모델과 境界조건은 그림-6와 같으며, 計

算에 있어 다음의 가정을 使用한다.

① 對流의 狀態를 支配하는 無次元數로서 Prandtl 數 Pr=0.7로 가정하고, Rayleigh 數 Ra=10<sup>7</sup>으로 가정한다.

② 計算에 必要한 係數는 다음과 같이 가정한다.

$$Ra = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 / \nu \cdot \alpha$$

$\beta$ : 體積膨脹率 (0.21 × 10<sup>-3</sup> (1/°C))

$\Delta T$ : 670°C, L: 溫度區配를 갖는 代表的 길이 (6.5m)

g: 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)

따라서 重粘性係數(ν)와 熱擴散係數(α)는

$$\nu \cdot d = (9.8 \times 0.00021 \times 670 \times 6.5^3) / 10^7 \approx 3.79 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

Pr = ν/α = 0.7 이므로,

$$\nu = 5.15 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2, \quad \alpha = 7.36 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

단 계산에 있어서는 x 方向의 流速(u), y 方向의 流速(V)를 고려하여

$$\nu_x = \nu + \frac{1}{2} u^2 \Delta t, \quad \nu_y = \nu + \frac{1}{2} V^2 \Delta t$$

$$\alpha_x = \alpha + \frac{1}{2} u^2 \Delta t^2, \quad \alpha_y = \alpha + \frac{1}{2} V^2 \Delta t^2$$

를 가정한다.

③ 有效熱傳導率 H는 水幕形成을 고려하여 0.002m/s를 가정하였고, 火災室로 부터 인접 실에의 가스擴散을 고려하여 화재실과 인접실 境界면에 일정하게 流速 u=0.01m/s가 있다고 가정했다.

④ 荷重項은 計算에 있어서, Δt 시간을 짧게 잡는다는 前題로서  $\frac{1}{2}(\{F\}^{n+1} + \{F\}^n) = \{F\}^n$ 를 使用했다.

### 4) 計算結果와 實驗結果

그림-7, 8에 分割要素 各點의 溫度 計算結果를 나타낸다. 이 結果에서 보면 室内部의 溫度는 거의가 100°C 以上의 溫度를 나타내고 있다.

그림-9에 實驗結果와 計算結果의 比較를 나타낸다. 이 그림에서 보면 計算結果가 實驗結果를 어느정도 近以하고 있다고 사료된다. 實驗

結果의 測定 위치는 그림-10과 같다.

參考로 그림-11, 12에 計算에 의한 焔度와 溫度分布를 時間 別로 나타냈다. 단 計算에 利用된 火災溫度는 그림-4의 ②火源을 使用했다.

4. 結論

以上の 檢討로 부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

- ① 室內의 火災溫度를 推定하는 Program을 作成하였다.
- ② 室內對流를 고려한 熱傳導方程式을 利用하여, 有限要素法에 의한 Program을 作成했다.
- ③ ①, ②의 Program을 利用하여 計算된 結果를 實驗結果와 比較하여 앞에 제안된 理論들의 타당성을 어느 정도는 입증하였다. 따라서 建物の 放火區劃에 있어서 水幕設備 使用 如否의 판단은 計算을 통하여 어느 정도는 檢討될 수 있다고 사료된다.

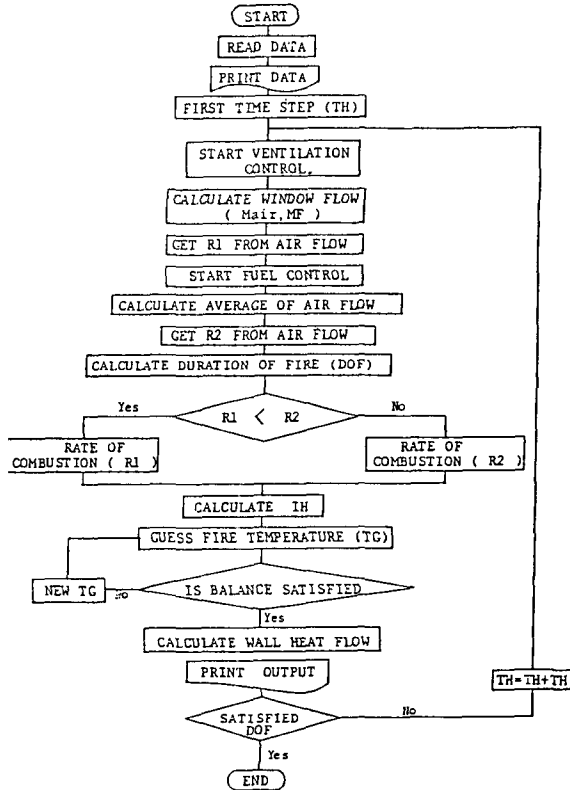


그림-1. 火災溫度計算 順序

④ 좀 工學的手法에 의한 理論的 모델을 제안하기 위해서는 많은 實驗 研究가 必要하다.

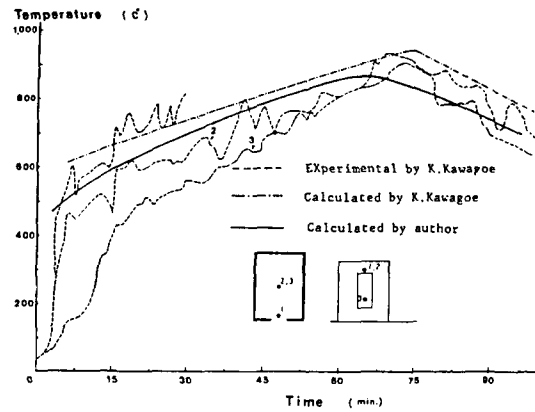


그림-2. 火災溫度 推定의 計算結果와 實驗結果

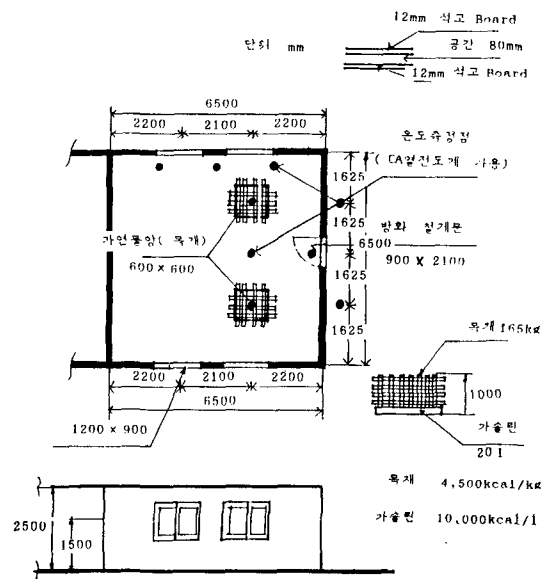


그림-3. 火災溫度 推定의 計算모델

(표-1) 입력 DATA

- Wall Surface Temp.=24°C Ambient Temp.=24°C
- Window Area=4.32m<sup>2</sup> Window Width=4.8m
- Floor Area=42.25m<sup>2</sup>
- All Wall Surface Area=60.68m<sup>2</sup>
- Window Height=0.9m
- Thermal Conductivity of Wall Mat.=0.37kcal/mh°C

6 / 防火區劃에 있어서 水幕設備의 理論的 考察

Density of Wall Mat. = 1250kg/m<sup>3</sup>  
 specific Heat of Wall Mat. = 0.24kcal/kg°C  
 Fire Load = 10kg/m<sup>2</sup>  
 Effective Calorific Value of the Fuel = 2820kcal/kg

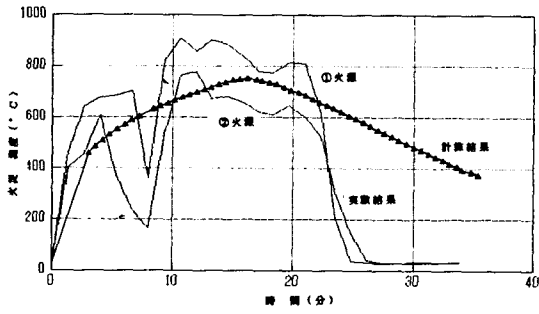


그림 - 4. 火災室 溫度의 實驗結果와 計算結果

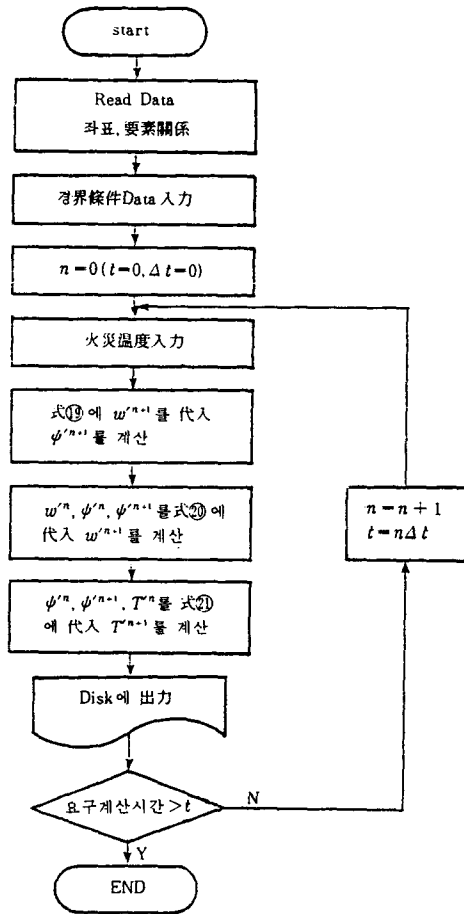


그림 - 5. 數直計算 flow chart

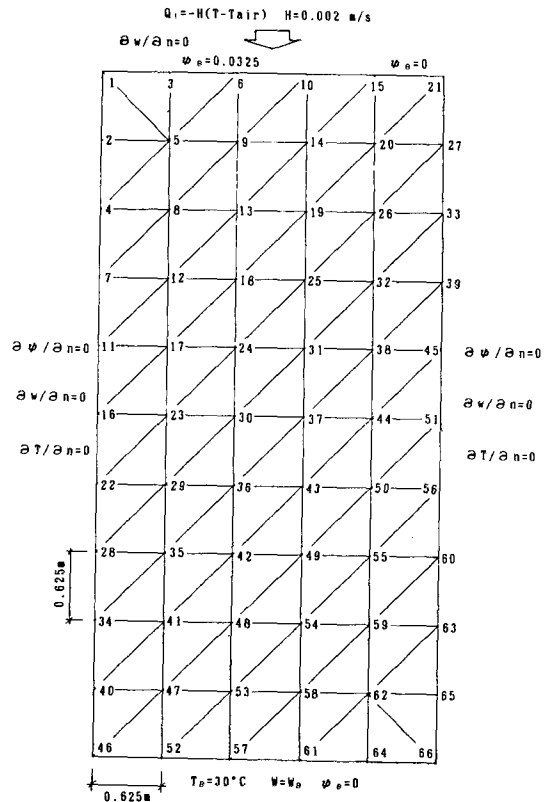


그림 - 6. 人점실의 溫度分布 計算을 위한 모델

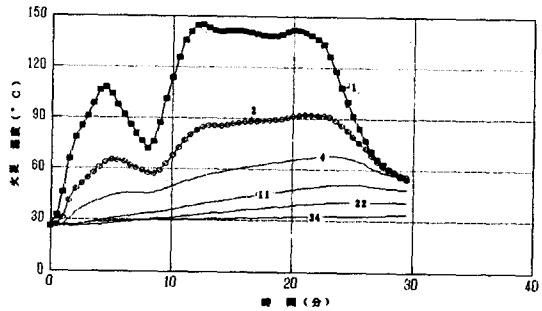


그림 - 7. 人점실의 計算에 의한 溫度分布

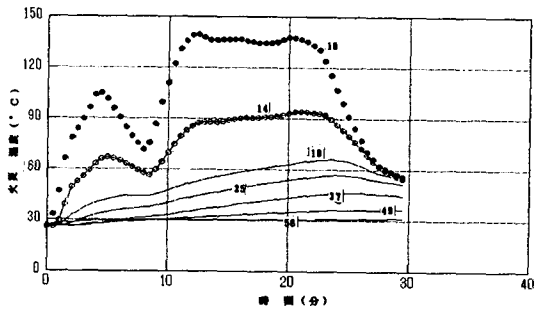


그림 - 8. 人점실의 計算에 의한 溫度分布

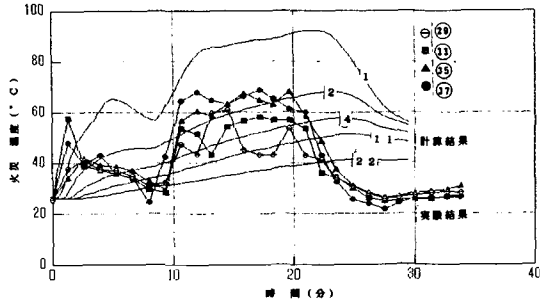


그림-9. 인접실 温度分布의 計算結果와 實驗結果

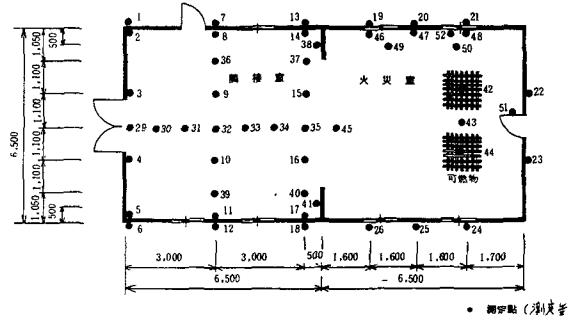


그림-10. 4次實驗時の 測定點(平面)

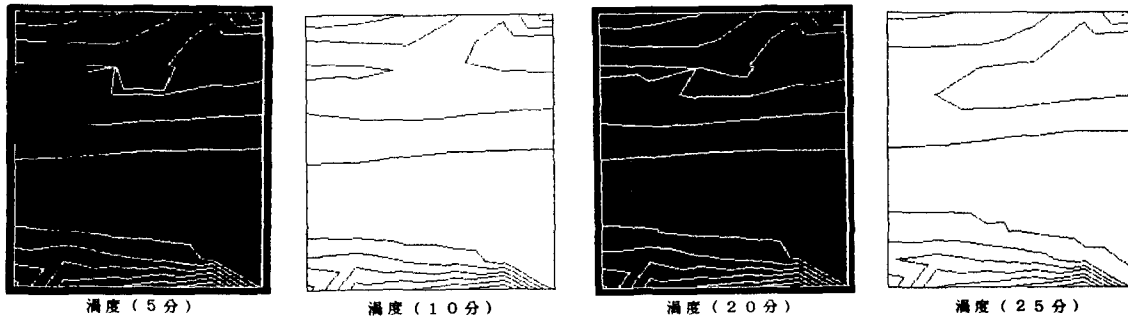


그림-11. 時間變化에 따른 温度(室内크기 關係無示)

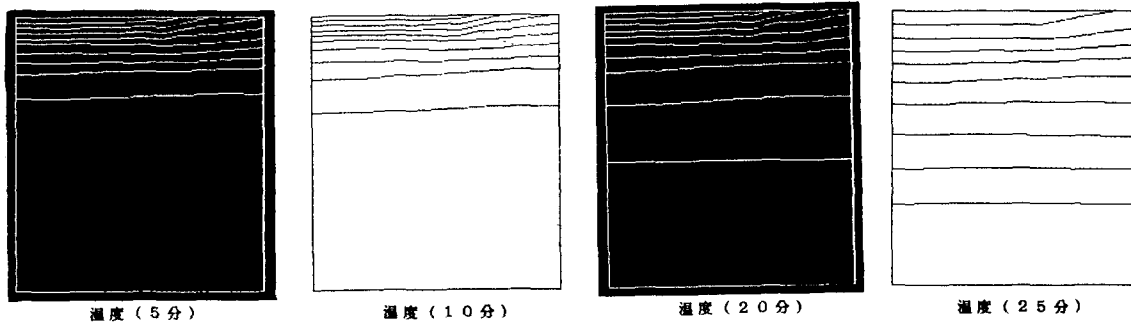


그림-11. 時間 變化에 따른 温度分布(室内크기關係無示)

參 考 文 獻

1. 金和中 外 4 名: 防火區劃과 水幕設備에 關한 研究, 韓國火災學會誌 1988年 11月 第 2 卷 第 3 號.
2. 關根考: 콘크리트 造建物の 室内火災温度推定(その 1, 2), 日本建築學會論文報告集 No. 85, 86, 1963年.
3. 川越邦雄: 콘크리트 造建物の 室内火災温度 日本建築學會論文報告集 No. 140, 1967年.
- 4) Barauskas, V.; Fire Endurance in Building, Univ. of California Berkley. Ph.D 論文.
- 5) 原田有: 建築耐火構法, 工業調査會.
- 6) 矢川元基; 流水と熱傳導の有限要素法, 培園館.
- 7) 日本機械學會; 熱と流水の Computer Analysis, コロナ社.
- 8) J. P. Holman; Heat Transfer, FIFTH EDITION, McGRAW-HILL, 1981年.