

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與目的

現今建築物所屬的消防設備中，排煙設備已大量被採用，經過多年的使用，漸漸被社會所接受，同時排煙設備也公認是維持人員逃生不被濃煙所阻斷相當重要的方法之一。Thomas[1]等人研究熱煙氣在有裝設屋頂排煙設備時的流動情形，而研究結果也應用到屋頂排煙設備設計的基礎上。近年來在高層建築物上，開始裝設排煙設備來幫助人們逃離火災現場，防止濃煙擴散到逃生路線上，已成為法規所要求消防設備項目之一。而撒水設備往往是抑制火源成長擴大有效滅火之最佳方式之一，撒水設備的滅火效果是在整個燃燒過程中，藉著水的冷卻效果來減低溫度，如果能把其冷卻效果和減低燃燒速度兩者結合起來，就能使火焰上方的溫度大大的降低。Hankins[2]在 FM 所進行的實驗結果很清楚的說明此現象，其結果如圖 1-1 所示。因此在一般公共建築物上消防相關法令也強制要求加裝撒水設備。往往排煙設備常與撒水設備連結在一起，但由於排煙口必須迅速的開啟排煙，某些時候它們會在撒水頭作動前就開啟。因此是否會因排煙風機啟動造成煙流強制流動，而啟動不該啟動之撒水頭，引起過度之水害 ( water damage )，則為目前國外相關學者專家熱烈研究探討中。

排煙設備另一個重要的目的就是幫助消防人員，並減少濃煙與火所造成的損失。假如火災是發生在如購物中心等地方，則火勢會迅速的成長，對於消防人員而言，即使已經安裝排煙設備，但需要控制的區域還是太大了，在這樣的情況下，則必須使用撒水設備，以避免更大的損失。假如在產生大量濃煙前，撒水設備就能夠迅速地把火撲滅，則不需要任何的排煙。然而，在許多實際的火災案例中，撒水設備雖然能夠控制住火勢，但卻無法立即撲滅，而這時排煙設備就能發揮其最大的功

用，幫助消防人員行動，將損失減至最低。

撒水設備與排煙設備雖各有其優點，但美國 NFPA[3]對於在已經裝設撒水設備的建築物中再裝上排煙設備仍感到矛盾。這是因為在一些大尺寸的實驗與 FMRC ( Factory Mutual Research Corporation ) [4]所作的一系列小尺寸實驗結果顯示，當開啟排煙口時，不僅有大量的物品被燒毀，而且所造成的水害也較大。因此撒水設備與排煙設備一起存在之情況，兩種消防設備之交互影響特性就特別值得關注，尤其在考慮消防人員行動的情況。

在最近的論文中，有些提出反對在已裝設撒水設備的建築中再裝設自動排煙設備的論點[5,6]。這些論點通常都低估消防人員介入的重要性並且忽略生命安全，此點也是本研究計劃必須進行探討的重點項目之一。

早期對於屋頂排煙設備中熱煙氣流動的研究並不包含排煙與撒水設備的相互作用[7,8]。但是，假設排煙口在撒水頭作動前就已經開啟，則火場附近某些撒水頭的啟動就會延遲，著火的區域就會擴大。在缺乏最可靠的資料前，有部分國外學者專家建議撒水頭應在排煙口開啟之前開啟。

但排煙口太晚開啟有可能會減低整體之排煙效率。假如排煙口早點開啟，預防建築物內人員逃生路徑受濃煙阻斷的機會會較大。清除人員逃生路徑所產生之濃煙，比防止它進入還困難許多。有一種替代的對策被提出，就是盡可能的將建築物的換氣率降低，所提供的氧氣將因此減少，因而減低燃燒速度。但是在歐洲許多國家中，大部分的消防人員卻不贊成，而且也不合適台灣之國情。因此當排煙被考慮的主要目的，是為了讓人們在逃生避難中可以不受到煙的阻礙時，則排煙設備必須被優先考慮，而且排煙口必須在撒水頭作動前打開。

撒水設備是公認抑制火勢擴大最有效之方法，而排煙設備

則是維持人員避難逃生動線不受濃煙侵害之不二法門，但從上述國外之各種研究報告中得知，兩種消防設備之間確實存在相當程度之影響性，如何擷取兩者優點，避開其相互影響之缺點則為本研究計劃之主要目的。

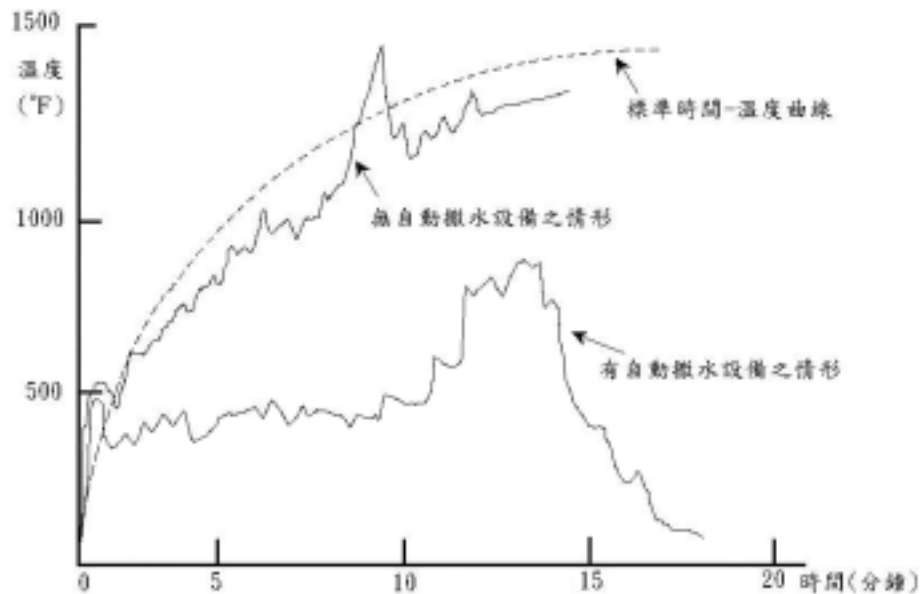


圖 1-1 有/無自動撒水設備在焚燒實驗中時間-溫度變化情形與標準時間-溫度曲線的比較圖

## 1.2 研究方法

本研究計劃將針對下列三個主要目標進行研究評估，提出定性與定量的設計準則供各界參考。

- (1) 當撒水頭作動時對於排煙的影響。
- (2) 排煙對於撒水設備控制火勢與滅火的影響。
- (3) 撒水設備對於排煙設備效率的影響。

在研究這個問題時首先可以以數學模式預測撒水頭開啟

的時間是否會對排煙造成不利的影響，同時建立一個大尺寸的實驗來驗證理論模式之可靠性。但理論模式應結合現今的火災工程知識，以工程上的關係為主要基礎，並輸入以前火災經驗的資料。對於不確定或不熟悉的區域，必須在它限制的範圍內作計算。而且可經由實際測試，測試系統在不同條件因素下不同消防設備之靈敏度，並且可以指出排煙設備與撒水設備共同使用的優點與缺點。

本研究將從理論出發，嘗試以火災模式計算天花板下煙流之煙溫對撒水設備啟動之影響，同時將排煙口開啟效應放入模式測試中，分別探討排煙口位置、排煙量、撒水頭位置、撒水量、火源大小等不同參數之影響性，同時輔以現場實驗以瞭解理論模式之可靠度作為修正模式參數之依據，希望藉由此計劃之進行能提出撒水設備與排煙設備對於消防安全相互加分之設計準則，供政府相關單位及民間設計業者參考。完整的研究流程如圖 1-2 所示。

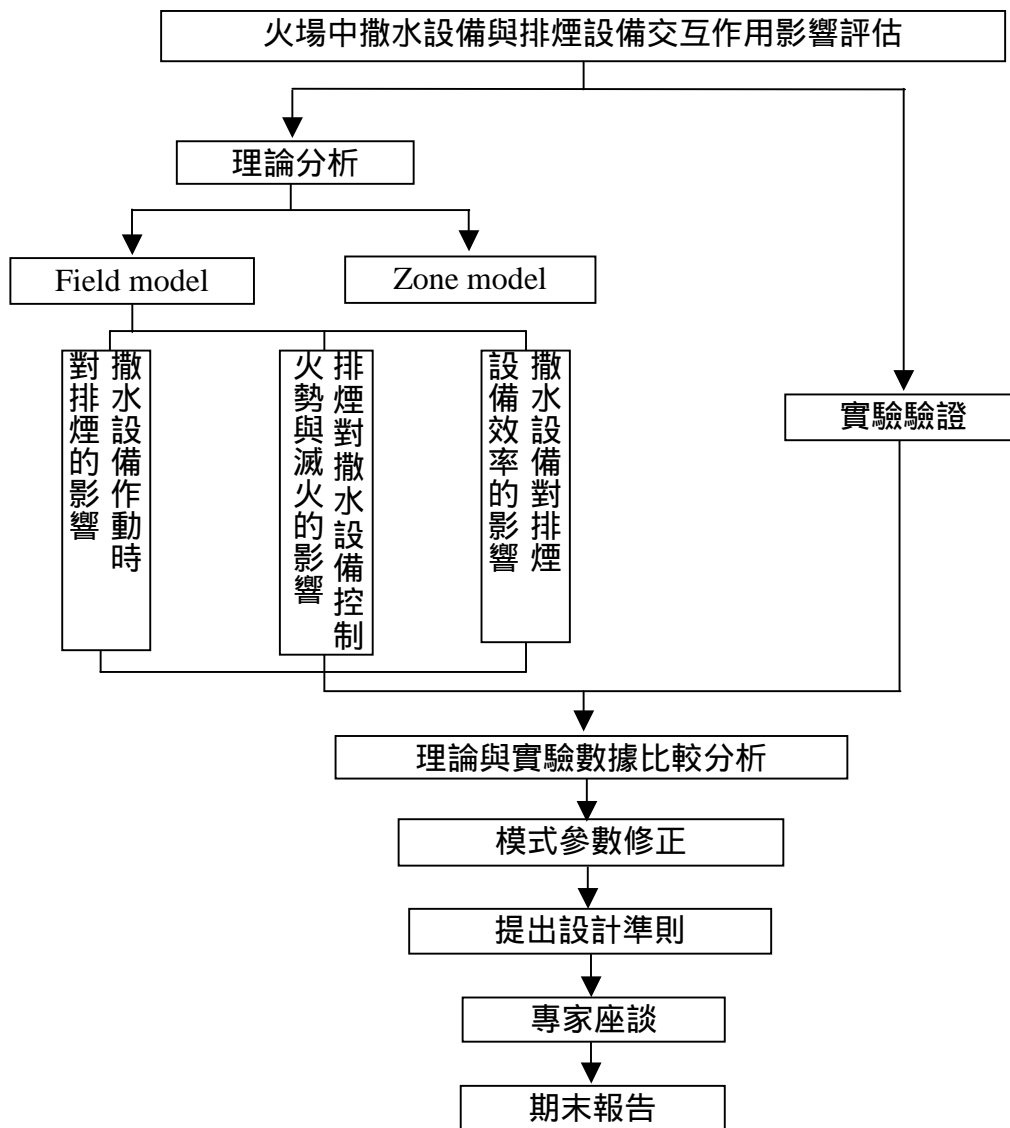


圖 1-2 整體研究內容架構

### 1.3 文獻回顧

對於撒水設備與排煙設備間的相互影響已經有許多的研究，其中包括實驗研究與電腦數值模擬分析，茲將相關的文獻簡述如下：

1955 年，Busby 和 Pigman[9]對排煙口作最早之研究。

1956 年，FMRC[10]進行了一系列大尺寸的實驗，此試驗為研究撒水設備、排煙設備與防煙垂壁間的相互影響。試驗結果顯示撒水設備與排煙設備都能有效降低火場溫度，而且排煙設備能有效提高能見度。

1964 年，UL[11]進行了一系列大尺寸的實驗，此試驗在一 18m×18m×5m 的房間進行。試驗結果發現使用排煙設備可以有效減少作動的撒水頭的數目。

1979 年，Morgan 和 Baines[12]進行一個大尺寸的試驗，此試驗為模擬購物中心的一部份區域，並且有裝設撒水設備。這個試驗是用來測定撒水頭所噴撒出來的水與熱煙氣的熱交換。結果指出撒水頭能從熱煙氣層中移除相當大量的熱並使其浮力降低。

1983 年，Markatos 和 Pericleous[13]使用 - 紊流模式模擬建築物空間內的煙流動分布，此種方式對於因為高溫所引起的浮力對紊流的影響有較正確的描述。

1998 年，NIST[14]進行了一系列的大尺寸實驗，研究撒水頭、排煙設備與防煙垂壁間之相互影響。其研究結果指出，當火源不是在排煙口正下方，則撒水頭的作動時間不會受到太大的影響。但是當火源在排煙口之正下方，則撒水頭之作動時間會有所延遲。

1999 年，鄧治東[15]採用點模式與區劃模式的混和體，建立區劃空間內火勢發展、火災現象評估模式，並以 1/20 縮尺鹽

水模型進行煙流之模擬，以驗證煙流分析模式之適切性。

1999年，羅國少[16]利用 PHOENICS 套裝軟體，模擬單一室內空間火災時之物理現象，並對撒水頭作動之火場使用雙流體模型 ( two fluid model )。

2000年，Nam[17]提出利用 CFD 的方式，以 BASA 發展的軟體 REDLEQS，以 CO<sub>2</sub> 的濃度變化作指標，研究在不同的送風速度、火源大小及火災位置，對於 CO<sub>2</sub> 煙霧分布的影響，並探討撒水頭在不同位置對溫度作動的情況。

Bullen 1974[18]；Morgan 1979[19]；Alpert 1985[20]；Heskestas 1991[21]；Cooper 1991[22]；Chow and Fong 1991[23]；Forney and McGrattan 1995[24]等人則使用數值模式研究撒水頭所噴灑出的水和煙層與火柱中的熱煙氣的相互影響，這些模式通常都有考慮熱煙層的對流冷卻影響。

## 第二章 火災模式之設計原理

### 2.1 火災之特性

火災的一般定義是指「火」違反正常的用途，因燃燒作用而生獨立延燒之狀態。換言之，火災乃違反人的意思而發生或擴大之燃燒現象。火災在燃燒可以持續之狀況下，有向四周無限擴大之特性。在不受其它因素之影響下，通常其燃燒的面積與經過時間的平方成正比。火災可視為燃燒之異常現象，無法全然以定性定量方法分析，而燃燒則為正常情況下以定性定量方法可加以分析之科學。

火災具有不斷發展、變化與無窮擴大之特性。只要可燃物綿延不斷，又無其它足以阻斷燃燒之因素，則其燃燒之面積與經過時間之平方成正比。任何型態的火災均具有此特性，惟不同類型的火災各有其不同成長過程。此外，如就一般有適當防火區劃的耐火建築物火災為例，火災應不至於不斷發展變化及無窮擴大。火災的經過時間與火災溫度變化一般可以火災時間-溫度變化曲線表示，如圖 2-1 所示。各時期火災的成長特性如下所述：

- (1) 初期 (initial period): 耐火建築物一般氣密性較佳，若窗戶開口緊閉，當建築物內之可燃物因故著火發生有焰燃燒 (flame) 時，其助燃氧氣量因燃燒而銳減，火焰短時間內即熄滅，形成悶燒狀態，此時建築物內由於此不完全燃燒現象而濃煙密佈。
- (2) 成長期 (growth period): 火災初期後，由於對流窗口通路形成 (助燃空氣供應無虞)，燃燒轉趨激烈，室內溫度由於輻射回饋效應亦隨時間快速上升，於是火勢由起火源附近之可燃性地毯或牆面快速擴展，然後移向天花板，將建築物室內的所有可燃物溫度提昇至燃點，開始進行全面燃



燒，此即為閃燃現象 ( flashover )，此時室內溫度可能高達 800 1000 。

- ( 3 ) 完全發展期 ( fully developed period )：火災於閃燃現象發生後，高溫促使燃燒反應速度加快，並且釋出大量的熱，於是火災達於鼎盛。火災燃燒進入完全發展期後，火場溫度由於冷空氣進入及大量釋熱的結果，其溫度稍微下降，並且呈現小幅震盪變化現象。
- ( 4 ) 衰退期 ( decay period )：當燃料逐漸耗盡，其能量釋出銳減，導致區劃內氣體平均溫度陡降。需要注意的是在此時期雖然溫度減低，但將熄的濃煙以及前幾段時期的持續高溫將導致房屋結構不穩定，因此火災所引起的潛在危險依然存在。

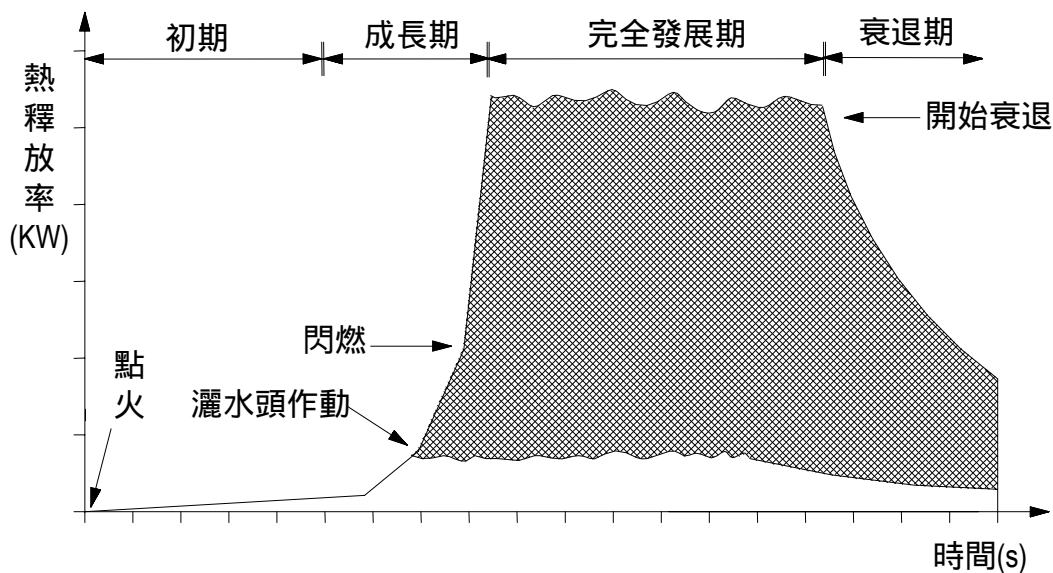


圖 2-1 火災溫度-時間變化曲線圖

## 2.2 火源設計

火源的設計對於建築物的煙控系統來說佔有極大部份的影響，火源的大小代表著熱釋放率的量，熱釋放率亦會影響火源的成長速率，而設計之基礎在於(1)穩態火源(Steady fire)、(2)非穩態火源(Unsteady fire)。以下將針對穩態火源與非穩態火源作基本之說明。

### 2.2.1 穩態火源(Steady fire)

在自然狀態下火源是非穩態的，但將其理想化成穩態的火源比較容易描述及研究，一個穩態的火源在熱釋放率的定義上是為一定值。在應用上，通常採用穩態的火源做為明確且保守的設計。Morgan(1979)建議將商業、住宅區每單位樓層面積之熱釋放率視為 $500\text{kW/m}^2$ ( $44\text{Btu/s-ft}^2$ )，而辦公室建築每單位面積之熱釋放率視為 $225\text{kW/m}^2$ ( $20\text{Btu/s-ft}^2$ )，在特殊大空間建築中，則將擁有可燃物之大空間建築每單位面積之熱釋放率視為 $500\text{kW/m}^2$ ( $44\text{Btu/s-ft}^2$ )，而可燃物有限之大空間建築，每單位面積之熱釋放率則視為 $225\text{kW/m}^2$ ( $20\text{Btu/s-ft}^2$ )。表 2-1 為特殊大型空間穩態火源設計的基準量。

表 2-1 特殊大型空間穩態火源設計的基準量

	kW	( Btu/s )
在大型空間中可燃物有限的最小火源	2000	( 1900 )
在大型空間中具有可燃物的最小火源	5000	( 4700 )
大型火源	25000	( 24500 )

## 2.2.2 非穩態火源 ( Unsteady fire )

火源之設計需考慮隨時間變化的熱輸出值，在火災的初期階段，火源可充分地使氣流流動，此時其熱釋放率由燃燒物體之型式數量及外型輪廓來決定，由國外文獻所收集可得不同物質之最大熱釋放率與所需時間如表 2-2 所示。由於火源的蔓延非常快，一但當火源擴大至屋頂時，閃燃 ( Flashover ) 即會發生，此時整個區域的火勢即發展完成，且煙會大量產生，此刻的煙控系統則無法發揮效用了，但是如果火源發生在大空間鄰接的小區域內，適當的煙控系統設計仍可將閃燃後經由門或窗進入大空間的煙流控制下來以避免煙流無限制的擴大。因此，火源開始燃燒到發生閃燃前的這段成長期則可說是消防工程設計的關鍵時期，此時的偵煙感測器、灑水頭及其它煙控系統必須能適時作動，人員的逃生避難也必須在此期間完成。因此，又將火源的設計分為 ( 1 ) 閃燃前的火源、( 2 ) 閃燃後的火源。

表 2-2 不同物質之最大熱釋放率與所需時間

火源燃燒種類	火源等級	最大熱釋放率 ( kW )	所需時間 ( s )
紙類	慢	18	400
電器類	中	290	640
棉織品	中	117	240
木材類	大	650	70

### ( 1 ) 閃燃前的火源

火源在潛伏期內燃燒的熱釋放率非常低，當火源成長至一臨界點後，其熱釋放率會與時間的冪次方成正比，所假設的火

源熱釋放率如下列方程式所示：

$$Q = \alpha(t - t_e)^n \quad (2.1)$$

其中  $Q$  : 火源的熱釋放率 ( kW )  
 $\alpha$  : 火源的成長係數 ( kW/s<sup>2</sup> )  
 $t$  : 開始燃燒之時間 ( s )  
 $t_e$  : 有效的著火時間 ( s )  
 $n$  : 1,2,3,

而在特殊大空間建築之煙控系統中，潛伏期並非必要考慮之因素，且大多數的燃燒火源（除了可燃液體和其他物質外），其熱釋放率隨時間變化的關係，可利用理想化的拋物線方程式來表示，也就是將式（2.1）中的  $n$  取 2 並且加入不同火源成長時間的觀念成為如下列方程式所示：

$$Q = \alpha t^2 = 1000 \cdot \left( \frac{t}{t_g} \right)^2 \quad (2.2)$$

其中  $t$  : 有效燃燒後的時間 ( s )  
 $t_g$  : 典型火源成長時間 ( s )

將此式稱為 "T-squared Fires"，NFPA92B ( 1991 ) 廣泛的使用成長時間的觀念，成長時間  $t_g$  定義為有效燃燒成長至 1055kW ( 1000Btu/s ) 以後之時間。特殊大空間建築物中因火源防護之作用或燃燒空氣之缺乏，其熱釋放率便會至一臨界點後停止成長，而後其熱釋放率可視為常數，不同的熱釋放率之火源成長曲線如圖 2-2 所示。而 T-squared 的火源依火源成長速率又可區分成 Ultra-fast、Fast、Medium 及 Slow 四種成長曲線，各種型的火源成長係數與成長時間如表 2-3 所示，及各種火源成長型

式的各類替代物質如圖 2-3 所示。

表 2-3 火源成長模式之係數

T-squared Fires	成長係數		成長時間
	$\alpha(\text{kW/s}^2)$	$\alpha(\text{Btu/s}^2)$	$T_g(\text{s})$
緩慢(Slow)	0.002931	0.002778	600
普通(Medium)	0.01127	0.01111	300
快速(Fast)	0.04689	0.04444	150
極快速(Ultra Fast)	0.1878	0.1778	75

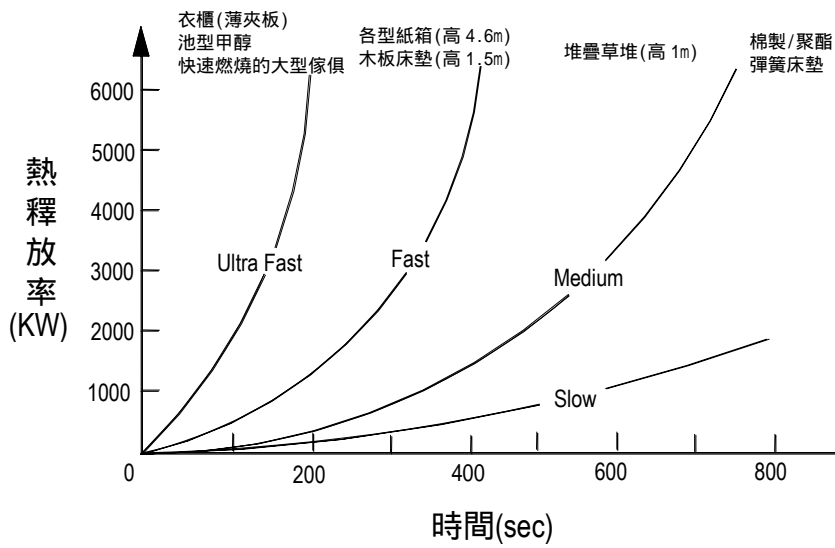
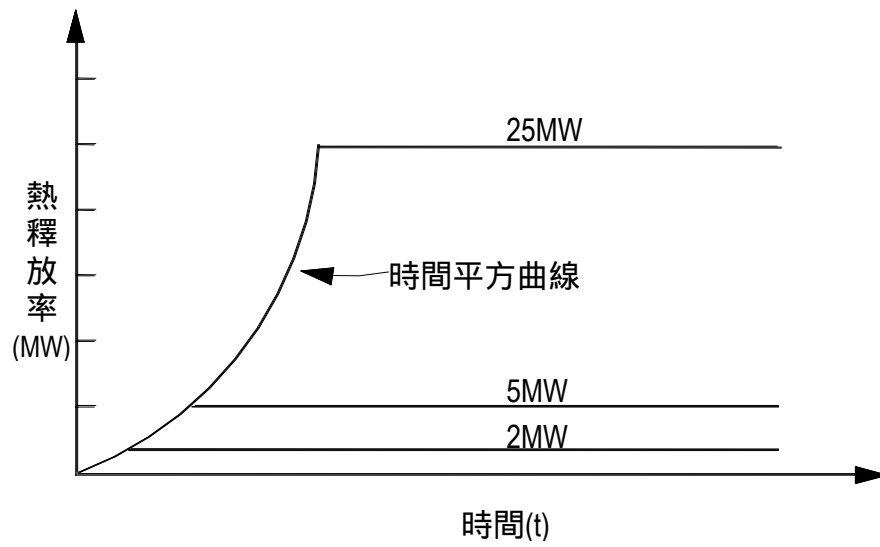


圖 2-2 不同的熱釋放率之火源成長曲線

圖 2-3 各種火源成長型式的各類替代物質

## (2) 閃燃後的火源

此種情況的熱釋放率為

$$Q = H_c R \quad (2.3)$$

其中  $H_c$  : 單位質量燃燒熱(kJ/kg)  
 $R$  : 單位時間燃燒質量(kg/s)

上述中的  $R$  可定義為

$$R = 0.02 \cdot \left[ A_0 \cdot (h_0)^{\frac{1}{2}} \cdot (A_r - A_0) \cdot \left( \frac{w}{d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

其中  $A_0$  : 空間中空氣可流入之開口 (窗或門) (  $m^2$  )  
 $h_0$  : 開口之高度 (  $m$  )  
 $A_r$  : 空間中所涵蓋的面積 ( 牆、地板、天花板 ) (  $m^2$  )  
 $w$  : 開口部之牆寬度 (  $m$  )  
 $d$  : 開口部之牆深度 (  $m$  )

上述公式從實際實驗木屋而得，不過該式仍可運用於大部份型態的火源負載(Fire load)。通常火源負載一般可換算成等重量之木材，火源負載可以以 MJ 或 MJ/m<sup>2</sup> 表示，也可以用 kg 或 kg/m<sup>2</sup> 之木材來表示。

當火源負載過小時，方程式 ( 2.4 ) 可能導致  $R$  值之高估，因此在典型裝潢之居室、辦公室及購物中心我們可假設一般火源可在 20 分鐘內控制住時， $R$  可以以下式來加以修正：

$$R = \frac{L}{1200} \quad (2.5)$$

其中  $L$  : 為總火源負載 ( kg )

## 2.3 煙層流動特性

當建築物發生火災，在火災區域形成一高溫煙氣火場，若氧氣供給不充分，物質燃燒不完全，必產生大量的固體微粒，而熱空氣之比重較周圍冷空氣低，所以形成一明顯的上升氣流，尤其在建築物之垂直通道內，隨著氣流移動，使高溫高熱之煙流快速擴散到建築物內每一角落。

於建築物火災中產生的煙和高溫氣體流動有兩個主要因素：

- (1) 煙層本身的流動性：這是因為所包含的高溫氣體比周圍空氣的密度低。
- (2) 建築物內空氣流動：雖然與火完全無關，但因空氣的流動，而會將煙送至建築物內各處。

這兩個因素作用的相對大小，取決於建築物中不同的情況，通常靠近火場的地方，煙層本身的流動性將處於支配地位，而相反的，距離火場較遠的地方，建築物內空氣流動就變得相當重要。

由以上兩主要因素，可得知建築物內造成煙層流動的驅動力，可分為以下六種：

- (1) 煙囪效應：因建築物內部空氣與室外空氣溫度不同產生壓力差所造成。在建築物內部垂直通路之空氣產生上升稱之為正煙囪效應 ( Normal stack effect )，若產生下降的流動則稱為反煙囪效應 ( Reverse stack effect )，這因素取決於建築物內部空氣與室外空氣的溫度差異高低。
- (2) 煙的熱浮力效應：因火焰上方的高溫氣體與周圍冷空氣之間的密度不同，由於煙的密度較低，因此會產生向上之浮力。
- (3) 氣體熱膨脹效應：由於燃燒所產生的高溫使氣體膨脹，若常溫 300K 時體積為 1 倍，則在 600K 時體積即變成 2 倍，在 900K 時體積即變成 3 倍，以此類推。



- (4) 風的影響效應：在建築物不同方位之開口，因風向的關係，便有不同的壓力。當建築物所有門窗或開口部都緊閉時，風的影響便極輕微，但所有建築物都有或大或小的孔隙，如：門縫，窗縫等，這些孔隙將因風的影響，使建築物內部的空氣產生流動。
- (5) 機械通風系統：由於現有建築物以密閉空間居多，大都採用空調通風系統，尤其是中央空調系統通達各樓層，一但某一樓層發生火災，所產生之煙霧，便利用回風與送風風管，將煙傳送到很遠的地方。另一方面，空調系統也正被設計成為煙控的管道，利用防火、防煙閘門 ( Damper ) 控制煙之流動，或利用空調風管進行排煙，使空調系統發揮更大的功用。
- (6) 電梯活塞效應：把電梯看成是一個活塞，在昇降機間移動，將空氣吸入與排出而產生氣流，當電梯上下移動時，所形成之壓力差，很容易將起火樓層之煙流吸入昇降機間，而將煙擠壓至非起火樓層。

在這六項影響煙層流動的因素當中，熱浮力效應與氣體熱膨脹效應為煙流之高溫所引起的，煙囪效應與自然風則受外界的環境影響，另外，空調系統與電梯活塞效應則為建築物內部設施所引起。

## 2.4 煙沉降率與煙沉降高度

由於實驗中無法直接取得煙層的變化高度，依據 Cooper [25] 所使用的 N-percent method 探討煙層與溫度的關係，可依火場中的溫度變化來推估煙層的沉降高度，其說明如下：

當火源點燃後，任一時間每一組熱電偶中量得溫度最高者減去該熱電偶的環境溫度，

$$\Delta T_{ref}(t) = \max[T(z_{all}, t)] - T_{amb}(z_{all}) \quad (2.6)$$

其中  $\Delta T_{ref}(t)$  : 煙層下降至測點的溫度與環境溫度的溫差( )

$T(z_{all}, t)$  : 煙層至某測點的溫度( )

$T_{amb}(z_{all})$  : 當時所在的环境溫度( )

假設  $T_{amb}(z_{all}) = T(z_{all}, t = 0)$

如熱電偶所測得在時間  $t = 0$  時的溫度可假設為當時的還境溫度，則 (2.6) 式可改寫為：

$$\Delta T_{ref}(t) = \max[T(z_{all}, t)] - T(z_{all}, t = 0) \quad (2.7)$$

依據 N-percent method 的理論，在時間  $t$  下熱電偶中有一溫度升高  $\frac{N}{100} \Delta T_{ref}(t)$  即：

$$T(z_i, t) - T_{amb}(z_i) \geq \left[ \frac{N}{100} \Delta T_{ref}(t) \right] \quad (2.8)$$

則此時即可判定煙流已沉降至該熱電偶高度位置，如圖 2-4 所示。

N 的假設值 (N=10、15、20) 在國內外的期刊與論文中都有相當詳細的說明，一般而言，N 取的越小則對煙控設計較為保守與安全。

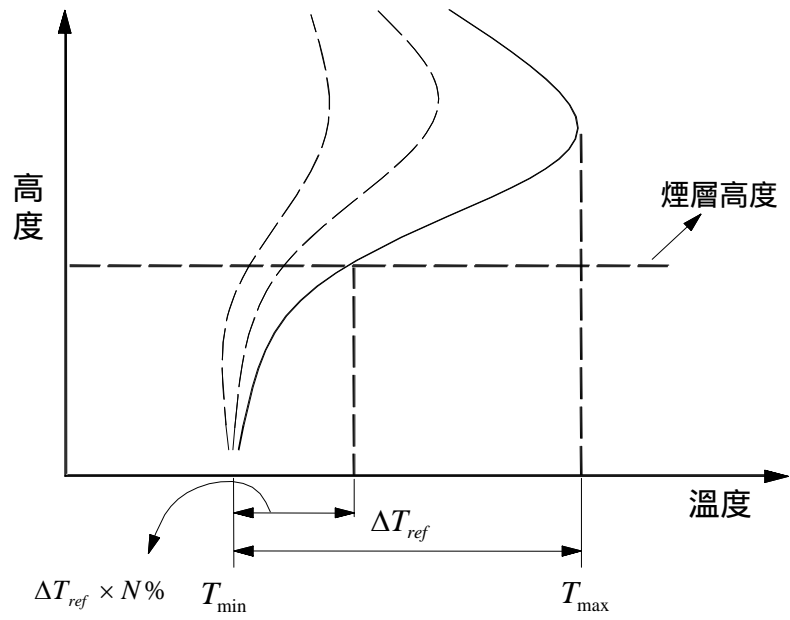


圖 2-4 N-percent method 示意圖

## 第三章 撒水設備之特性

### 3.1 撒水設備之功能與分類

事實上，撒水頭種類繁多，其撒水量、反應時間、撒水範圍皆不相同，須視空間規模、室內火災發生型態、熱釋放率，以及逃生可用時間來選設。

一般而言，依撒水作動系統方式可分為：(1) 密閉濕式系統、(2) 密閉乾式系統、(3) 預動式系統、(4) 開放式系統。其原理分別如下：

- (1) 密閉型濕式撒水系統：平時管內貯滿高壓水，作用時即撒水。
- (2) 密閉型乾式撒水系統：平時管內貯滿高壓空氣，作用時先排空氣，繼即撒水。適用於寒冷地區管線內之貯水有結冰之虞時。
- (3) 密閉型預動式撒水系統：平時管內貯滿低壓空氣，以感知裝置（火警探測器）啟動一齊開放閥，讓水流入二次側配管待命，俟撒水頭動作時，立即撒水。由於採雙層確認知撒水方式，可有效防止水損，故可適用於電腦等精密電器室。
- (4) 開放式撒水系統：平時管內無水，作用時由火警探測器或感知撒水頭自動或手動啟動控制閥，使水流入管系，繼即撒水。撒水時係整個放水區域同時開放。適用於密閉式撒水設備無法有效滅火或有火勢會迅速擴大之虞之場所，如戲院、戲劇場挑高的舞台部分。

各系統之作動順序，以及其適用建築物類型如表 3-1 所列。

表 3-1 撒水系統種類適用場所及動作順序

系統種類	動作順序	適用場所
密閉濕式系統	撒水頭熱感測元件熔開 撒水	不結冰地區建築物
密閉乾式系統	撒水頭熱感測元件熔開 釋氣 水泵水閥打開 撒水	小規模建築物
密閉預動式系統	探測器感知 水泵水閥打開 撒 水頭熱感測元件熔開 撒水	電腦機房、售物商店、電 信機房(怕水物品之場所)
開放式系統	探測器感知 水泵水閥打開 撒 水	影劇舞台、飛機棚廠、易 燃液體置放場

### 3.2 撒水頭的分類

自動撒水設備撒水頭，其噴出的水首先撞擊到迴水板後，才向四面八方噴撒出去。撒水頭依感熱元件的有無可分為密閉式與開放式兩種。另依設置方向之不同又可分為向下型、向上型、上下兩用型及側壁型等四種。

#### 向上型撒水頭

迴水板安裝於上方，向下方撒水。

#### 向下型撒水頭

迴水板安裝於下方，向下方撒水。

#### 上下兩用型撒水頭

迴水板可安裝於上方、下方，向上下兩方撒水。

#### 側壁型撒水頭

只向水平方向某一邊撒水，主要係作為防止開口部如門扉的延燒。

#### 密閉型撒水頭

於發生火警時，溫度上升達某一設定溫度時感熱元件會作動，並自動撒水。通常略稱為撒水頭者即係表示“密閉型撒水

頭”，它係構成“密閉型撒水設備”的重要部分。

密閉型撒水頭只要達設定溫度，即能自動撒水的主要方式有兩種。第一種是採用眾人耳熟能詳的“熔絲”，設定於某一高溫即能自動熔化的方式。於撒水頭裝設熔絲，因火災產生的高熱而使熔絲熔化掉，牽動平衡桿來開啟噴水口，噴出的加壓水衝擊到迴水板，就會似下大雨般的撒下大量的水。

第二種是採用“玻璃球”作為感熱元件，球體中封入酒精或乙醚，利用酒精受高熱影響等會急速膨脹，造成玻璃球破裂而撒水的一種系統。

總之，密閉型撒水頭是隨溫度而動作，所以需預先設定此撒水頭作動的標定溫度（感熱而撒水）“熔絲”方式的撒水頭，其標定溫度之公差為 $\pm 3$  的程度。而“玻璃球”方式者，則在 - 5 + 15 範圍內或作動的程度。

### 開放型撒水頭

不具有感熱元件，其噴水口經常保持開放狀態。它係由火警探測器等動作來連動一齊開放閥的開啟，或是火警時以手動方式開啟一齊開放閥，而使全部撒水頭一齊噴出大量的水。



圖 3-1 各種形式之撒水頭

### 3.3 撒水頭的作動

撒水頭的作動主要受到火場溫度與熱煙氣柱的影響。在火場中，熱煙氣產生之後會往上竄升至天花板，並且很快的擴散，而這些裝置在天花板的撒水頭也會很快的被熱煙氣所包圍。

撒水頭含有一個熱感測元件 (link)，此熱感測元件以對溫度變化反應較靈敏之材質製作，當熱煙氣到達撒水頭位置時，熱感測元件會被迅速的加熱直到損壞。當熱感測元件損壞之後，撒水頭就會作動，將加壓水噴灑到火場空間中，並將火勢撲滅。

從起火到撒水頭開始作動這段延遲的時間取決於下列幾個參數，包含撒水頭相對於火源的位置，空間的尺寸，燃燒物的熱釋放率，以及撒水頭的靈敏度。而撒水頭的靈敏度取決於熱感測元件的材質與尺寸，假設其它的條件皆相等，則撒水頭的靈敏度與熱感測元件損壞所需的時間成反比。因此撒水頭一般以 FMRC(Factory Mutual Research Corporation)所提出之感應時間指數 RTI(Response Time Index)作為分類標準，用來判斷撒水頭對於火災反應的快慢程度。

如圖 3-2 所示，將撒水頭的熱感測元件假設為一個圓柱，並垂直放置在天花板下幾公分處，這些元件的尺寸都很小（直徑約 6-10mm，長度約 20mm）但具有相當高的熱傳導性。因此，熱感測元件的能量平衡可以以下式表示：

$$m_l c_p \frac{d(T_l)}{dt} = q_{conv} + q_{cond} + q_{rad} \quad (3.1)$$

其中  $m_l$  : 熱感測元件之質量 (kg)  
 $C_p$  : 熱感測元件之比熱 (kJ/kg.K)  
 $T_l$  : 熱感測元件之溫度 ( )

下標 "l" 代表撒水頭之熱感測元件， $q_{conv}$ 、 $q_{cond}$  和  $q_{rad}$  分別代表對流、傳導與輻射熱傳。

一般而言，在火災發生初期火勢不會很大，所以輻射熱可以忽略不計。而根據 Heskestad 和 Bill (1998) 的研究，熱傳導的影響可視為定量，但是熱傳導相對於熱對流又可省略，因此 (3.1) 式可簡化成：

$$m_l c_p \frac{d(T_l)}{dt} = q_{conv} = hA(T_g - T_l) \quad (3.2)$$

下標 "g" 代表熱煙氣，"h" 為對流熱傳係數 ( $kw/m^2.K$ )。

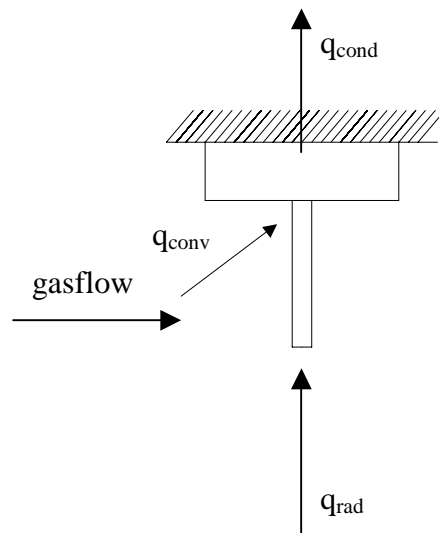


圖 3-2 撒水頭與熱煙氣之熱傳示意圖

將熱感測元件之圓柱直徑  $D$ 、長度  $L$  以及 Nusselt number ( $Nu = hD/k_g$ ) 帶入方程式 (3.2) 中，可以得到：

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{4 k_g \alpha_s Nu}{\pi k_l D^2} (T_g - T_l) \quad (3.3)$$

熱感測元件與熱氣流間的相互作用可以視為圓柱在 cross-flow 的情況，因此對流熱傳的作用可以將 Nusselt number



以 Reynold number 和 Prandtl number 表示，

$$Nu = C_1 Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad (3.4)$$

Re 和 Pr 分別為，

$$Re = \frac{UD}{v_g} \quad (3.5)$$

$$Pr = \frac{v_g}{\alpha_g} \quad (3.6)$$

U 為氣流速度，在 cross-flow 中  $C_1$  大約為 0.52，因為實際情況與 cross-flow 的邊界條件不同，因此不採用此數值，而選擇使用實驗數據來計算此常數值。

將方程式(3.4,3.5,3.6)帶入方程式(3.3)中可以得到下式：

$$\frac{dT_l}{dt} = \left[ C_2 \frac{k_g}{k_l} \frac{\alpha_l}{\alpha_g} v_g^{-0.5} Pr^{-0.6} D^{-3/2} \right] \sqrt{U} (T_g - T_l) \quad (3.7)$$

$C_2 = (4/ \quad ) C_1$ 。中括弧內的數值為熱感測元件幾何形狀和熱感測元件、流體之熱力性質的函數。對於同一個撒水頭，在一定的溫度範圍內，此項可以視為常數。此項的倒數為撒水頭之 RTI 值：

$$RTI = C_3 \frac{k_l}{k_g} \frac{\alpha_g}{\alpha_l} v_g^{-0.5} Pr^{0.6} D^{3/2} \quad (3.8)$$

因此熱感測元件之暫態能量平衡可以表示為：

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{U} (T_g - T_l)}{RTI} \quad (3.9)$$

將上式積分並帶入初始條件  $T_l(t=0)=T_{l,0}$ ，可以得到下式：

$$T_g - T_l(t) = (T_g - T_{l,0}) \exp\left[-\frac{\sqrt{U}}{RTI} t\right] \quad (3.10)$$

RTI 之單位為  $(\text{ms})^{1/2}$ 。當撒水頭的 RTI 值很高，則對周圍熱煙氣的反應較慢，因此從起火到撒水頭開始作動需要較長的時間。相反的，假如撒水頭的 RTI 值很小，可能微小的熱源就會啟動撒水頭，這種結果也是相當不好的，因為這樣可能會造成不必要的水害。一般撒水頭的 RTI 值範圍約在 100 400 $[\text{m}^{1/2}\text{sec}^{1/2}]$ 。

### 3.4 撒水設備滅火的有效性和滅火機制

自動撒水設備滅火的有效性取決於水滴是否能夠到達火源位置並將火撲滅。因此，從撒水頭所噴撒出的水滴的狀態，如水滴尺寸大小、噴撒角度等，對於滅火的有效性是相當重要的。

相對於其它我們所認識用來滅火的液體水是較有效的，水能夠有效的滅火主要是因為水具有相當高的蒸發潛熱，如圖 3-3 所示。將一公升的水由 0 加熱到 100 ，需要提供 418kJ 的熱能；將水蒸發（溫度不變）則需要提供 2257kJ 的熱能。水的沸點遠低於固態易燃物的分解溫度(250 到 450 )，因此可以藉由蒸發有效的降低溫度。然而，水並不是一個絕對完美的滅火劑，因為水會在 0 時結凍，會導電，而且並非所有的火災都能用水來滅火，例如：油類火災或者是會與水產生劇烈反應的金屬或化學藥品。

水滅火的方式為，冷卻燃燒的物體與火焰，並產生蒸氣以阻止氧氣接近燃燒物並吸收輻射熱，而其中最重要的就是冷卻燃燒的物體，也就是直接撲滅火源。當一個固體在燃燒時，必

處於高溫下並且有火焰的發生。假如具有高蒸發潛熱的水能夠到達燃燒的地方，當水蒸發時會帶走相當多的熱量，則會使燃燒速率減緩甚至熄滅。

在許多的情況中，水的冷卻影響也是一重要的因素。為了能夠有效降低火場溫度，其水滴的尺寸必須相當微小，而且水量需要足夠使用於整個的火場中。當水被分離為微細的小水滴時，則每單位體積的水的表面積會顯著的增加，這對於火場溫度的冷卻是相當有利的。因為水的蒸發速率和冷卻效率是與表面積成正比的。但是在實際的情況中，其水滴的尺寸有最低的限制，如果水滴的尺寸都相當細小，只會被迅速的蒸發，再加上水滴本身所擁有的動能不足，因此無法穿過火焰到達燃燒物的表面，無法有效的滅火，而最有效的滅火方式就是將水滴直接噴撒在燃燒物體表面。

而我們可將水滴依尺寸大小分成三種類型。熱氣會蒸發最小的水滴，熱煙氣的溫度會因此而降低，所以也限制了火的向外擴張蔓延；較中型的水滴能夠落在火源周圍未燃燒的區域，先澆濕了未燃燒的物體，這也再次的限制了火的擴張；只有較大的水滴能夠有足夠的能量去穿越煙層與火焰，而直接撒在真正燃燒的物體表面。

撒水頭滅火降溫的程度，則視撒水量的大小及自動撒水頭反應之靈敏度來決定。雖然撒水頭放水量的大小有法令規定(法規規定撒水頭之放水量為  $80 \text{ l/min}$ )，但在實際的火場中，撒水頭放水量的大小並不是最重要的，而是視有多少水進入火柱區，即我們所重視的是水的實際投射密度 (Actual Delivered Density)，此為水達到火源底部的密度，這是由於起火源之火柱區上方有一強大的浮力效應，使得水滴很難靠近，此將使撒水頭之滅火降溫的效果大打折扣。因此除了放水量外，撒水頭設置的位置也值得我們討論。

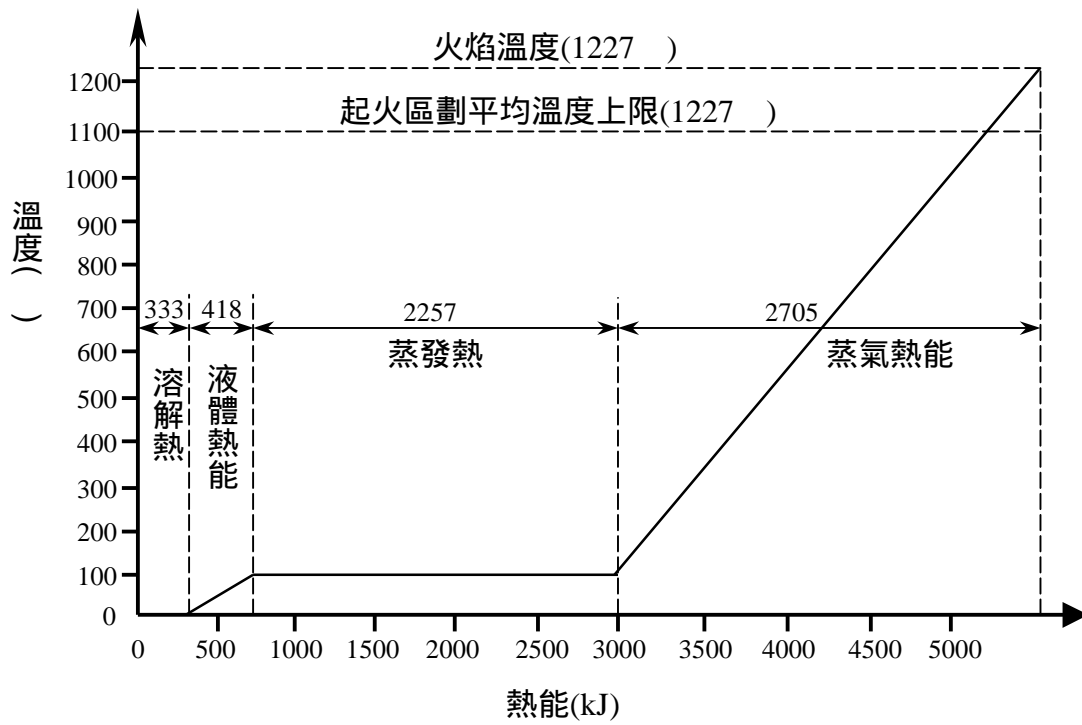


圖 3-3 水的相變化與熱能的改變量(容量為 1 l)

## 第四章 電腦火災數值模擬之模式架構簡介

利用數值方法來研究火災動力學的構想可以追溯到電腦剛開始發展的時候，當然，流體動力、熱傳及燃燒等基本的守恆方程式在上一世紀就已推導出來。但由於一些複雜的問題，使得實際的火災數值模式一直到近代才有所發展。

這些困難點有三：(1) 由於火災大都是偶發事件，因此必須考量大量的火場情境。(2) 由於要觀察火災時其物理現象的變化，包括空氣動力學、多相流、紊流、燃燒、輻射與熱傳等，因而需要功能相當強大的電腦，而在早期電腦的計算能力較不足，因此大部分的火災情境都會有所限制。(3) 在大多數的火災中，“燃料”是無法預期的。因此在進行數值模擬時輸入的資料只能對燃料作大約的描述。

為了更進一步發展，提出的問題必須要單純化。首先，必須要先尋找出一個可以應用在所有火場問題方法，然後開始尋找一些易於分析的情境。希望經由發展這些較簡易問題的研究，使得更多的複雜情況可以被分析。再來，我們必須學習度過這些火場的理想化敘述及接近理想化方程式的解決方法。最後，這些方法應該是可已有系統的改善，隨著我們對物理現象的理解與電腦計算能力的增強，數值分析方法也可以變的更加完善。

至今，已發展出三個不同的火場模擬模式，都是三維空間的火場隨時間變化的模式。最早發展成熟的是所謂的“區域 (Zone)”模式，它將火場中的每一個部份均勻分成上下兩個區劃空間，一個是上半部的熱煙層，一個是下半部的冷空氣層，在每一個區劃空間中的質量與能量達到平衡，另外使用微分與代數方程式來描述其它的物理現象，這些現象包括火柱、孔道間的氣流流動與輻射對流熱傳等。

由於區域模式較簡單的物理現象與電腦計算，使得區域模

式廣泛使用在火災情境分析，只要對空間內分佈的細部物理性質不要求，而且對於兩區劃的描述只要近似於真實情況即可，則區劃模式算是相當可靠。然而，由於區劃模式非常簡單，因此無法作有系統的改善。

由於電腦功能快速的成長因而發展出計算流體力學 CFD (Computer Fluid Dynamics)，並且將以“場域 (Field)”模式為基礎之 CFD 火災研究問題上。使用 CFD 模式可以用複雜的幾何來描述火災，並將變化大的物理現象加以整合。它的理論運算方式是將火場分割成無數的小格點，再以質量、動量、能量、燃燒與熱傳守恆等統御方程式 (Governing equation) 求解構成。

本研究電腦模擬分析部分所使用的軟體即是由 NIST/BFRL (美國國家標準暨技術協會火災實驗室) 所發展出的 CFD 火災模擬軟體，FDS (Fire Dynamics Simulator)。

由於本研究是以實驗為主，電腦模擬分析為輔，實驗所得之數據將與電腦模擬所得之結果相比較進行分析，在比較過程中，相關的參數與條件設定皆須一致，因此有必要先了解在 FDS 中有關撒水頭的參數設定與分析方法。

#### 4.1 FDS 之撒水模式分析

FDS 主要是以 LES (Large Eddy Simulation) 為基礎的 CFD 火災模擬軟體，可用於模擬三維的火災情境，它將建築物空間分割為多個細小的格點，利用數值方法求解各個守恆之統御方程式，可較精確的預估火災發生時火場的壓力、溫度、速度與煙流流動等火災的物理數據，因此也更適合於形狀複雜的建築空間或大型建築物的火災模擬。

當使用 FDS 模擬撒水頭的作動與撒水後對火場所造成的影響時，可針對下列各項進行討論。

#### 4.1.1 撒水頭的作動

當要估算撒水頭內部之熱感測元件的溫度時，可以利用 Heskestad 與 Bill[26]所提出的差分方程式計算。在此方程式中有考慮輻射熱傳與氣流中的細小水滴（先前作動的撒水頭所噴撒出的水滴）對熱感測元件的冷卻影響。

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{|\mathbf{u}|}}{\text{RTI}}(T_s - T_l) - \frac{C}{\text{RTI}}(T_l - T_m) - \frac{C_2}{\text{RTI}}\beta|\mathbf{u}| \quad (4.1)$$

- 其中  $T_l$  : 熱感測元件(金屬熔絲或酒精玻璃球)的溫度( )  
 $T_s$  : 熱感測元件周圍的氣體溫度( )  
 $T_m$  : 撒水頭底座的溫度( )  
 $\beta$  : 水(液體)在氣流中所佔的體積百分比  
RTI : 撒水頭的感應時間指數  $(m/s)^{1/2}$   
 $C$  : C-Factor  $(m/s)^{1/2}$   
 $C_2$  : 經驗常數  $6 \times 10^6 K/(m/s)^{1/2}$  [27]

#### 4.1.2 水滴尺寸的分佈

在撒水頭作動後，從撒水頭噴撒出的水滴可能會掉落在燃燒的物體或地板上。為了計算水滴的移動軌跡，則每一個水滴的初始尺寸與速度都必須加以描述。水滴最初的尺寸分佈可以以累積體積百分比（Cumulative Volume Fraction, CVF）來表示。一般而言累積體積百分比可以藉由組合自然對數（log-normal）與 Rosin-Rammler 分佈[28]來表示。

$$F(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{\sigma d'} e^{-\frac{[\ln(d'/d_m)]^2}{2\sigma^2}} dd' & (d \leq d_m) \\ 1 - e^{-0.693\left(\frac{d}{d_m}\right)^\gamma} & (d_m < d) \end{cases} \quad (4.2)$$

其中  $d_m$  : 水滴的中線直徑（median droplet diameter）

$\gamma$  : 經驗常數 (大約等於 2.4)

$\sigma$  : 經驗常數 (大約等於 0.6)

所謂中線直徑  $d_m$  是指由撒水頭所噴灑出的水滴中，水滴直徑小於  $d_m$  (或等於) 的水滴的質量總合佔全部水滴質量的 50%。 $d_m$  為撒水頭孔口直徑、操作壓力與幾何形狀的函數。在 Factory Mutual 所作的研究中有得到一個與  $d_m$  相關的關係式：

$$\frac{d_m}{D} \propto We^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

其中  $D$  : 撒水頭孔口直徑

$We$  : Weber number

Weber number 為慣性力與表面張力之比，

$$We = \frac{\rho_w u^2 D}{\sigma_w} \quad (4.4)$$

其中  $\rho_w$  : 水的密度 ( $kg/m^3$ )

$u$  : 水從撒水頭噴撒出的速度 ( $m/s$ )

$\sigma_w$  : 水的表面張力 ( $72.8 \times 10^{-3} N/m$  at 20 )

$u$  為撒水頭操作壓力和 K-factor 的函數，它可以由質量流率來計算。

在數值演算法中，將水滴的尺寸分布視為 Rosin-Rammler/log-normal。水滴直徑的或然率密度函數 (PDF, Probability Density Function) 可以由下列方程式定義：

$$f(d) = \frac{F'(d)}{d^3} \bigg/ \int_0^{\infty} \frac{F'(d')}{d'^3} dd' \quad (4.5)$$

水滴的直徑可以藉由累積數目百分比 (Cumulative Number Fraction, CNF) 與均勻分布隨機變數  $U$  的等式來隨機選擇。



$$U(d) = \int_0^d f(d') dd' \quad (4.6)$$

圖 4-1 顯示典型累積體積百分比 (Cumulative Volume Fraction) 與累積數量百分比 (Cumulative Number Fraction) 的函數關係。

數值模擬時，並非從撒水頭所噴灑出的每一個水滴都會被追蹤紀錄，通常只有部分的水滴會被追蹤紀錄。一般而言，每個撒水頭每秒可噴灑出 1,000 個水滴，如果水滴的直徑為隨機選擇，則會浪費太多的 CPU time 來追蹤記錄較小的水滴，較大且帶著大多數水量的大水滴，在整體樣本中反而會低於適當的比例。為了補救這個問題，將均勻分布隨機變數  $U$  轉換成函數  $g$  的型式：

$$g(U) = U^{1/n} \quad (n > 1) \quad (4.7)$$

現在整體樣本數中，大水滴會佔較大的數目，但是可藉由一個係數來降低大水滴的重量因子，

$$g'(U) = \frac{1}{n} U^{1/n-1} \quad (4.8)$$

選擇水滴尺寸的步驟如下：

- (1) 假設水離開撒水頭的質量流率， $\dot{m}$ 。
- (2) 假設數值模擬的時間間隔  $\delta_t$ ，與每個時間間隔內水滴射出的數量， $N$ 。
- (3) 在 0 到 1 之間選擇均勻分佈隨機數目，令作  $U_i$ 。
- (4) 依照 (4.7) 式作轉換。
- (5) 由 (4.6) 式得到水滴的直徑， $d_i$ 。
- (6) 由質量平衡計算重量常數， $C$ 。

$$\dot{m}\delta_i = C \sum_{i=1}^N g'(U_i) \frac{4}{3} \pi \rho_w \left( \frac{d_i}{2} \right)^3 \quad (4.9)$$

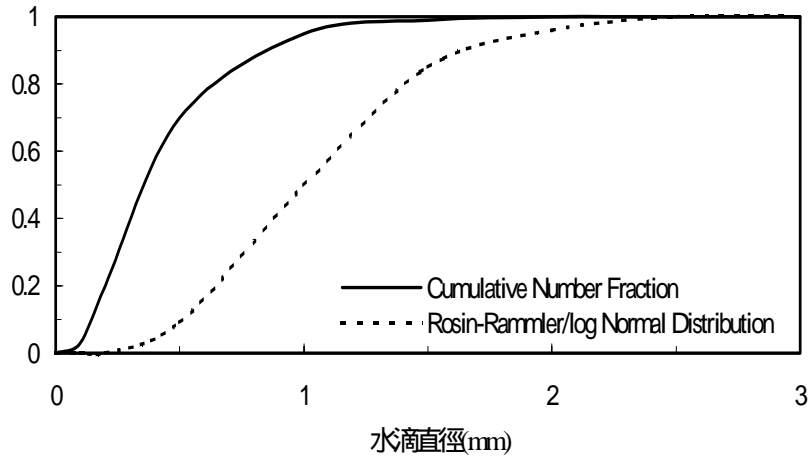


圖 4-1 水滴尺寸分布之 CVF 與 CNF 函數圖 (  $d_m = 1 \text{ mm}$ ,  $\sigma = 0.6$  與  $\gamma = 2.43$  . )

#### 4.1.3 水滴在空氣中的移動軌跡

水滴與空氣間的動量轉換可以由動量守恆方程式中的外力項  $\mathbf{f}$  來表示。它表示在格點內的每一個水滴中外力轉換與格點體積散度的總和。

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2} \frac{\sum \rho C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g|}{\delta_x \delta_y \delta_z} \quad (4.10)$$

- 其中
- $C_D$  : 拉曳力係數
  - $r_d$  : 水滴半徑 (  $m$  )
  - $\mathbf{u}_d$  : 水滴速度 (  $m/s$  )
  - $\mathbf{u}_g$  : 氣體速度 (  $m/s$  )
  - $\rho$  : 氣體密度 (  $kg/m^3$  )
  - $\delta_x \delta_y \delta_z$  : 網格點的體積 (  $m^3$  )

單一水滴的軌跡可以由下列方程式求得：

$$\frac{d}{dt}(m_d \mathbf{u}_d) = m_d \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g| \quad (4.11)$$

其中  $m_d$  : 水滴質量 ( kg )

拉曳力係數為局部 Reynolds number 的函數 ,

$$C_D = \begin{cases} 24/\text{Re} & \text{Re} < 1 \\ 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687})/\text{Re} & 1 < \text{Re} < 1000 \\ 0.44 & 1000 < \text{Re} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_g| 2r_d}{\mu} \quad (4.13)$$

其中  $\mu$  : 氣體的動黏滯係數 ( kg / s · m )。

#### 4.1.4 水滴的質量與能量轉換

對於水滴蒸發的處理為採用半經驗式。當一個水滴懸浮在空氣中時會被蒸發，而此蒸發現象是以水滴平衡時之蒸氣質量百分比、局部氣相蒸氣質量百分比、傳送到水滴之熱傳量，以及水滴相對於氣體之運動為函數。一個包含上述參數的水滴質量損失關係式[29]如下所列：

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi r_d \text{Sh} \rho D_f (Y_d - Y_g) \quad (4.14)$$

其中  $m_d$  : 水滴的質量 ( kg )

$D_f$  : 水蒸氣進入空氣時的擴散係數

$Y$  : 水與蒸氣之質量百分比

$\text{Sh}$  : 水滴的 Sherwood number

下標  $d, g$  分別代表水滴與氣體。

Sherwood number ( Sh ) 可以由 Reynolds number ( Re ) 與 Schmidt number ( Sc ) 的關係式決定：

$$\text{Sh} = 2 + 0.6 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}} \quad (4.15)$$

$Y_g$  : 氣體中的蒸氣質量百分比

$Y_g$  可以由質量守恆方程式求得，而  $Y_d$  可以由 Clausius-Clapeyron 方程式求得：

$$X_d = \exp \left[ \frac{h_v M_w}{R} \left( \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_d} \right) \right]; Y_d = \frac{X_d}{X_d (1 - M_a / M_w) + M_a / M_w} \quad (4.16)$$

其中  $X_d$  : 水滴中水與水蒸氣之體積百分比

$h_v$  : 蒸發潛熱 ( J / kg )

$M_w$  : 水的分子量 ( kg / kmol )

$M_a$  : 空氣的分子量 ( kg / kmol )

$R$  : 氣體常數

$T_b$  : 水的沸點 ( )

$T_d$  : 水滴的溫度 ( )

除了計算因為蒸發的質量轉換以外，還要計算能量的轉換。對流熱傳會蒸發水滴表面的水分，而部分的熱會穿過水滴的表面並將水滴加熱：

$$m_d c_{p,w} \frac{dT_d}{dt} = A_d h_d (T_g - T_d) - \frac{dm_d}{dt} h_v \quad (4.17)$$

其中  $c_{p,w}$  : 水的比熱 ( kJ / kg · K )

$A_d$  : 水滴的表面積 (  $4\pi r_d^2$  ) (  $m^2$  )

$h_d$  : 熱傳係數 ( kW /  $m^2 \cdot K$  )

$$h_d = \frac{\text{Nu}k_a}{2r_d} ; \text{Nu} = 2 + 0.6 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (4.18)$$

其中 Nu : Nusselt number  
 $k_a$  : 空氣之熱傳導係數 (  $kW/m^2 \cdot K$  )  
 Pr : Prandtl number ( 0.7 for air )

#### 4.1.5 水對於火源的抑制

上面說明了水對於熱空氣或熱固體的熱傳，雖然對這些熱傳係數的值還是有些不確定，但是基礎的物理性質都已相當完整了，然而，當水滴碰到正在燃燒的表面時，簡單的熱傳關係就變得很難去應用，這是因為水不只是將表面與空氣冷卻，還改變了燃料的熱分解速率。如果燃料的表面是平面的，那就可以使用一個函數來描述熱分解速率降低的特性。很可惜地，大部分使用的燃料都有複雜的幾何形狀，無法以計算格點來解析它。

至今，在此領域的大部分工作都已在 FM 完成。1994 年 Yu et al.[30]對此主題作了一篇重要的論文，他考慮了許多不同幾何外形的重要火源、撒水的速率與一些抑制速率的重要參數的特性。他們經過分析之後，提出一個在撒水頭作動後火源總熱釋放率的關係式：

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 e^{-k(t-t_0)} \quad (4.19)$$

其中  $\dot{Q}_0$  : 在  $t_0$  時的總熱釋放率 (  $kW/m^3$  )  
 $k$  : 燃料相依常數 ( fuel-dependent )  
 $t_0$  : 撒水頭作動時間 (  $s$  )

FMRC 對於標準塑性物品之  $k$  值的定義為：

$$k = 0.716\dot{m}_w'' - 0.0131 \text{ s}^{-1} \quad (4.20)$$

其中  $\dot{m}_w''$  : 撞擊燃燒物的水的質量通量 (  $\text{kg} / \text{s} / \text{m}^2$  )

對於 Class 物品其  $k$  值為 :

$$k = 0.536\dot{m}_w'' - 0.0040 \text{ s}^{-1} \quad (4.21)$$

這個分析是以總體水流率與燃燒速率為基礎, (4.19) 不但說明無燃燒表面的冷卻, 也說明了燃燒表面的熱釋放率的降低。但是在 FDS 的模式裡, 非燃燒表面的冷卻與熱釋放率的降低是局部計算的, 因此 FDS 不適於使用整體的抑制定律。然而, 水之抑制自然指數可觀察局部與整體, 因此假設燃料的局部燃燒速率可以以下式表示 :

$$\dot{m}_f''(t) = \dot{m}_{f,0}''(t) e^{-\int k(t) dt} \quad (4.22)$$

其中  $\dot{m}_{f,0}''(t)$  : 當沒有撒水時每單位面積的火的質量通量  
(  $\text{kg} / \text{s} / \text{m}^2$  )

$\dot{m}_w''$  : 局部單位面積的水的質量 (  $\text{kg} / \text{m}^2$  )

$k(t)$  : 為  $\dot{m}_w''$  之線性函數

$$k(t) = a\dot{m}_w''(t) \text{ s}^{-1} \quad (4.23)$$

其中  $a$  : 經驗常數

## 4.2 Smokeview

Smokeview 為結合 FDS 的一個數據後處理軟體，可將 FDS 所計算出來的結果，利用 Open GL 繪圖軟體以圖形或 2D 與 3D 動畫的效果呈現。如圖 4-2 所示為 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖。

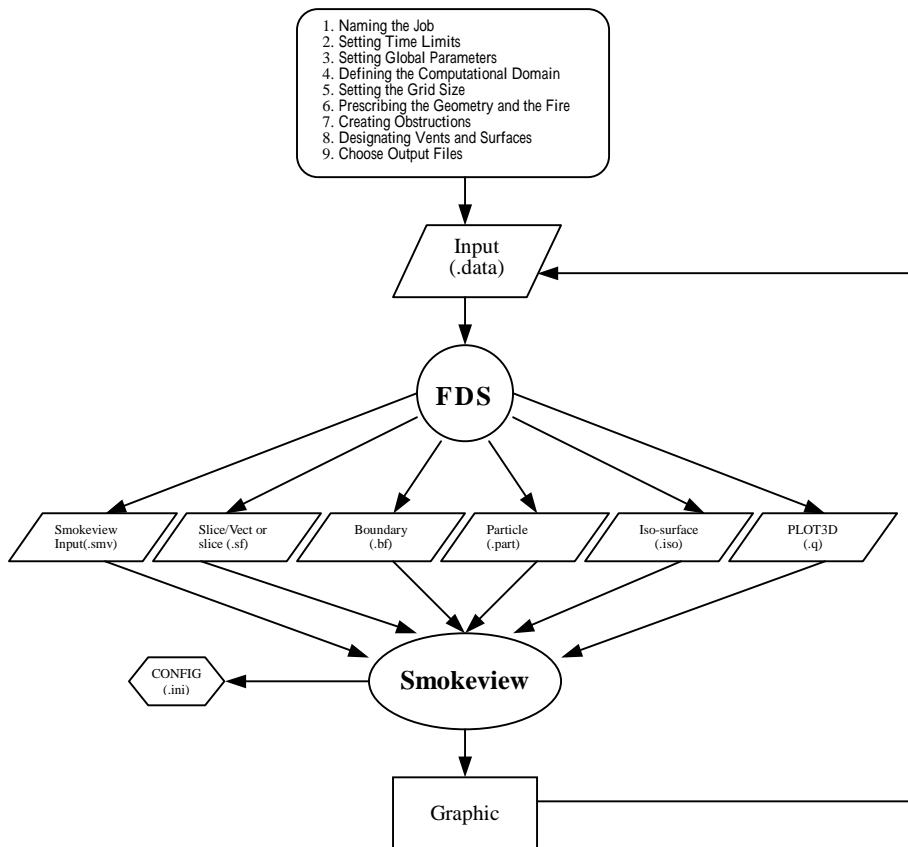


圖 4-2 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖

## 第五章 實驗計劃

實驗在本研究中佔相當重要部份，藉由實驗可實際瞭解在火場中撒水設備與排煙設備間的相互影響情形。而實驗所量測到之數據將與電腦模擬之模擬結果進行比較分析，以瞭解理論模式之可靠度，並作為修正模式參數之依據。

### 5.1 實驗設備

本研究之實驗部分將借助內政部建築研究所位於台南歸仁防火實驗群之實驗室進行，實驗場現場圖片如圖 5-1 圖 5-11 所示，實驗室平面圖如圖 5-12 所示。實驗中將以油盤火源進行煙層熱浮力變化、撒水頭作動時間之實測，同時排煙口之排煙效率也將進行測試。實驗設施規劃如下：

#### (一) 實驗空間

此實驗空間的尺寸為 12.0m×7.0m，天花板高度則為 3.0m。實驗空間使用可耐火隔熱的矽酸鈣板隔間，地板與矽酸鈣板間的縫隙並使用耐火塗料加以密封，避免熱煙氣從縫隙中流出，因而影響實驗的準確性。而由於當撒水頭作動後，噴灑出的水量相當的大，因此必須在地面挖設排水管，將噴灑出的水排出。

#### (二) 撒水設備

在此試驗中所使用的撒水頭為標準密閉式撒水頭，撒水頭作動溫度為 68℃，RTI( Response Time Index ) 為 80(  $m^{1/2}sec^{1/2}$  )，而撒水頭將裝設在天花板下 10cm。撒水頭的間距則為 3.0m×3.0m。

在此實驗區劃中，在各個不同位置皆有預設撒水口，可依照實驗情況的不同更換撒水頭的位置，撒水設備圖如圖 5-13 所



示。而且由於撒水管路的流量與壓力對於撒水頭的撒水密度、水滴尺寸、滅火效果等都有很大的影響，因此在撒水管路上也必須裝設減壓閥，用來調整實驗過程中水流量與壓力。而出口水溫也需量測，一般來說，在實驗過程中水溫是保持固定的，然而，若實驗進行的時間較長，則水溫還是會有變化。

在試驗的過程中，水量需求將相當大，假如有四個撒水頭啟動，每個撒水頭的水量為  $80 \text{ l/min}$ ，則總共需提供  $320 \text{ l/min}$  的水量。為了確保水量能夠穩定的供給，因此在一樓設置一大型儲水槽，並裝設一個加壓泵浦，提供撒水時所需的壓力。

### (三) 量測設備

#### (a) 溫度量測設備：

實驗空間內溫度的變化將使用熱電偶量測。熱電偶具有價格便宜、結構簡單、測溫範圍廣及準確度高，而且可以把溫度信號轉變成電信號進行遠距離傳送等優點。

而為了量測區劃內各個高度的溫度，因此將數個熱電偶共同綁在一條垂直的鐵線上成一樹狀，而稱此為熱電偶樹，熱電偶樹示意圖如圖 5-14 所示，分別在距離地面 2.9m、2.6m、2.3m、2.0m 及 1.5m 等五個不同高度架設熱電偶，熱電偶則使用 K-type，最高溫度可以量測到 400。為避免熱電偶之訊號線受到煙流溫度影響而損毀，因此在熱電偶線的外部包覆一層耐熱材料。而且為了防止撒水頭所噴灑出的水直接接觸到熱電偶以致無法完全正確反應煙溫，因此在熱電偶上方加設  $\cap$  字型之金屬遮蔽物，將撒水直接冷卻效應降至最低，而期能真實反應火場撒水後之煙溫。

#### (b) 流量計與壓力計：

流量計將裝設在支管入口處，用來量測撒水頭所噴灑出的水量。壓力計將裝設在加壓泵浦的出口處與支管的入口處，用來量測撒水頭的撒水壓力。

(c) 熱球式風速計：

為量測進氣口與排煙口之風量，因此在進氣與排煙風管之中心位置架設熱球式風速計。

(d) 數據擷取裝置：

在此實驗中需量測實驗區劃內各點的溫度變化，各點溫度經由熱電偶量測後，再由數據擷取裝置將數據輸入至電腦中，以方便後續的數據處理。

(e) 影像處理系統：

在矽酸鈣板上將預先設置攝影口，並在攝影口外側架設攝影機。在實驗進行時，可以錄下區劃空間內火源燃燒的狀態、撒水頭的作動情形與煙層的流動。

#### (四) 火源

在實驗中將使用酒精盤燃燒酒精，以產生所需的熱釋放率。酒精盤使用厚度為 1.5mm 的鋼板彎製，避免因燃燒時的高溫而產生變形。酒精盤尺寸為 0.7m×0.7m，高度為 0.15m。

#### (五) 風機系統

為探討排煙設備與撒水設備交互作用之影響分析，因此在實驗區劃當中將裝設排煙風機，同時以兩個排煙口銜接風管加以排煙。排煙口尺寸為 0.6×0.8m，並且設置一 0.6×0.8m 進氣口，採用自然進氣。



圖 5-1 實驗場外觀



圖 5-2 實驗場內部 ( 未施工 )



圖 5-3 實驗場內部 ( 已架設完成之隔板 )



圖 5-4 實驗場內部 ( 已架設完成之隔板 )



圖 5-5 架設中之撒水管路



圖 5-6 預設之撒水口位置



圖 5-7 實驗用之加壓幫浦



圖 5-8 排煙設備



圖 5-9 架設完成之熱電偶



圖 5-10 已裝上之撒水頭



圖 5-11 酒精盤實際燃燒情形

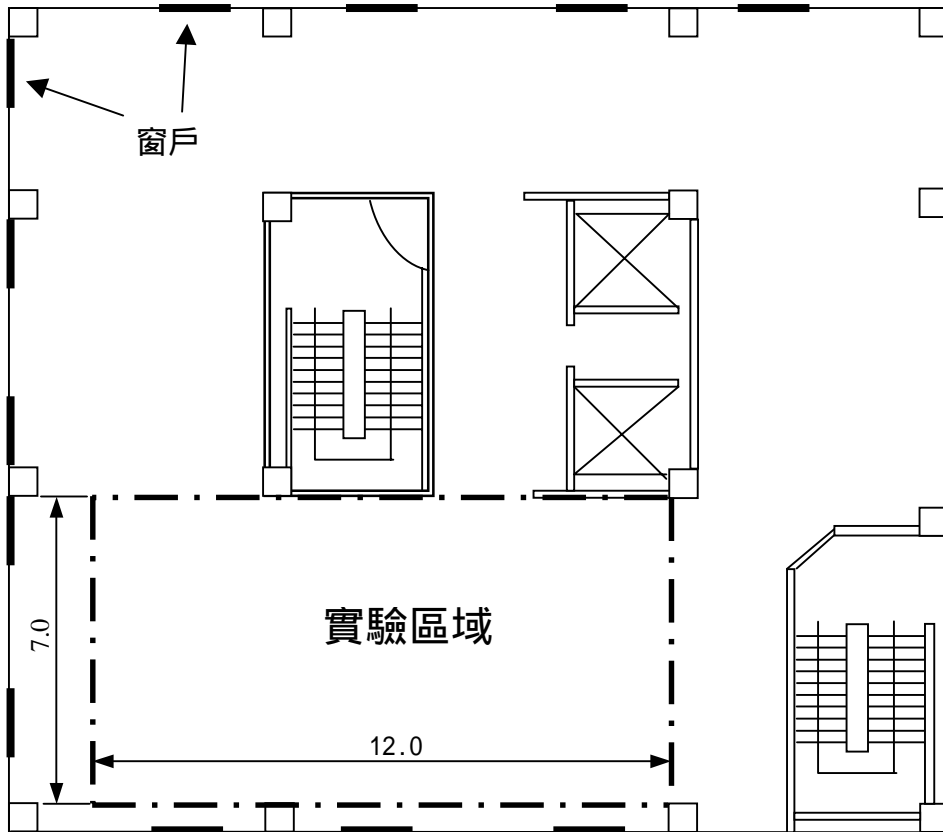


圖 5-12 建研所實驗室平面圖

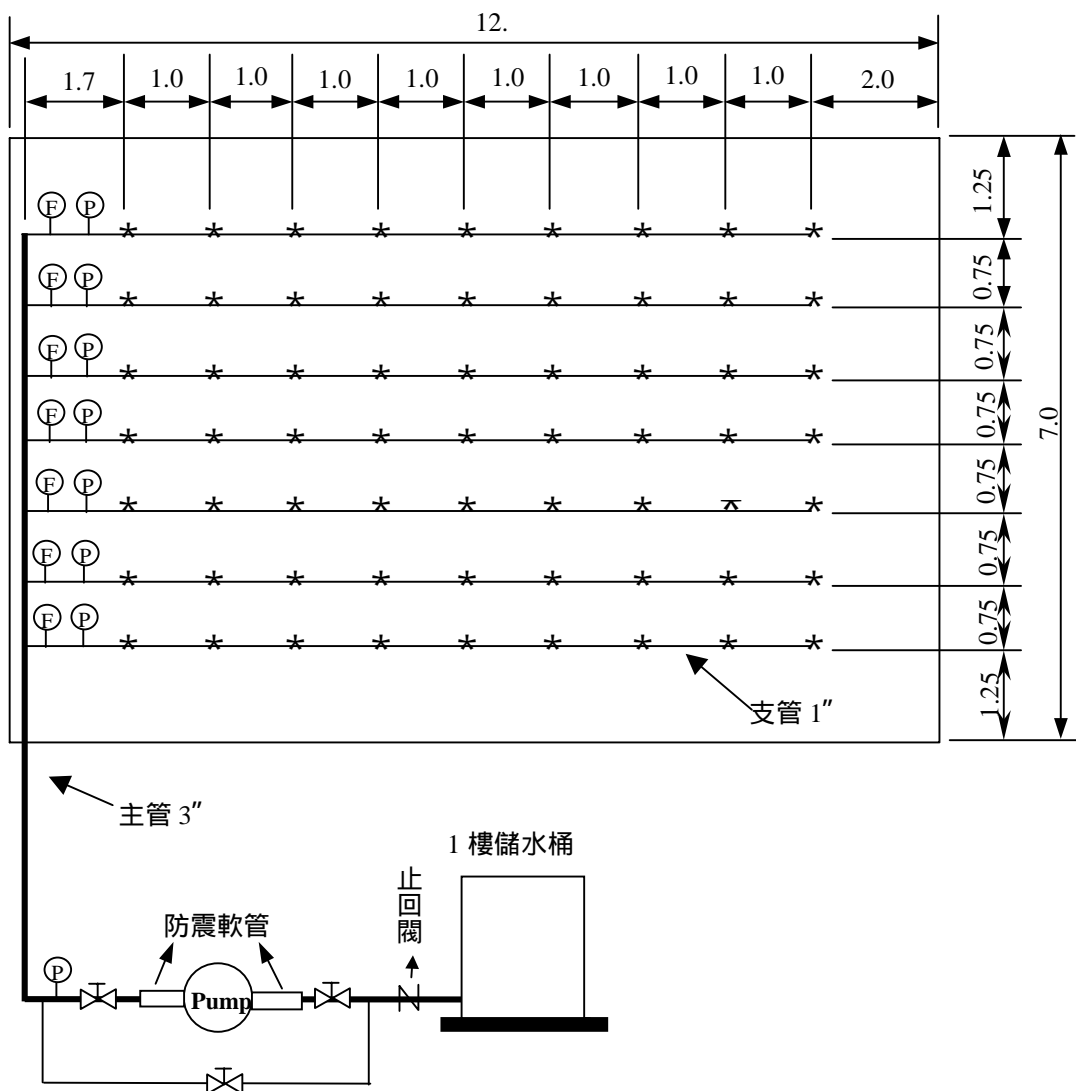


圖 5-13 撒水設備圖

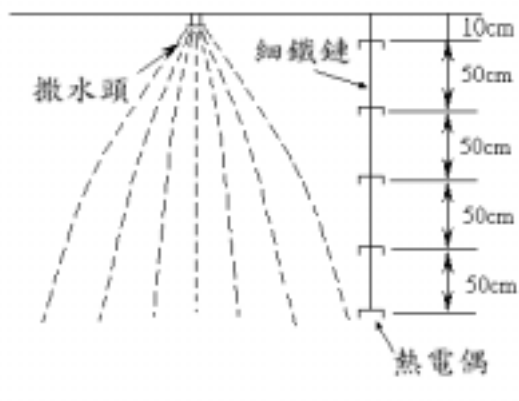


圖 5-14 熱電偶樹示意圖

## 5.2 實驗規劃

在本實驗中將在實驗區劃中心裝設一撒水頭，並在其四周圍架設熱電偶，用來量測火場溫度的變化。

在此實驗中將改變排煙設備的操作方式，依照排煙設備操作方式的不同進行三個實驗。一為自然排煙，也就是排煙設備不作動，熱煙氣僅靠本身之熱浮力效應排出；一為強制排煙，排煙設備在酒精盤點火後立即開啟；另一個亦為強制排煙，但是排煙設備在撒水頭作動後才開啟。在實驗時並將改變火源位置，為 A、B 及 C，其火源中心位置分別為 A( 6,3.5 )，B( 9,3.5 )，C ( 3,3.5 )。

本次實驗先只使用一個酒精盤，在實驗時，會在酒精盤內倒入約 5 公升之酒精，而最大熱釋放率約為 190KW。實驗各項參數設定如表 5-1 所示，各項設備配置如圖 5-15 所示。

表 5-1 實驗之參數設定

實驗編號	火源位置	火源熱釋放率	排煙設備操作方式
1-1	A	190KW	自然排煙
1-2	A	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
1-3	A	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
2-1	B	190KW	自然排煙
2-2	B	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
2-3	B	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
3-1	C	190KW	自然排煙
3-2	C	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
3-3	C	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s

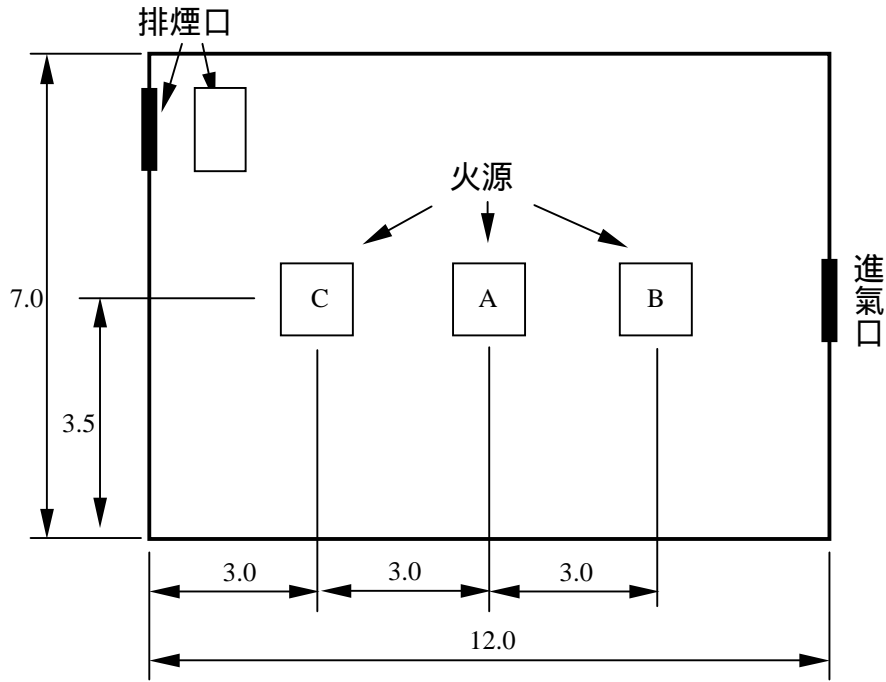


圖 5-15 各實驗之火源位置

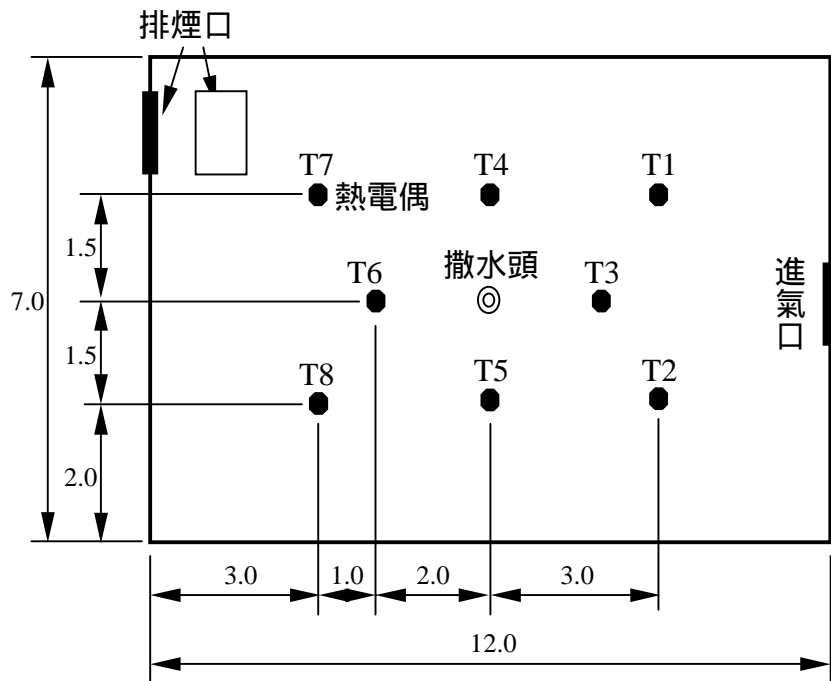


圖 5-16 實驗設備相關位置



### 5.3 實驗結果與討論

在此次的實驗中，將經由改變火源位置與排煙口開啟時間的不同，以比較當這兩個參數改變時，對於撒水頭的作動時間、實驗區劃內溫度的變化以及煙層沉降的時間等。

為量測出撒水頭撒水後區劃內溫度的變化以及撒水之降溫效果，必須知道當燃燒酒精盤時，火場所能夠達到的溫度，以及火場內溫度的分佈情形。因此在一開始並不裝設撒水頭，而且排煙風機也不開啟，但是進氣閘門與排煙閘門皆打開，在此情況下燃燒酒精。酒精盤放置位置為(6,3.5)，並且在酒精盤內倒入約3公升之酒精。實際燃燒之後，經由熱電偶量測到個區劃整個燃燒過程之溫度變化。在整個燃燒過程中，3公升的酒精約可持續燃燒5分鐘，最大熱釋放率為190KW。

圖 5-17 為高度 2.9m 處之熱電偶所量測到之煙溫，圖 5-18 圖 5-25 則為各熱電偶樹所測量到之垂直煙溫變化。由圖 5-17 中可以得到整個火場溫度最高可達 180℃，而且越靠近火源溫度越高，因此熱電偶樹 T3、T4、T5、T6 所量測到之溫度較高。而在此實驗中，雖然排煙風機未開啟，但是進氣口與排煙口皆開啟，因此煙流還是會往排煙口方向流動，所以熱電偶樹 T1、T2 所量測到之溫度明顯低於其它熱電偶樹。

而由各熱電偶樹所量測到之垂直煙溫變化，當火源一點燃，則天花板附近之溫度會迅速的升高，越靠近火源處，溫度變化的越大。而隨著時間的增加，煙層的厚度也漸漸的累積增加。使用 N-percent method (N=10%)，火場最高溫度為 180℃，火場之初溫為 30℃，因此當熱電偶所量測到之溫度升高 15℃，則可判定煙層以沉降至此高度。由圖 5-18 圖 5-25 可看出，當時間到達 100s 時，高度 1.5m 處之熱電偶所量測到之溫度皆已經超過 45℃，表示 100s 時，煙層已經沉降至 1.5m 以下。

而當酒精盤持續燃燒到約 300 秒時，由於酒精已經快消耗

完，因此熱釋放率急速下降，造成火場溫度也跟著急速下降。

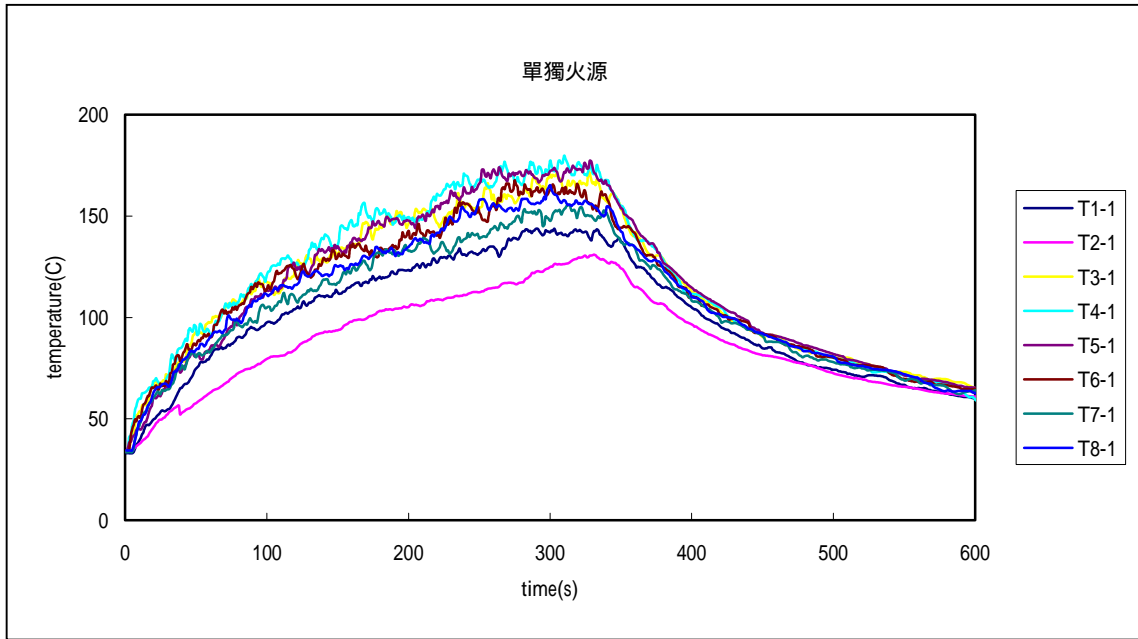


圖 5-17 單獨火源時之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

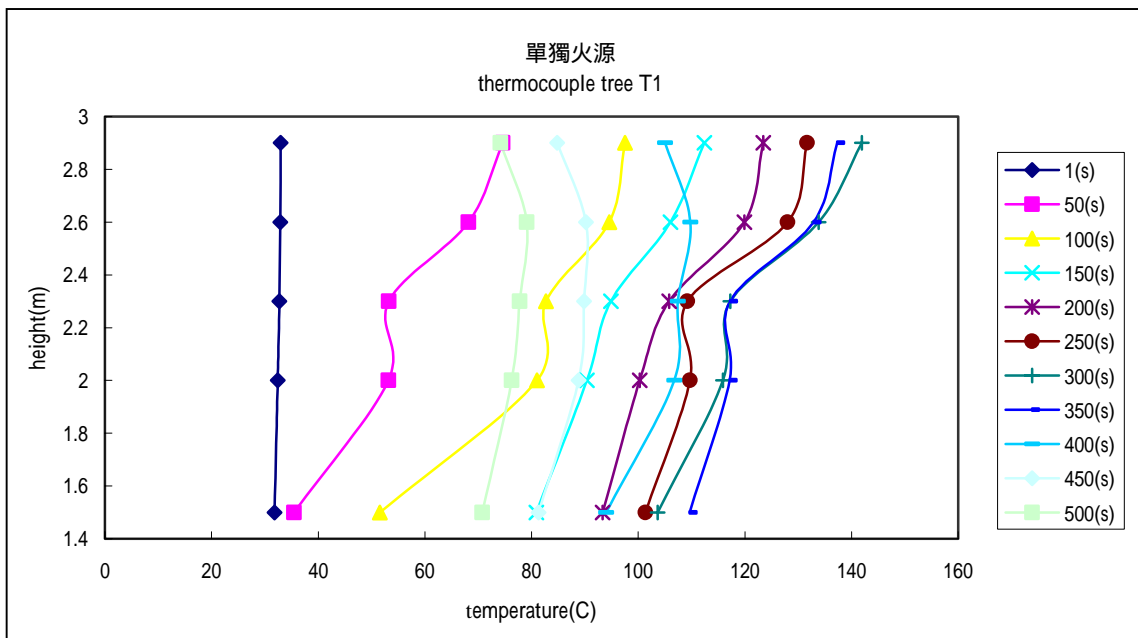


圖 5-18 熱電偶樹 T1 所測得之垂直溫度變化

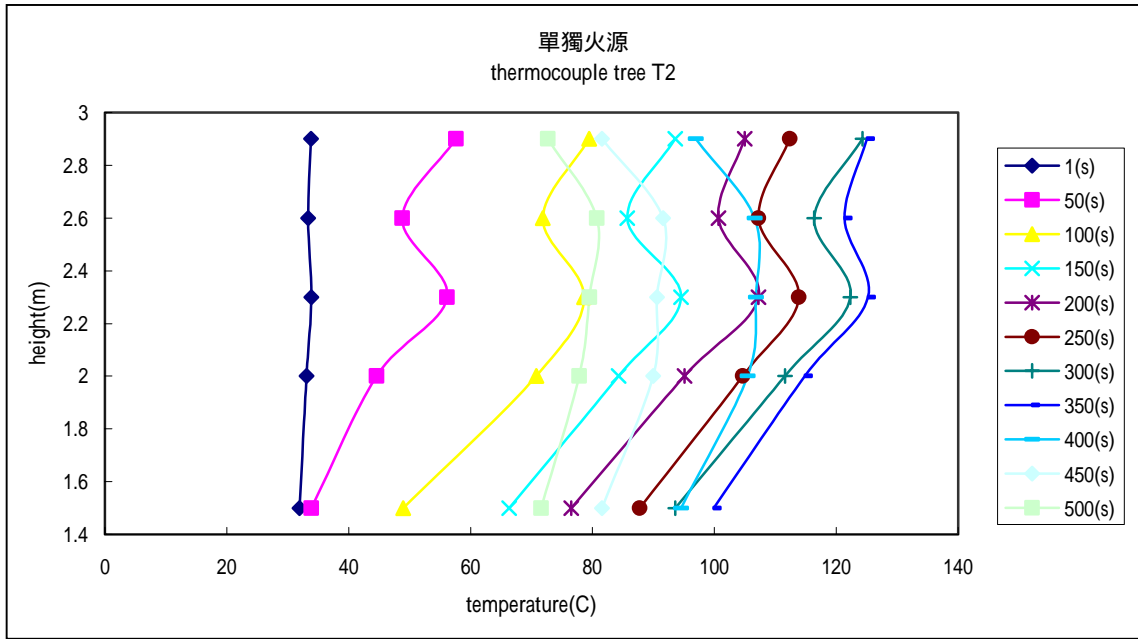


圖 5-19 熱電偶樹 T2 所測得之垂直溫度變化

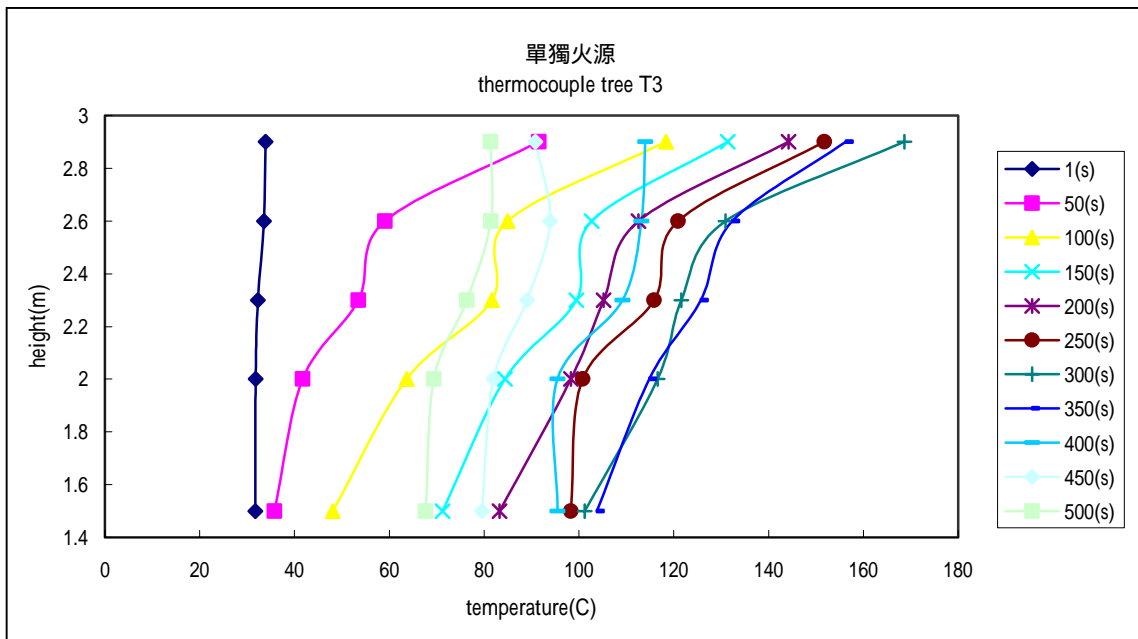


圖 5-20 熱電偶樹 T3 所測得之垂直溫度變化

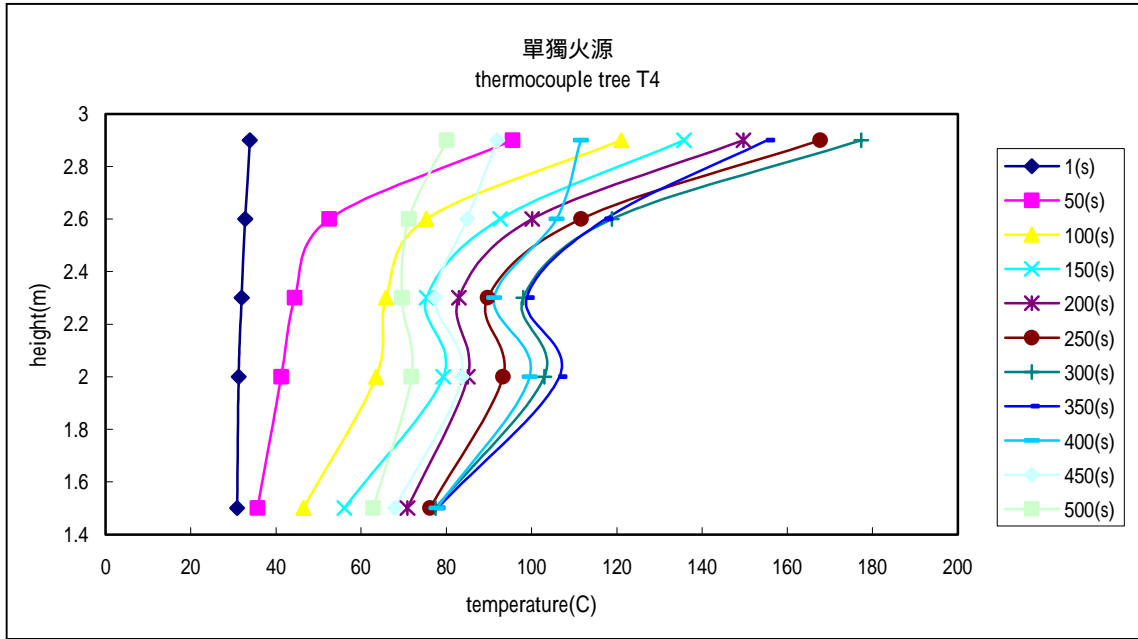


圖 5-21 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化

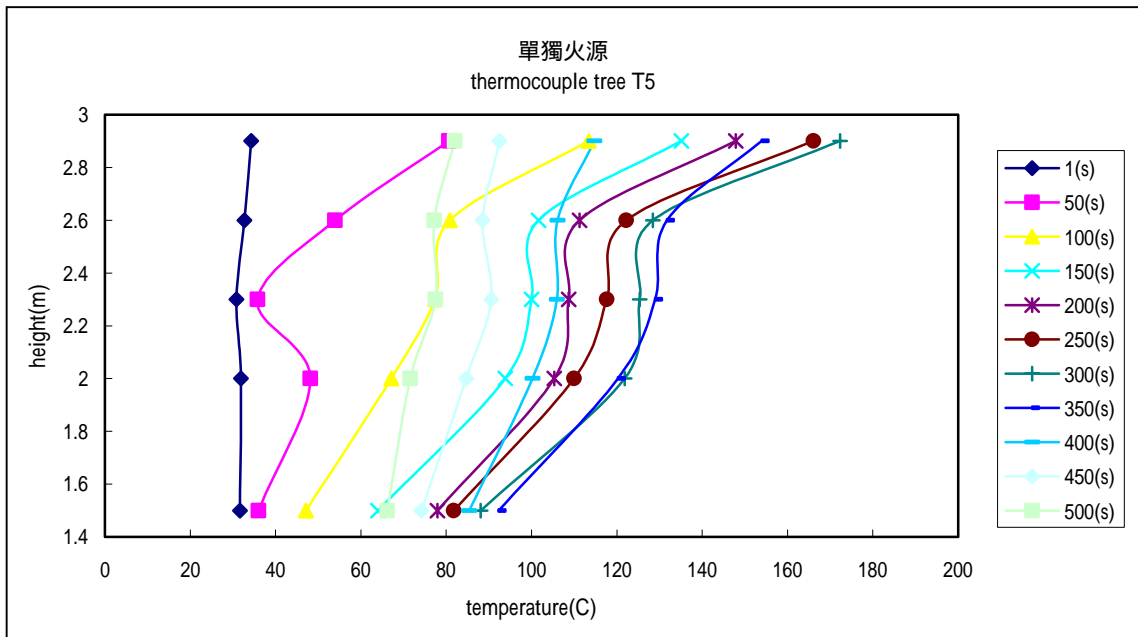


圖 5-22 熱電偶樹 T5 所測得之垂直溫度變化

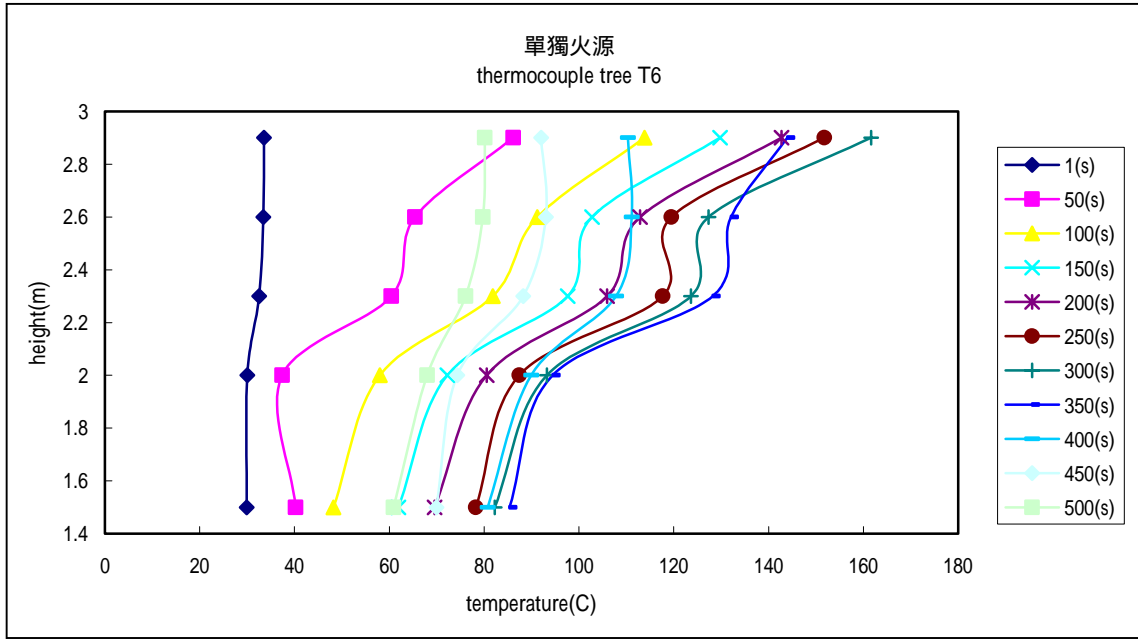


圖 5-23 熱電偶樹 T6 所測得之垂直溫度變化

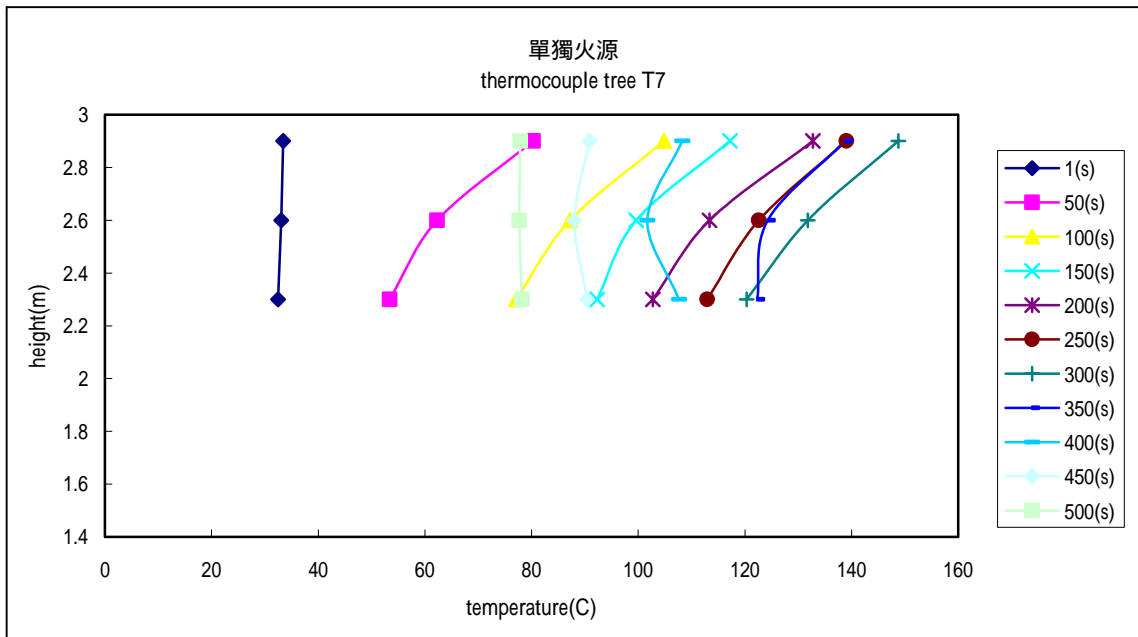


圖 5-24 熱電偶樹 T7 所測得之垂直溫度變化

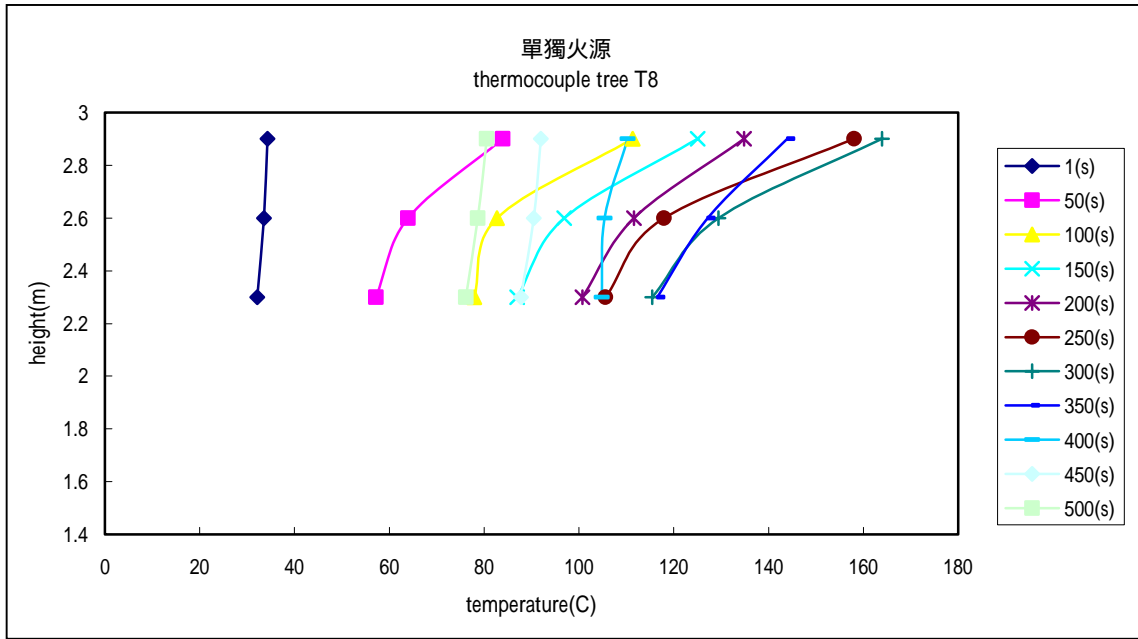


圖 5-25 熱電偶樹 T8 所測得之垂直溫度變化

表 5-2 則為各實驗之撒水頭作動時間。圖 A-1 到圖 A-39 則為火場高度 2.9m 之溫度變化與垂直溫度變化。

表 5-2 實驗結果

實驗編號	火源位置	排煙設備操作方式	撒水頭作動時間
1-1	A	自然排煙	77s
1-2	A	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	81s
1-3	A	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	80s
2-1	B	自然排煙	182s
2-2	B	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	199s
2-3	B	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	172s
3-1	C	自然排煙	188s
3-2	C	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	202s
3-3	C	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	183s

由於實驗規劃等因素，再加上每一次的實驗需花費較長的時間，因此造成所有的實驗無法在同一天完成，而必須分次進行。實驗 1-1、1-2、1-3 與實驗 2-1、2-2、2-3 因為進行實驗的時間相距不遠，所以周圍環境條件亦相近，實驗區劃內之溫度約為 30 。然而由於實驗 3-1、3-2、3-3 是在期末成果報告後才進行，所以周圍環境條件有些差異，在實驗當時實驗區劃內之溫度約為 20 ，水溫也較低。由於實驗條件的差異，造成實驗 3 無法與實驗 1 2 針對改變火源位置對撒水頭作動時間的影響進行比較，因此不對此部份進行討論。

而由實驗所得之結果可以得到以下的結論：

- (1) 撒水設備與排煙設備的設置確實可以有效降低火場的溫度，在未設置撒水設備時，火場最高溫度達到 180 ，但是當有設置撒水設備，且撒水頭作動之後，火場最高溫度只到達約 140 左右，火場平均溫度也明顯的下降。



- (2) 比較自然排煙與強制排煙時撒水頭的作動時間可以發現，當採用強制排煙時，撒水頭作動的時間會比自然排煙時稍微延遲。以實驗 2-1 與 2-2 相比較，當使用自然排煙時，撒水頭作動的時間為 182s，但是若採用強制排煙，則撒水頭作動的時間延遲到 199s，延遲了 17s。強制排煙會造成撒水頭延遲作動是因為強制排煙會將熱煙氣排出，因而減緩熱煙氣層累積的速度，溫度升高也較緩慢，而且強制排煙會擾亂火焰與煙的流動，造成煙層的不穩定，溫度的變化也較大，採用自然排煙時，煙層的厚度很快的累積，溫度也很快的升高，因此撒水頭會很快的作動。而實驗 2-3 由於一開始也是採用自然排煙，因此撒水頭作動的時間也較強制排煙時快。

在實驗 1-1、1-2、1-3 中，由於火源位在撒水頭的正下方，因此撒水頭會迅速的作動，實驗 1-2 中撒水頭之作動時間雖然還是有受到排煙的影響，但是影響並不明顯，只比實驗 1-1 延遲 4s，實驗 1-3 延遲 1s。

- (3) 排煙口作動時間、排煙口與火源相對位置對於撒水頭的作動與滅火效果佔有相當大的影響。如圖 5-26 和圖 5-27 所示，當排煙口開啟並開始排煙時，煙流會往排煙口方向流動，假若兩側皆有裝設排煙口，則煙流會分別向兩側擴散，因此火源上方的撒水頭皆會作動而滅火。但是若只有一側有排煙口，則煙流只會往排煙口方向流動，此情況會造成只有煙流方向的撒水頭作動，但是火源上方的撒水頭卻不會作動，因此火勢會往反方向不斷的擴大燃燒而無法撲滅。

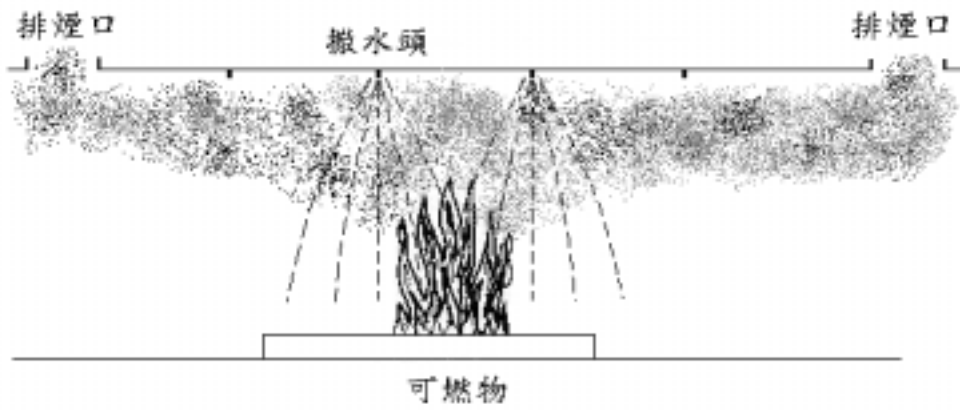


圖 5-26 排煙口位置與撒水頭作動情形(a)

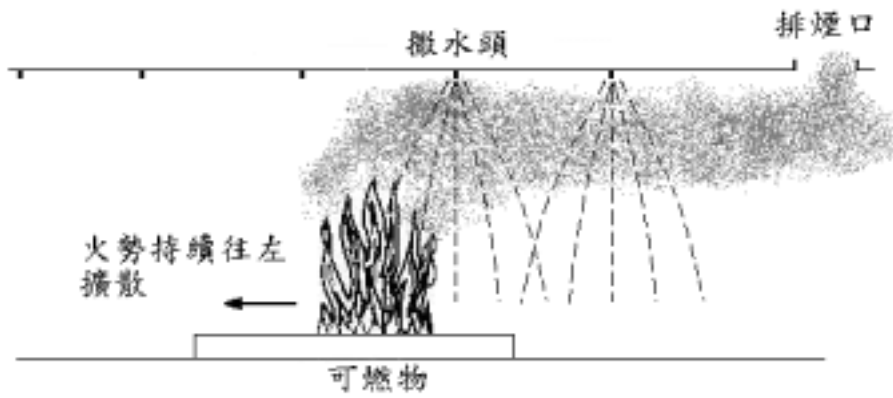


圖 5-27 排煙口位置與撒水頭作動情形(b)

## 第五章 實驗計劃

實驗在本研究中佔相當重要部份，藉由實驗可實際瞭解在火場中撒水設備與排煙設備間的相互影響情形。而實驗所量測到之數據將與電腦模擬之模擬結果進行比較分析，以瞭解理論模式之可靠度，並作為修正模式參數之依據。

### 5.1 實驗設備

本研究之實驗部分將借助內政部建築研究所位於台南歸仁防火實驗群之實驗室進行，實驗場現場圖片如圖 5-1 圖 5-11 所示，實驗室平面圖如圖 5-12 所示。實驗中將以油盤火源進行煙層熱浮力變化、撒水頭作動時間之實測，同時排煙口之排煙效率也將進行測試。實驗設施規劃如下：

#### (一) 實驗空間

此實驗空間的尺寸為 12.0m×7.0m，天花板高度則為 3.0m。實驗空間使用可耐火隔熱的矽酸鈣板隔間，地板與矽酸鈣板間的縫隙並使用耐火塗料加以密封，避免熱煙氣從縫隙中流出，因而影響實驗的準確性。而由於當撒水頭作動後，噴灑出的水量相當的大，因此必須在地面挖設排水管，將噴灑出的水排出。

#### (二) 撒水設備

在此試驗中所使用的撒水頭為標準密閉式撒水頭，撒水頭作動溫度為 68℃，RTI( Response Time Index ) 為 80(  $m^{1/2}sec^{1/2}$  )，而撒水頭將裝設在天花板下 10cm。撒水頭的間距則為 3.0m×3.0m。

在此實驗區劃中，在各個不同位置皆有預設撒水口，可依照實驗情況的不同更換撒水頭的位置，撒水設備圖如圖 5-13 所

示。而且由於撒水管路的流量與壓力對於撒水頭的撒水密度、水滴尺寸、滅火效果等都有很大的影響，因此在撒水管路上也必須裝設減壓閥，用來調整實驗過程中水流量與壓力。而出口水溫也需量測，一般來說，在實驗過程中水溫是保持固定的，然而，若實驗進行的時間較長，則水溫還是會有變化。

在試驗的過程中，水量需求將相當大，假如有四個撒水頭啟動，每個撒水頭的水量為  $80 \text{ l/min}$ ，則總共需提供  $320 \text{ l/min}$  的水量。為了確保水量能夠穩定的供給，因此在一樓設置一大型儲水槽，並裝設一個加壓泵浦，提供撒水時所需的壓力。

### (三) 量測設備

#### (a) 溫度量測設備：

實驗空間內溫度的變化將使用熱電偶量測。熱電偶具有價格便宜、結構簡單、測溫範圍廣及準確度高，而且可以把溫度信號轉變成電信號進行遠距離傳送等優點。

而為了量測區劃內各個高度的溫度，因此將數個熱電偶共同綁在一條垂直的鐵線上成一樹狀，而稱此為熱電偶樹，熱電偶樹示意圖如圖 5-14 所示，分別在距離地面 2.9m、2.6m、2.3m、2.0m 及 1.5m 等五個不同高度架設熱電偶，熱電偶則使用 K-type，最高溫度可以量測到 400。為避免熱電偶之訊號線受到煙流溫度影響而損毀，因此在熱電偶線的外部包覆一層耐熱材料。而且為了防止撒水頭所噴灑出的水直接接觸到熱電偶以致無法完全正確反應煙溫，因此在熱電偶上方加設  $\cap$  字型之金屬遮蔽物，將撒水直接冷卻效應降至最低，而期能真實反應火場撒水後之煙溫。

#### (b) 流量計與壓力計：

流量計將裝設在支管入口處，用來量測撒水頭所噴灑出的水量。壓力計將裝設在加壓泵浦的出口處與支管的入口處，用來量測撒水頭的撒水壓力。

(c) 熱球式風速計：

為量測進氣口與排煙口之風量，因此在進氣與排煙風管之中心位置架設熱球式風速計。

(d) 數據擷取裝置：

在此實驗中需量測實驗區劃內各點的溫度變化，各點溫度經由熱電偶量測後，再由數據擷取裝置將數據輸入至電腦中，以方便後續的數據處理。

(e) 影像處理系統：

在矽酸鈣板上將預先設置攝影口，並在攝影口外側架設攝影機。在實驗進行時，可以錄下區劃空間內火源燃燒的狀態、撒水頭的作動情形與煙層的流動。

#### (四) 火源

在實驗中將使用酒精盤燃燒酒精，以產生所需的熱釋放率。酒精盤使用厚度為 1.5mm 的鋼板彎製，避免因燃燒時的高溫而產生變形。酒精盤尺寸為 0.7m×0.7m，高度為 0.15m。

#### (五) 風機系統

為探討排煙設備與撒水設備交互作用之影響分析，因此在實驗區劃當中將裝設排煙風機，同時以兩個排煙口銜接風管加以排煙。排煙口尺寸為 0.6×0.8m，並且設置一 0.6×0.8m 進氣口，採用自然進氣。



圖 5-1 實驗場外觀



圖 5-2 實驗場內部 ( 未施工 )



圖 5-3 實驗場內部 ( 已架設完成之隔板 )



圖 5-4 實驗場內部 ( 已架設完成之隔板 )



圖 5-5 架設中之撒水管路



圖 5-6 預設之撒水口位置



圖 5-7 實驗用之加壓幫浦



圖 5-8 排煙設備



圖 5-9 架設完成之熱電偶



圖 5-10 已裝上之撒水頭



圖 5-11 酒精盤實際燃燒情形

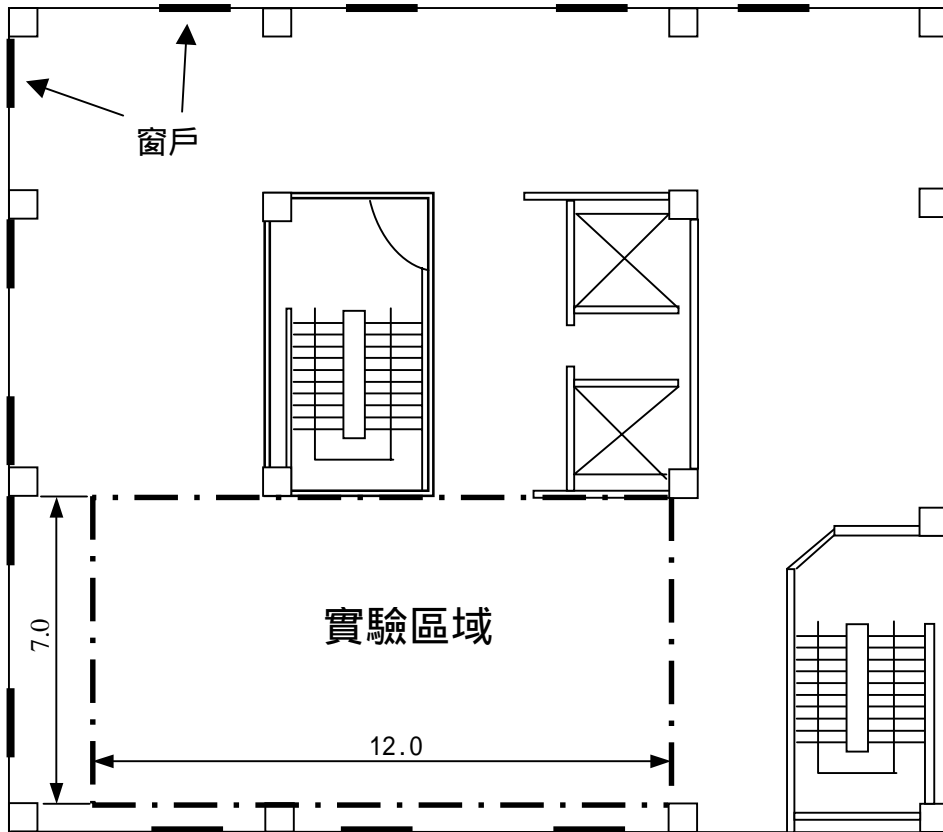


圖 5-12 建研所實驗室平面圖



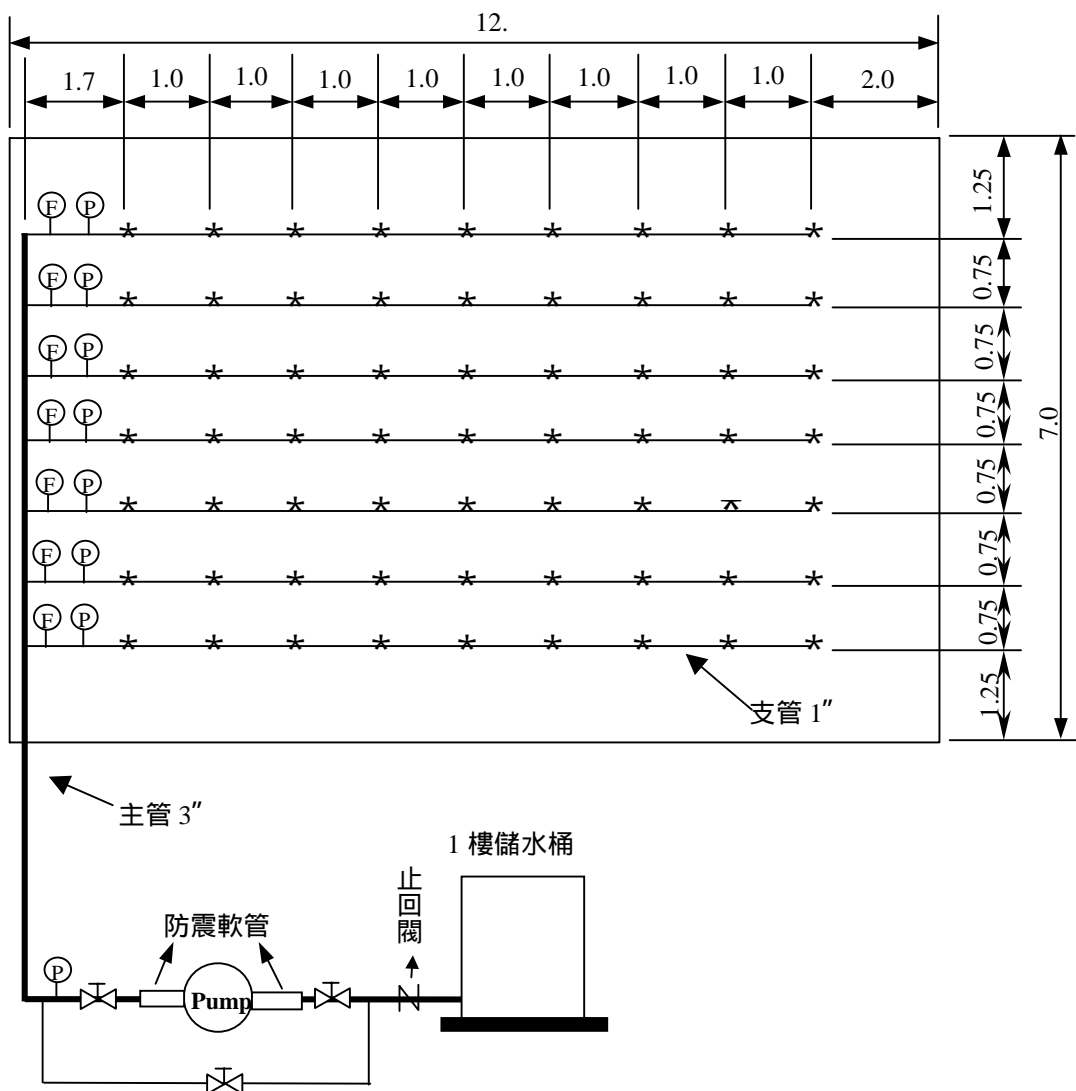


圖 5-13 撒水設備圖

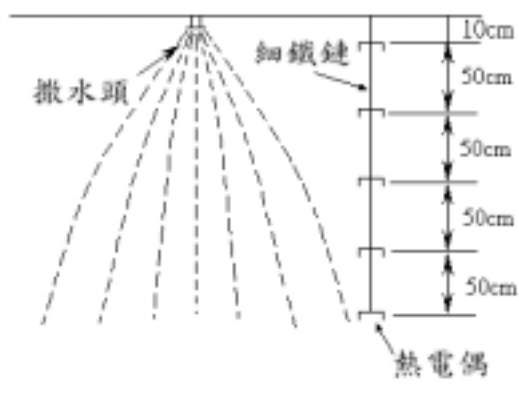


圖 5-14 熱電偶樹示意圖

## 5.2 實驗規劃

在本實驗中將在實驗區劃中心裝設一撒水頭，並在其四周圍架設熱電偶，用來量測火場溫度的變化。

在此實驗中將改變排煙設備的操作方式，依照排煙設備操作方式的不同進行三個實驗。一為自然排煙，也就是排煙設備不作動，熱煙氣僅靠本身之熱浮力效應排出；一為強制排煙，排煙設備在酒精盤點火後立即開啟；另一個亦為強制排煙，但是排煙設備在撒水頭作動後才開啟。在實驗時並將改變火源位置，為 A、B 及 C，其火源中心位置分別為 A( 6,3.5 )，B( 9,3.5 )，C ( 3,3.5 )。

本次實驗先只使用一個酒精盤，在實驗時，會在酒精盤內倒入約 5 公升之酒精，而最大熱釋放率約為 190KW。實驗各項參數設定如表 5-1 所示，各項設備配置如圖 5-15 所示。

表 5-1 實驗之參數設定

實驗編號	火源位置	火源熱釋放率	排煙設備操作方式
1-1	A	190KW	自然排煙
1-2	A	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
1-3	A	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
2-1	B	190KW	自然排煙
2-2	B	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
2-3	B	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
3-1	C	190KW	自然排煙
3-2	C	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
3-3	C	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s

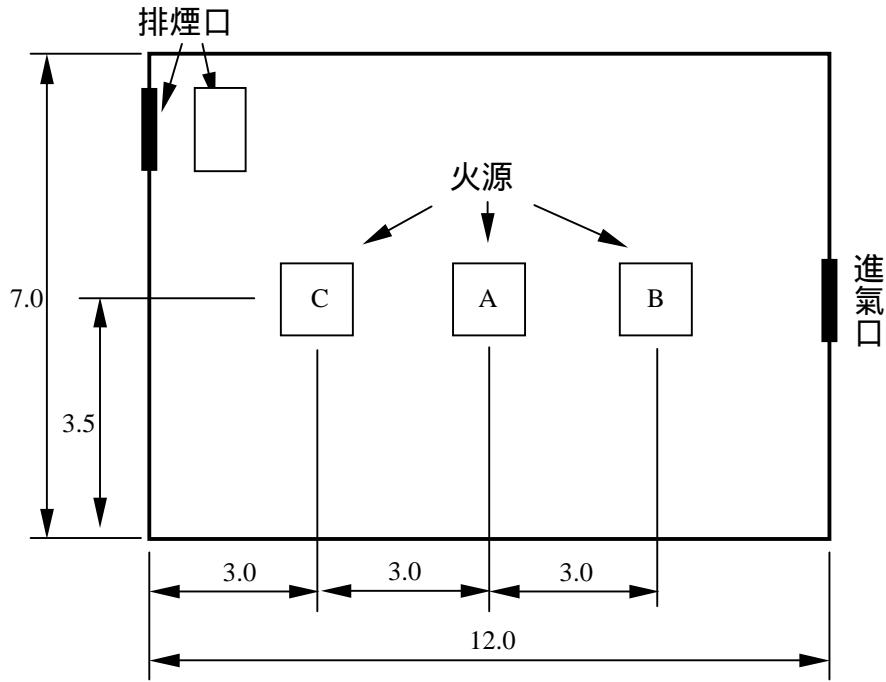


圖 5-15 各實驗之火源位置

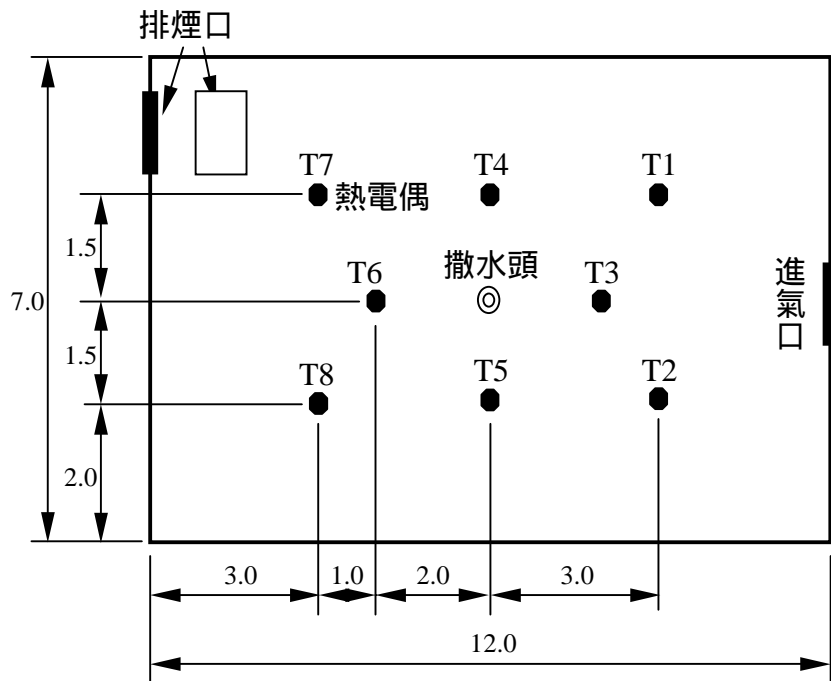


圖 5-16 實驗設備相關位置

### 5.3 實驗結果與討論

在此次的實驗中，將經由改變火源位置與排煙口開啟時間的不同，以比較當這兩個參數改變時，對於撒水頭的作動時間、實驗區劃內溫度的變化以及煙層沉降的時間等。

為量測出撒水頭撒水後區劃內溫度的變化以及撒水之降溫效果，必須知道當燃燒酒精盤時，火場所能夠達到的溫度，以及火場內溫度的分佈情形。因此在一開始並不裝設撒水頭，而且排煙風機也不開啟，但是進氣閘門與排煙閘門皆打開，在此情況下燃燒酒精。酒精盤放置位置為(6,3.5)，並且在酒精盤內倒入約3公升之酒精。實際燃燒之後，經由熱電偶量測到個區劃整個燃燒過程之溫度變化。在整個燃燒過程中，3公升的酒精約可持續燃燒5分鐘，最大熱釋放率為190KW。

圖 5-17 為高度 2.9m 處之熱電偶所量測到之煙溫，圖 5-18 圖 5-25 則為各熱電偶樹所測量到之垂直煙溫變化。由圖 5-17 中可以得到整個火場溫度最高可達 180℃，而且越靠近火源溫度越高，因此熱電偶樹 T3、T4、T5、T6 所量測到之溫度較高。而在此實驗中，雖然排煙風機未開啟，但是進氣口與排煙口皆開啟，因此煙流還是會往排煙口方向流動，所以熱電偶樹 T1、T2 所量測到之溫度明顯低於其它熱電偶樹。

而由各熱電偶樹所量測到之垂直煙溫變化，當火源一點燃，則天花板附近之溫度會迅速的升高，越靠近火源處，溫度變化的越大。而隨著時間的增加，煙層的厚度也漸漸的累積增加。使用 N-percent method (N=10%)，火場最高溫度為 180℃，火場之初溫為 30℃，因此當熱電偶所量測到之溫度升高 15℃，則可判定煙層以沉降至此高度。由圖 5-18 圖 5-25 可看出，當時間到達 100s 時，高度 1.5m 處之熱電偶所量測到之溫度皆已經超過 45℃，表示 100s 時，煙層已經沉降至 1.5m 以下。

而當酒精盤持續燃燒到約 300 秒時，由於酒精已經快消耗

完，因此熱釋放率急速下降，造成火場溫度也跟著急速下降。

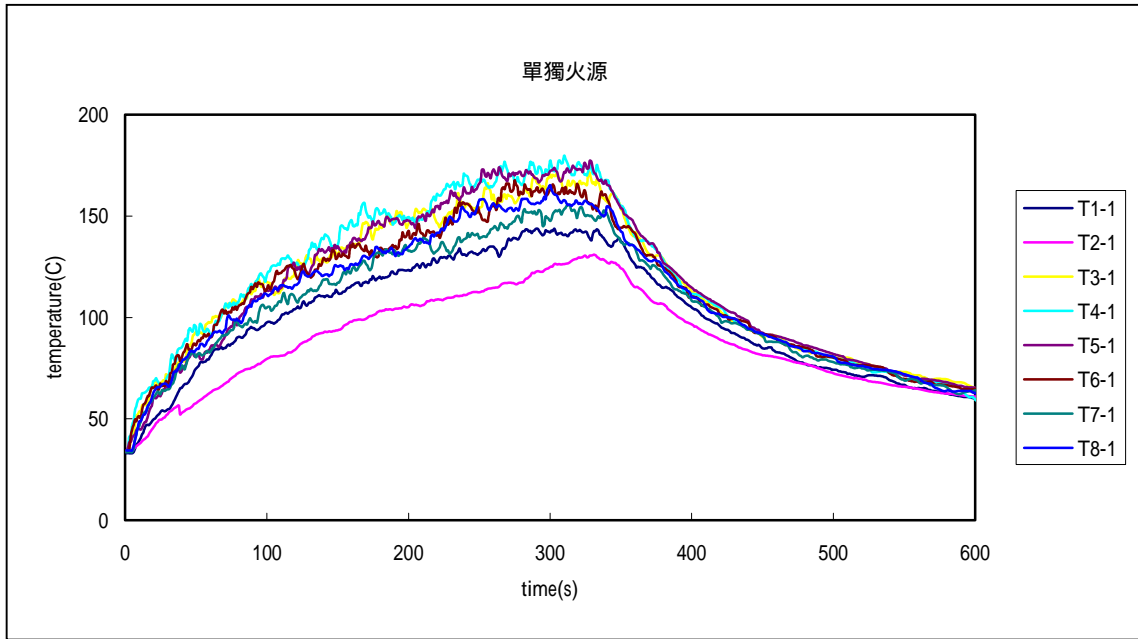


圖 5-17 單獨火源時之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

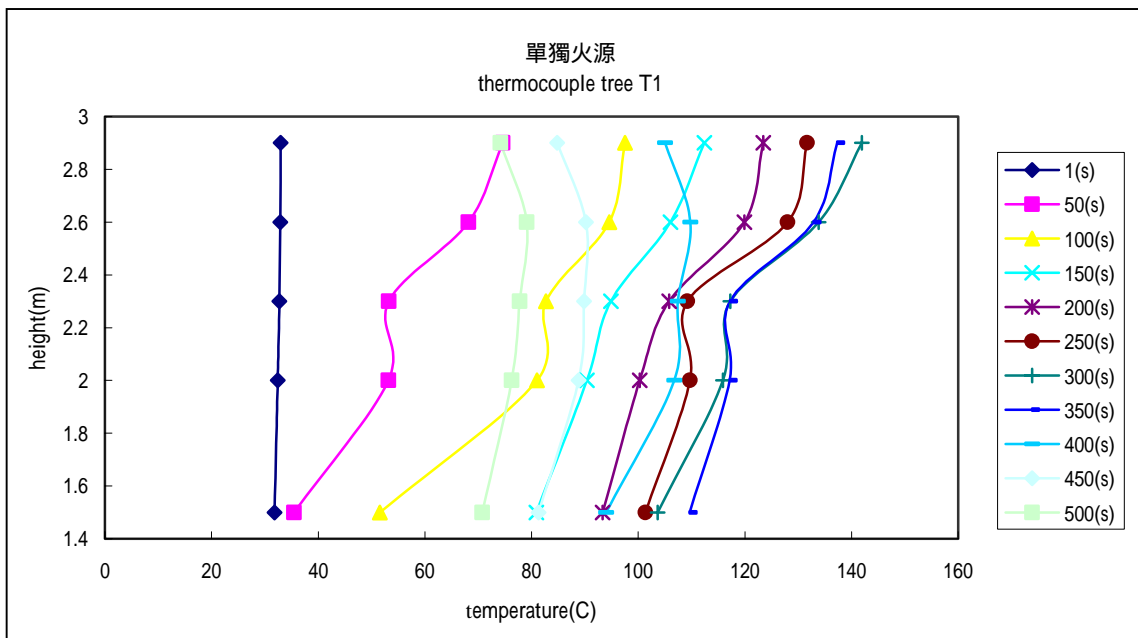


圖 5-18 熱電偶樹 T1 所測得之垂直溫度變化

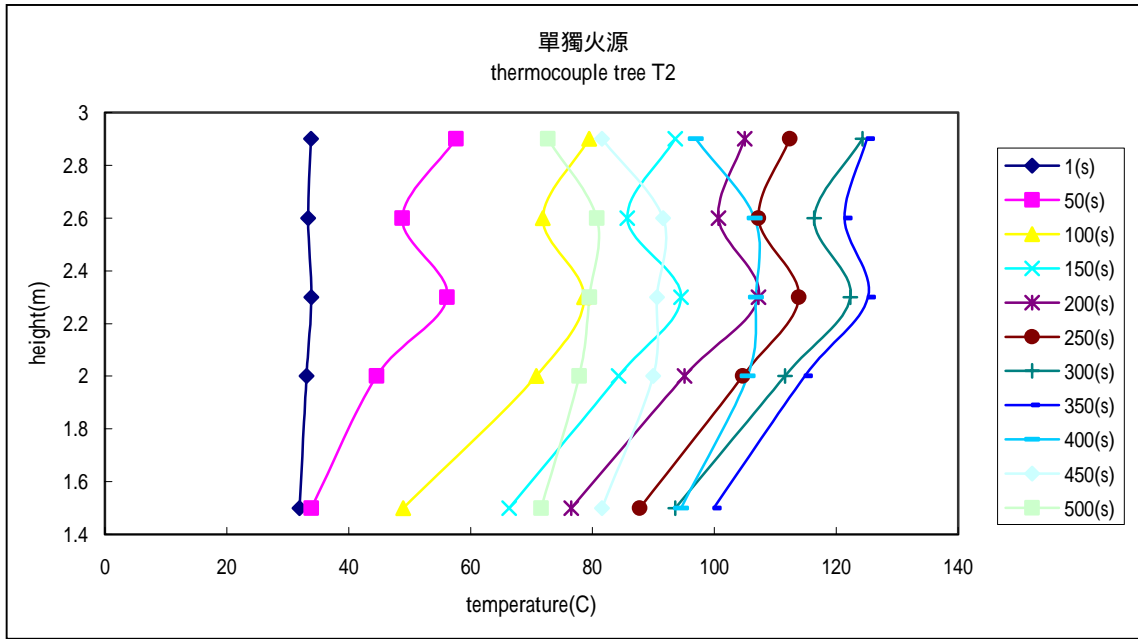


圖 5-19 熱電偶樹 T2 所測得之垂直溫度變化

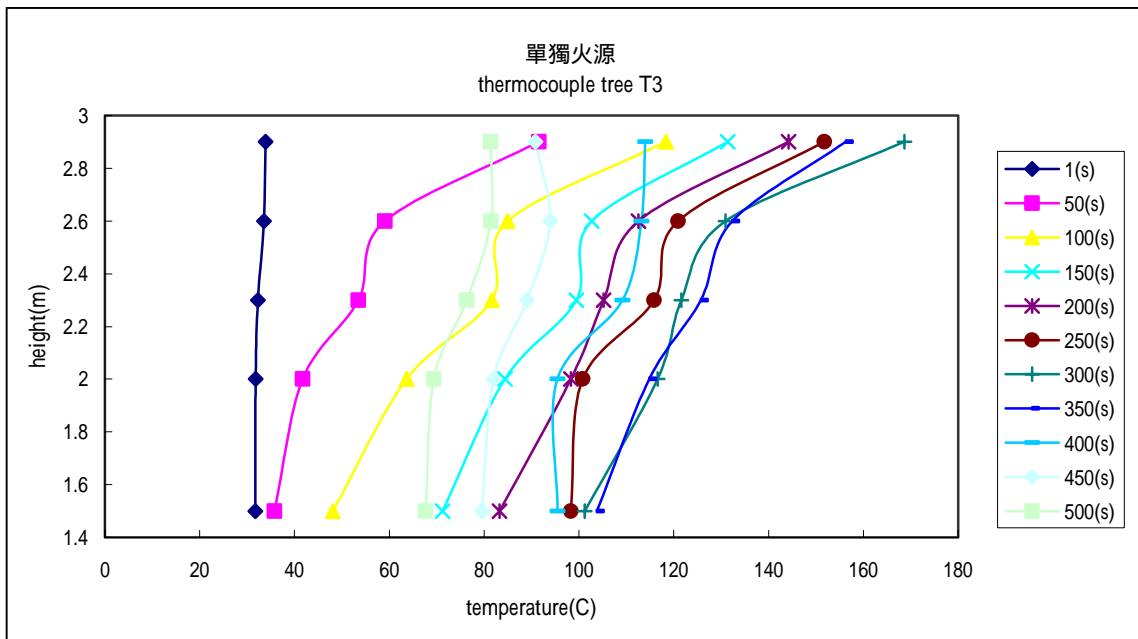


圖 5-20 熱電偶樹 T3 所測得之垂直溫度變化

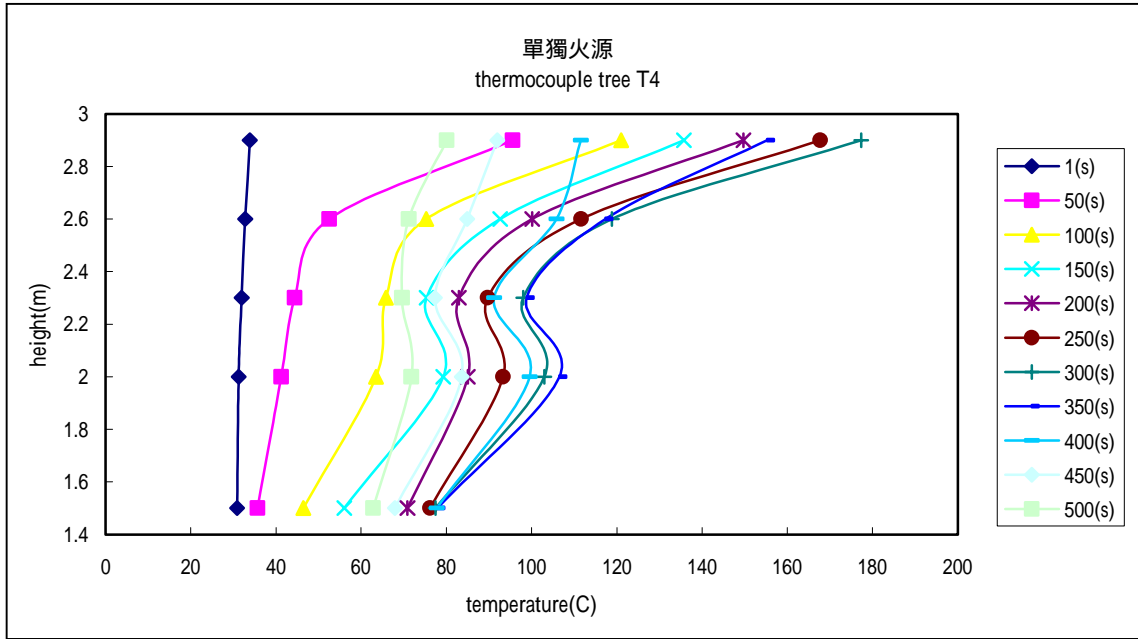


圖 5-21 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化

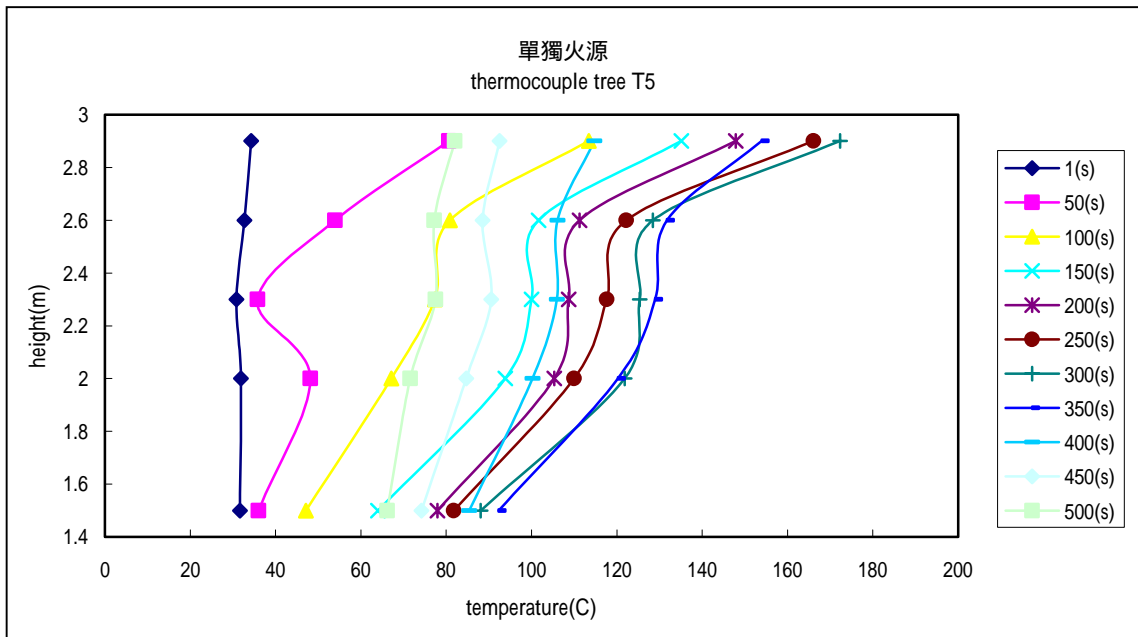


圖 5-22 熱電偶樹 T5 所測得之垂直溫度變化



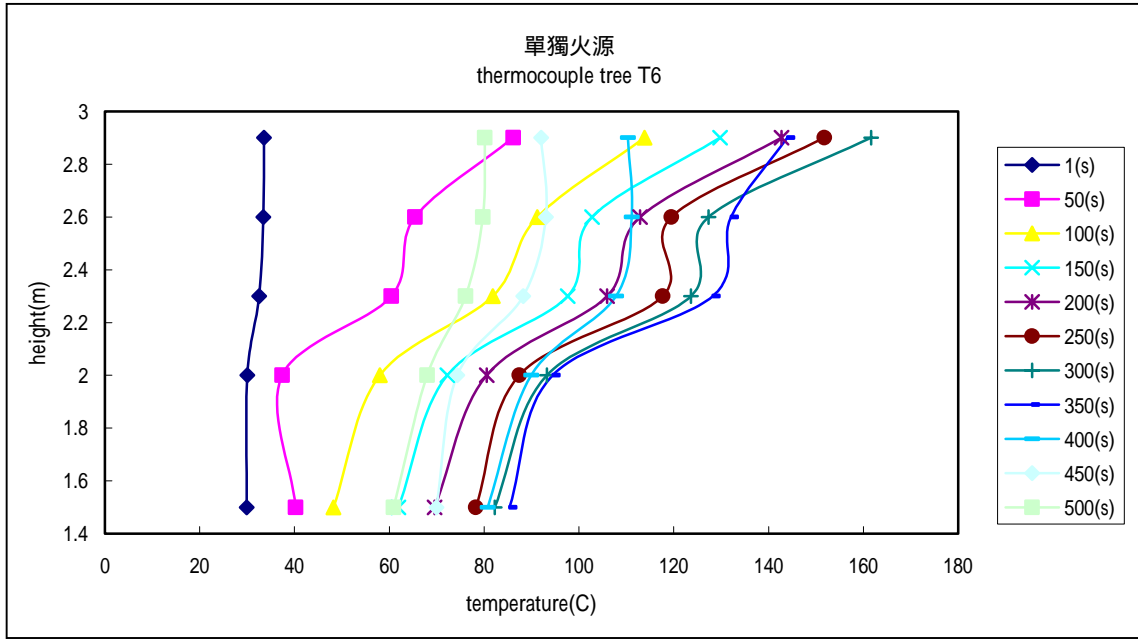


圖 5-23 熱電偶樹 T6 所測得之垂直溫度變化

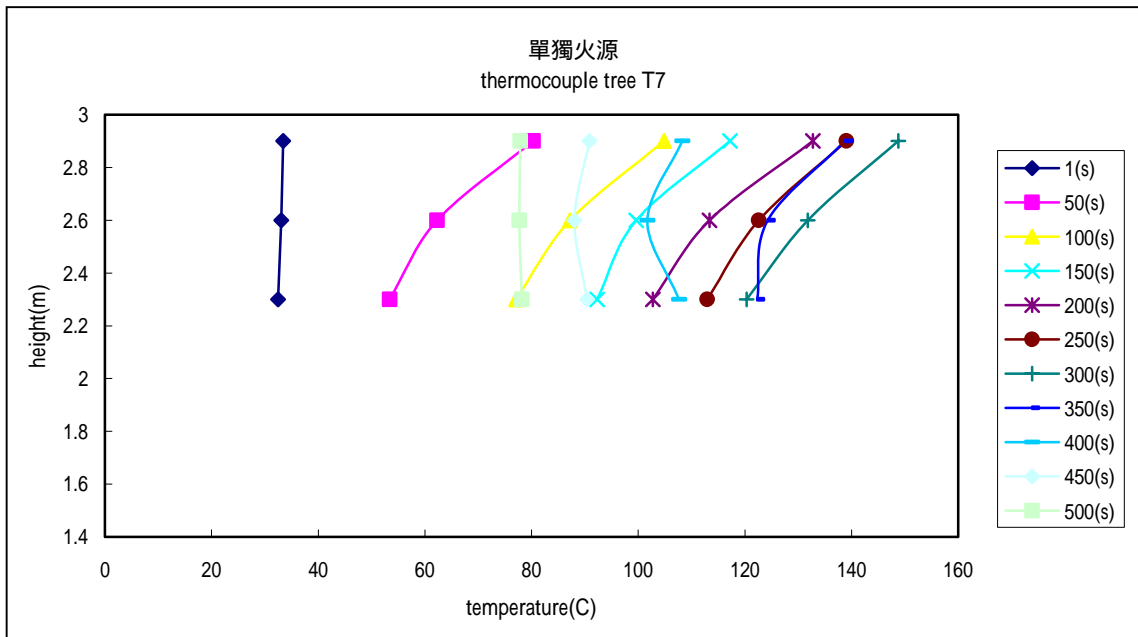


圖 5-24 熱電偶樹 T7 所測得之垂直溫度變化

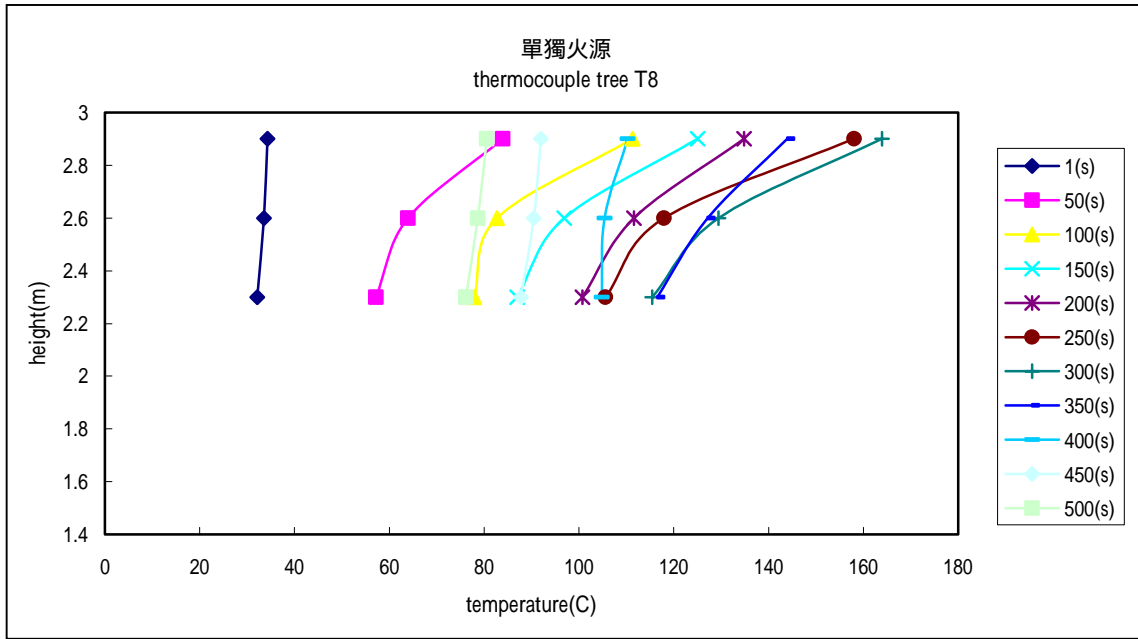


圖 5-25 熱電偶樹 T8 所測得之垂直溫度變化

表 5-2 則為各實驗之撒水頭作動時間。圖 A-1 到圖 A-39 則為火場高度 2.9m 之溫度變化與垂直溫度變化。

表 5-2 實驗結果

實驗編號	火源位置	排煙設備操作方式	撒水頭作動時間
1-1	A	自然排煙	77s
1-2	A	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	81s
1-3	A	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	80s
2-1	B	自然排煙	182s
2-2	B	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	199s
2-3	B	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	172s
3-1	C	自然排煙	188s
3-2	C	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	202s
3-3	C	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	183s

由於實驗規劃等因素，再加上每一次的實驗需花費較長的時間，因此造成所有的實驗無法在同一天完成，而必須分次進行。實驗 1-1、1-2、1-3 與實驗 2-1、2-2、2-3 因為進行實驗的時間相距不遠，所以周圍環境條件亦相近，實驗區劃內之溫度約為 30 。然而由於實驗 3-1、3-2、3-3 是在期末成果報告後才進行，所以周圍環境條件有些差異，在實驗當時實驗區劃內之溫度約為 20 ，水溫也較低。由於實驗條件的差異，造成實驗 3 無法與實驗 1 2 針對改變火源位置對撒水頭作動時間的影響進行比較，因此不對此部份進行討論。

而由實驗所得之結果可以得到以下的結論：

- (1) 撒水設備與排煙設備的設置確實可以有效降低火場的溫度，在未設置撒水設備時，火場最高溫度達到 180 ，但是當有設置撒水設備，且撒水頭作動之後，火場最高溫度只到達約 140 左右，火場平均溫度也明顯的下降。

- (2) 比較自然排煙與強制排煙時撒水頭的作動時間可以發現，當採用強制排煙時，撒水頭作動的時間會比自然排煙時稍微延遲。以實驗 2-1 與 2-2 相比較，當使用自然排煙時，撒水頭作動的時間為 182s，但是若採用強制排煙，則撒水頭作動的時間延遲到 199s，延遲了 17s。強制排煙會造成撒水頭延遲作動是因為強制排煙會將熱煙氣排出，因而減緩熱煙氣層累積的速度，溫度升高也較緩慢，而且強制排煙會擾亂火焰與煙的流動，造成煙層的不穩定，溫度的變化也較大，採用自然排煙時，煙層的厚度很快的累積，溫度也很快的升高，因此撒水頭會很快的作動。而實驗 2-3 由於一開始也是採用自然排煙，因此撒水頭作動的時間也較強制排煙時快。

在實驗 1-1、1-2、1-3 中，由於火源位在撒水頭的正下方，因此撒水頭會迅速的作動，實驗 1-2 中撒水頭之作動時間雖然還是有受到排煙的影響，但是影響並不明顯，只比實驗 1-1 延遲 4s，實驗 1-3 延遲 1s。

- (3) 排煙口作動時間、排煙口與火源相對位置對於撒水頭的作動與滅火效果佔有相當大的影響。如圖 5-26 和圖 5-27 所示，當排煙口開啟並開始排煙時，煙流會往排煙口方向流動，假若兩側皆有裝設排煙口，則煙流會分別向兩側擴散，因此火源上方的撒水頭皆會作動而滅火。但是若只有一側有排煙口，則煙流只會往排煙口方向流動，此情況會造成只有煙流方向的撒水頭作動，但是火源上方的撒水頭卻不會作動，因此火勢會往反方向不斷的擴大燃燒而無法撲滅。

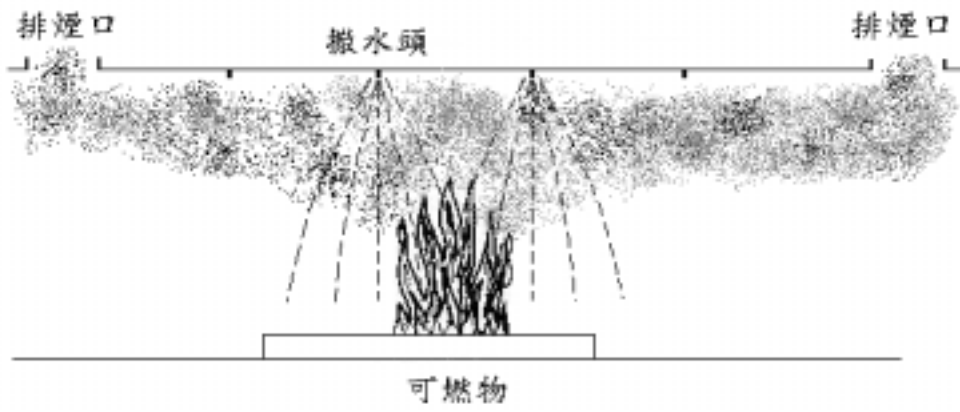


圖 5-26 排煙口位置與撒水頭作動情形(a)

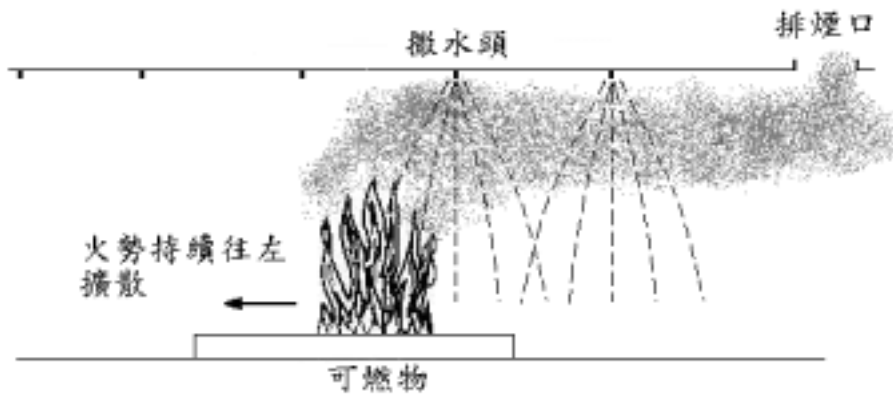


圖 5-27 排煙口位置與撒水頭作動情形(b)

## 第六章 實驗與電腦數值模擬之比較分析

本研究之電腦數值模擬部分是使用 NIST/BFRL (美國國家標準暨技術協會火災實驗室) 所發展出的 CFD 火災模擬軟體, FDS (Fire Dynamics Simulator) 來進行模擬。

此火災模擬軟體的主要架構可以分為以下三個部分：

- (1) 前處理：於前處理中，必須以純文字格式輸入模擬之模型尺寸、物件規格、格點分配及邊界條件等，作為模擬計算之基礎。
- (2) 數值解：此部份即是 FDS 的運算核心部分，將前處理所輸入的物件幾何尺寸等參數讀入，以數值方法求解，並將所需的計算結果輸出。
- (3) 後處理：FDS 的後處理部分與 Open GL 的繪圖軟體“Smokeview”結合，可將 FDS 所計算出的結果利用圖形或 2D 與 3D 動畫的效果呈現。

### 6.1 電腦數值模擬相關條件設定

由於此電腦數值模擬之數據與結果要與實驗之數據與結果相比較，因此模擬之空間尺寸、儀器配置與參數設定皆與實驗相同。數值模擬相關條件設定如下。

#### 6.1.1 格點配置

為求模擬之效率及正確性，於數值計算時格點數目之安排是一項重要的課題。一般而言，格點數量多，準確度雖提高，但相對的模擬時間將增長。故在提高運算效率又得以預測合理流場情況的前提下，盡量的將格點數目減少乃是第一要務。此模擬之空間為 12m×7m×3m，將空間分成 72×45×18 個格點，其格點之分佈如圖 6-1 所示。

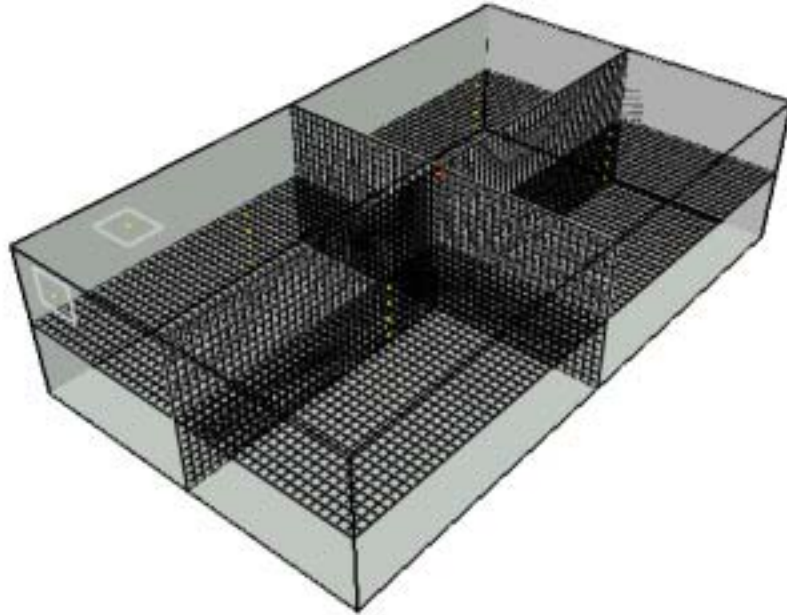


圖 6-1 格點分佈圖

### 6.1.2 各項物件配置與邊界條件

對於均質模型之暫態分析，係假設初始模擬空間呈靜止狀態，無速度及能量源，室內空間壓力為 1 大氣壓，溫度為 303K，亦無二氧化碳及水蒸氣之存在。

各項輸入參數與邊界條件設定如表 6-1 所示。

表 6-1 輸入參數與邊界條件

設定參數		
種類	參數	數值
實驗空間	實驗空間大小	12m×7m×3m
	格點分佈	72×45×18
	邊界	水泥板
火源	燃料	工業用酒精
	最大熱釋放率	190KW
撒水頭	RTI	80[m <sup>1/2</sup> sec <sup>1/2</sup> ]
	作動溫度	68
	液滴大小, $d_m$	1000 μ m
	與天花板距離	10cm
排煙口	尺寸	0.8m×0.6m
進氣口	尺寸	0.8m×0.6m

### 6.1.3 實驗配置

此模擬部分之實驗設備配置與實驗 2-1、2-2、2-3 相同，火源中心位置在 ( 9,3.5 )，並採用三種不同之排煙設備操作方式。

表 6-2 電腦數值模擬之項目

實驗編號	火源位置	火源熱釋放率	排煙設備操作方式
2-1	B	190KW	自然排煙
2-2	B	190KW	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s
2-3	B	190KW	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s



## 6.2 實驗與電腦數值模擬之比較分析

表 6-3 為電腦數值模擬結果。下面將針對實驗與電腦數值模擬之火場溫度及撒水頭作動時間進行比較分析，以判斷電腦數值模擬之正確性。

表 6-3 電腦數值模擬結果

實驗編號	火源位置	排煙設備操作方式	撒水頭作動時間
2-1	B	自然排煙	188
2-2	B	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	197
2-3	B	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	188

### 6.2.1 火場溫度之比較

圖 6-2 到圖 6-5 為各個實驗所得到之火場溫度與經由 FDS 模擬所得到之火場溫度比較，在此四張圖中皆為熱電偶樹 T4 在距天花板下 10cm 所測量到火場煙溫變化。由各圖中之實驗數值與模擬數值相比較可以發現，從火源一點燃到撒水頭作動的這段期間，實驗與數值模擬之溫度變化趨勢相當接近。然而在撒水頭作動之後，實驗與數值模擬之溫度變化趨勢雖然亦相近，但是實驗的溫度都較數值模擬所得之溫度為低，這是由於在實驗中，當撒水頭作動後，水會噴撒到酒精盤中，而造成熱釋放率之降低，然而數值模擬之火源熱釋放率皆保持穩定，不受到撒水頭撒水的影響。

而由圖 6-2 可以發現，在實驗中，當大約 400 秒時，火場溫度開始下降，這是由於酒精盤中之酒精已經快燃燒完（酒精量為 5 公升），因而造成熱釋放率降低。然而數值模擬時，因為酒精可以無限量的供應，因此火場溫度可以保持的相當穩定。

附圖 B-2 附圖 B-8 為電腦數值模擬依據計算結果所描繪出的圖形，經由這些圖形可以清楚地看出火場溫度隨時間之變化情形。由圖中可以清楚的看到熱煙柱的產生，在此熱煙氣柱附近的溫度明顯的高於其它區域。由於此實驗為模擬一般建築之密閉空間，因為在四周牆壁及天花板有牆邊界效應存在，經由浮力效應及亂流驅動的火柱，溫度會隨著高度的增加而遞減，但是在天花板附近由於熱量無法向上擴散，轉而向水平方向擴散，因而產生了一水平熱氣層，由附圖 B-2 可清楚的看到此熱氣層的形成，而隨著時間的增加，此熱氣層會漸漸的向下移動。

而附圖 B-3 附圖 B-5 為各實驗之模擬情況。而由這些圖形可以看出撒水頭作動之後確實可以將火場溫度降低，但是由於水滴會對熱煙氣產生拉曳力，造成煙層向下移動，使得靠近地板之區域的溫度升高。

附圖 B-6 附圖 B-9 則為火場截面之速度場分布，由圖中可以看出在熱煙氣柱有最高的速度，而由於熱煙氣柱被天花限制住，造成高熱的氣體會轉向水平的方向而形成天花板噴流，在此區域之速度亦相當高。

### 6.2.2 撒水頭作動時間之比較

表 6-4 為實驗與電腦數值模擬之撒水頭作動時間比較。經由比較之後，電腦數值模擬所得到之撒水頭作動時間與實際實驗之撒水頭作動時間相距不大，誤差在 10 % 以內。

表 6-4 實驗與電腦數值模擬之撒水頭作動時間比較

實驗編號	排煙設備操作方式	撒水頭作動時間	
		實驗	數值模擬
2-1	自然排煙	182s	188
2-2	點火後立即開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	199s	197
2-3	撒水頭作動後開啟，排煙量 0.4m <sup>3</sup> /s	172s	188

由於此次實驗屬於初次之研究，實驗設備較缺乏，所能夠量測到之數據較少，因此只能針對火場溫度以及撒水頭作動時間進行比較。但是經由比較實驗與電腦數值模擬所得之數據，差異都非常的小，說明此火災模擬軟體 FDS 具有相當程度的可靠度。如果能夠將火場之個種參數條件作更詳細的量測，如火源之熱放率、周圍的環境條件、進氣口之風量等，若能將這些參數完整的輸入至模擬軟體 FDS 中，則所得到的結果一定會與實際情況更加符合。

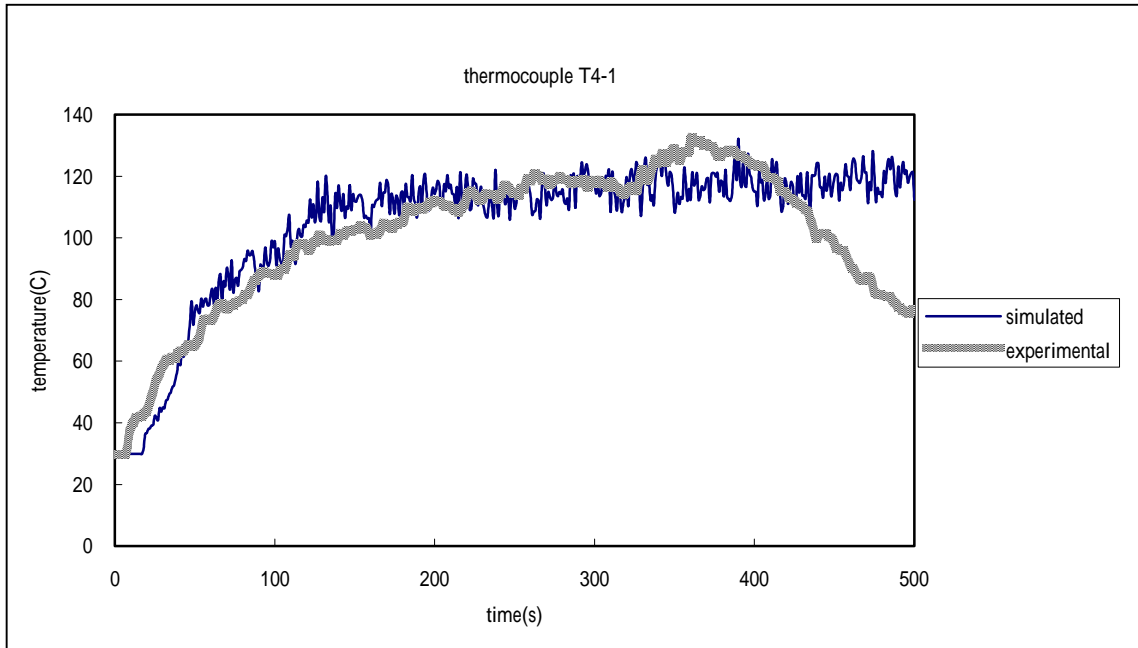


圖 6-2 熱電偶 T4-1 所測得之煙溫比較 ( 單獨火源 )

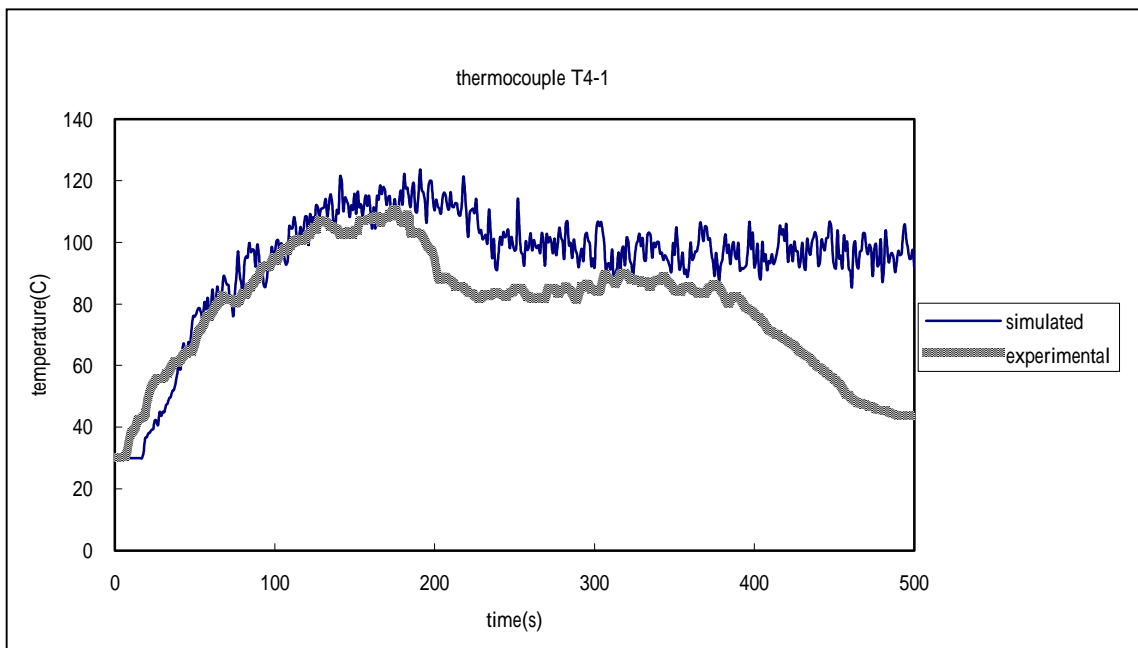


圖 6-3 熱電偶 T4-1 所測得之煙溫比較 ( 實驗 2-1 )

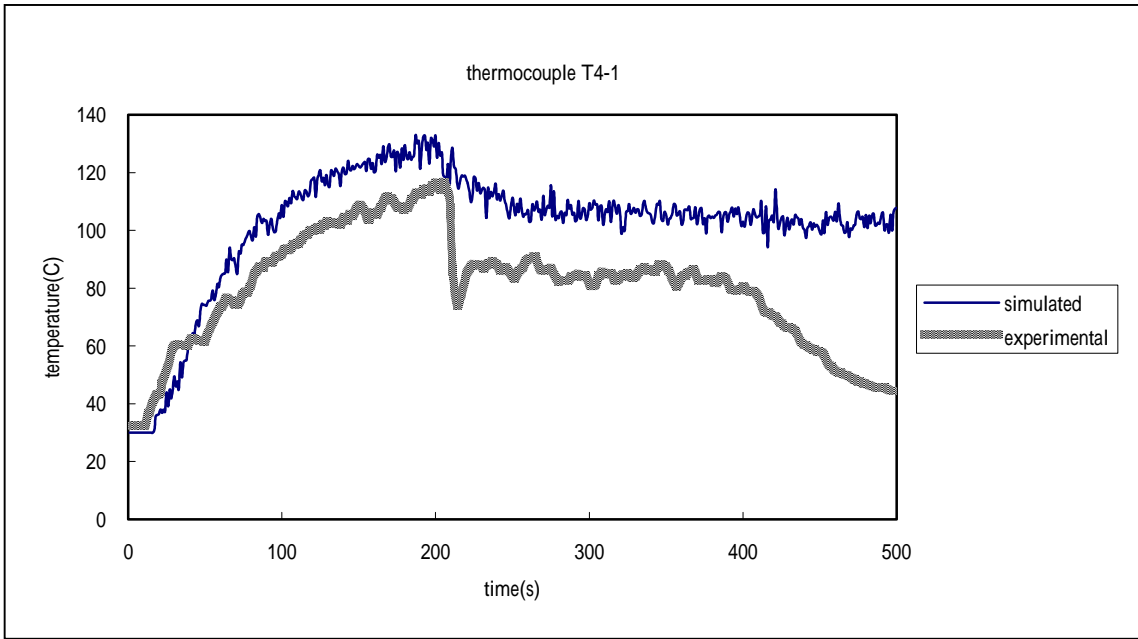


圖 6-4 熱電偶 T4-1 所測得之煙溫比較 ( 實驗 2-2 )

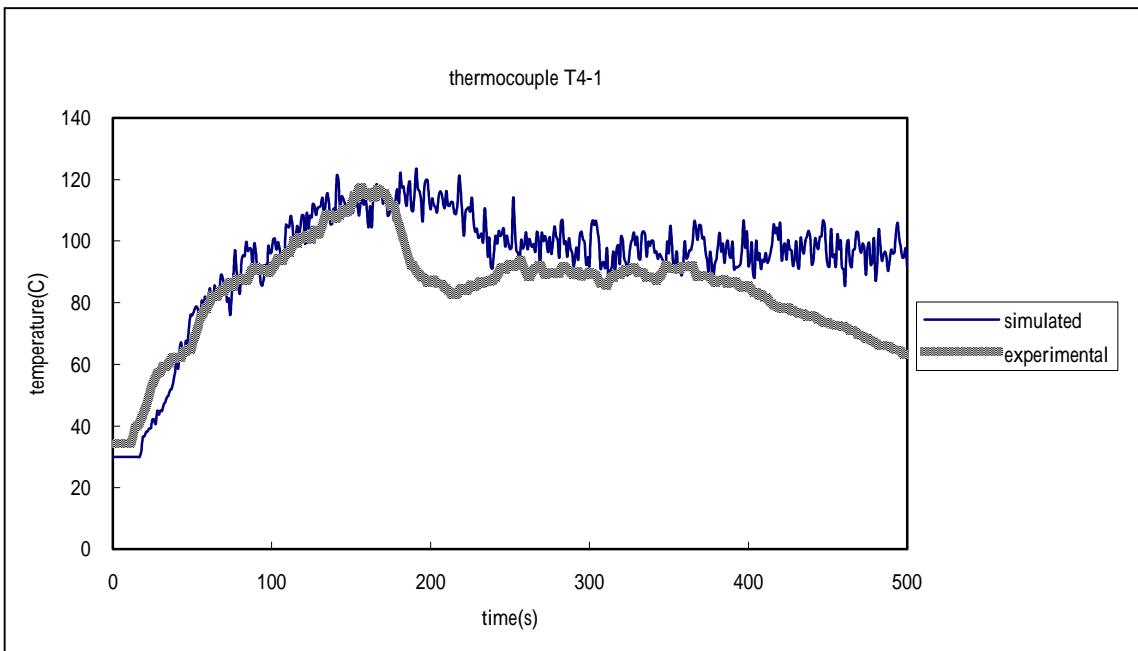


圖 6-5 熱電偶 T4-1 所測得之煙溫比較 ( 實驗 2-3 )

## 第七章 結論與未來展望

### 7.1 結論

本研究之目的在於探討排煙設備與撒水設備之交互影響特性，針對排煙量、排煙口位置及火源位置等參數進行比較分析與探討，並將實驗所得之數據與電腦數值模擬之結果進行比較，以驗證電腦數值模擬之可靠性。

由實驗與電腦數值模擬之結果可歸納出下列幾項結論。

- (1) 由火場溫度之變化圖可看出一但撒水設備作動後，即可以有效地降低火場的溫度，甚至將火撲滅。
- (2) 強制排煙口的設置，可有效的排出熱煙氣，降低火場溫度，由實驗與電腦數值模擬的結果顯示，單一區劃空間內強制排煙，其火場溫度除火源區外，皆較自然排煙的情況為低。
- (3) 火場中如同時存在排煙設備與撒水設備時，此二種設備之啟動時間對抑制火場擴散及人員避難逃生有相當程度之影響，研究結果顯示火災初期以撒水手段快速降低火場溫度，甚至撲滅火災之效果皆相當不錯，一但排煙設備先啟動則有可能因煙層流動引進外氣之結果，導致撒水系統延後啟動，因而造成火勢的擴大，影響滅火的困難度。

依據 NIST 所作之研究報告，當火源遠離排煙口時，排煙對於撒水頭的作動時間不會有太大的影響；當火源位於排煙口之正下方時，則撒水頭之作動時間會明顯的延遲。然而由此實驗與電腦數值模擬的結果，儘管火源不是位於排煙口之正下方，但是排煙還是會對撒水頭的作動造成延遲，這或許是因為實驗空間過於狹小，造成排煙量雖然也很小，但對煙層的流動還是有影響，因此在往後的實驗中，仍需針對此部份作進一步之探討。

- (4) 經由比較實驗與電腦數值模擬所得到之結果，由電腦數值模擬所模擬出火場之溫度變化與分佈，撒水頭之作動時間等，皆與

實驗所得之數據相當接近，具有相當程度的可靠度。而此模擬之另一項優點，即是可利用 Smokeiew 將模擬結果利用 2D 或 3D 動畫表現出來，可讓使用者很迅速清楚的瞭解整個火場的變化。

## 7.2 未來展望

由於本研究受限於時間與場地的限制，因此僅能進行初步的分析，未來可發展的空間及待突破的方向敘述如下：

- (1) 由於受限於實驗場地的不足，只能進行較小尺寸之實驗研究，區劃空間、撒水頭數目、排煙口大小與火源大小皆顯得不足，因此可進行實驗之變數也較少。未來如果有較大之空間與經費可進行全尺寸之實驗，模擬實際建築物內部的設置，所得到的數據將更為準確與實用。
- (2) 本研究中所模擬之撒水頭所噴灑出的水滴之平均直徑為 1000  $\mu\text{m}$ ，雖然大水滴之實際投射密度較大，得以到達火源處將火源撲滅，但是小水滴之熱傳效果較好，可有效降低火場溫度。因此未來可繼續探討水滴在火場中因蒸發凝結或粒子結合所產生之粒徑變化對於熱傳效果的影響。

由於本研究計劃為水系統研究計劃之第一部份，加上此研究設備為國內首次規劃設置，因此還有許多的地方需要改進，如排煙風機的改善，因為現有之排煙風機所能夠提供的風量不足，最大只能到 0.4m<sup>3</sup>/s，與法規所規定之 2.0m<sup>3</sup>/s 有些差距。另外也需採購 load cell，如果能夠量測出更準確的熱釋放率，進行電腦數值模擬時，輸入之參數條件也會與實驗更加一致。

而接下來的研究中，也將增加實驗的參數，比如增加撒水頭的數目，增加熱釋放率等，另外也將針對其它形式的撒水頭進行測試，比較之間的差異。

此份研究報告雖然進行的實驗次數不多，所能夠提供的數據亦有限，但是經由這些實驗的進行卻可以得到相當多的經驗，瞭解還有那些地方需要改進，相信只要將這些缺點改進，增加實驗的次數，此研究計劃之內容會更加完整。



## 參考文獻

1. Thomas P H et al. "Investigations into the flow of hot gas in roof venting." Fire Research Technical Paper No7, London, HMSO, 1963.
2. Hankins, J. Sprinkler Systems, "An Approach to Active Fire Resistant," U.S. Department of Commerce, NBS, Dec. 1980, P197-200.
3. National Fire Prevention Association. "Guide for smoke and heat venting," 204M. Quincy, Massachusetts, 1982.
4. Heskestad G. "Model study of automatic smoke and heat vent performance in sprinklered fires," Factory Mutual Research Corporation Technical Report FMRC Serial no. 21933 RC74-T-29. Norwood, Massachusetts, FMRC, 1974.
5. Talbert J H. "Smoke and heat venting for sprinklered buildings: a different perspective," Fire Journal, May/June 1987, 26-31.
6. Battrick P. "Venting plus sprinklers-the case against," Fire International, 1989, 10(101)31-34.
7. Verband der Sachversicherer eV. Richtlinien für Planung und Einbau von Rauch- und Warmbzugsanlagen (RWA) für den Brandfall in gewerblichen und industriellen Hallenbauten. Köln, Verband der Sachversicherer eV, 1973.
8. Morgan H P and Gardner J P. "Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centers," Building Research Establishment Report. Garston, BRE, 1990.
9. A.L. Busby, and G.L. Pigaman, "Roof Ventilation Requirements for Industrial Plants," Final Report Project Number L-565, Armour Research Foundation, Chicago, 1955.
10. Factory Mutual Engineering Corporation, "Heat Vents and Fire Curtains, Effect in Operation of Sprinklers and Visibility," Factory Mutual Research Corporation, Norwood MA, 1956.
11. M.R. Suchomel, "A Preliminary Study of Factors Influencing the Use of Vents with Ordinary Degree Sprinklers," File NC449, assignment 63K4340, Report prepared by Underwriters Laboratories for National Board of Fire Underwriters, July 30, 1964.
12. Morgan H. P. and Marshall N. R. "Smoke control measures in a covered two-storey shopping mall having balconies as pedestrian walkways," Building Research Establishment Current Paper CP11/79, Garston, BRE, 1979.

13. Markatos N.C. and Pericleous, K.A. “ An Investigation of 3 D Fires in Closures, ” Fire Dynamics & Heat Transfer, HTD vol.25,ASME,New York,pp.115-124,1983.
14. Kevin B. McGrattan,Anthony Hamins,David Stroup, “ Sprinkler,Smoke & Heat Vent,Draft Curtain Interaction—Large Scale Experiments and Model Development ” , National Institute of Standards and Technology.
15. 鄧治東 ,「火災排煙設備系統與自動撒水系統交互影響之研究 ( )」, 內政部建築研究所研究計劃 , 1999 年。
16. 羅國少 ,「區劃空間內火災熱流場研究」, 中原大學機械工程系碩士論文 , 1999 年 6 月。
17. Nam,S. “ Numerical Simulation of Smoke movement IN Clean Room Environment ” ,Fire Safety Journal,Vol 34,2000.
18. Bullen M.L. 1974. “ The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. ” Fire research Note No.1016,Garston, U.L.: Buolding Research Establishment.
19. Morgan H.P.1979, “ Heat transfer from a buoyant smoke layer beneath a ceiling to a sprinkler spray.1. ” A tentative theory.Fire and Materials 3:27-32.
20. Alpert R.L. 1985. “ Numerical modeling of the interaction between automatic sprinkler sprays and fire plumes. ” Fire Safety Journal 9:157-163.
21. Heskestad G. 1991. “ Sprinkler/hot layer interaction. ” NIST-GCR-91-590. Gaithersburg,Md:National Institute of Standards and Technology.
22. Cooper L.1991. “ Interaction of an isolated spray and a two-alyer compartment fire environment. ” NISTIR 4587.Gaithersburg,Md.: National Institute of Standards and Technology.
23. Chow W.K.,and N.K. Fong.1991. “ Numerical simulation on cooling the fire-induced air flow by sprinkler water sprays. ” Fire Safety Journal 17:163-290.
24. Forney G.P.,and K.B. McGrattan.1995. “ Computing the effects of sprinkler sprays on fire induced gas flow. ” Proceedings,International Conference on Fire Research and Engineering.Orlando:Society of Fire Protection Engineers.
25. Cooper,L. Y.,Harkleroad, H., “ An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-scale Multi-room Fire Scenarios ” , Journal of Heat Transfer,vol.104,pp.747-749,1982.

26. G.Heskestad and R.G. Bill. " Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects. " Fire Safety Journal,14:113-125,1988.
27. M.DiMarzo. " The effect of Minute Water Droplets on a Simulated Sprinkler Link Thermal Response. " Technical report,University of Maryland,1999.
28. T.S. Chan. " Measurements of Water Density and Droplets Size Distributions of Selected ESFR Sprinklers. " Journal of Fire Protection Engineering,6(2):79-87,1994.
29. N. Chermisinoff.Encyclopedia of Fluid Mechanics,Volume 3:Gas-Liquid Flows.Gulf Publishing Co.,Houston,Texas,1986.
30. H.Z. Yu,J.L. Lee,and H.C. Kung. " Suppression of Rack-Storage Fires by Water. " In Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium,International Association For Fire Safety Science,page 901-912,1994.
31. T.E. Waterman.et al.,"Fire Venting of Sprinklered Building,"IITRI Project No.8385,prepared by IIT Research Institute,Chicago,for,the,Fire Venting Research,July 1982.
32. T.E. Waterman,"Fire Venting of Sprinklered Buildings," Fire Journal, March 1984,pp. 30-36,86.
33. Alpert R L. Turbulent ceiling jet induced by large-scale fires. Combustion Science and Technology,1975,11 197-213.
34. Bullen M L. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. Fire Technology,1977,12(1)21-34.
35. Morgan H. P. and Baines K. Heat transfer from a buoyant smoke layer beneath a ceiling to a sprinkler spray: 2, an experiment. Fire and Materials.1979,3(1)34-38.
36. Liu S.T.Analytical and experimental study of evaporative cooling and room fire suppression by corridor sprinkler system.NBSIR 77-1287.1977.
37. You H.-Z,H.-C.Kung,and Z.Han.Spray cooling in room fires.NBS-GCR-86-515.1986.
38. You H.-Z,H.-C.Kung,H.-C,and Z.Han.The effects of spray cooling on the ceiling gas temperature at the door opening of room fires.1989.
39. 熊光華 , 建築物火載量與建築物防火安全設計之研究 , 中央警官學

- 校警政研究所碩士論文，1984，P159-183。
40. “ Fire Dynamics Simulator(Version 2)-Technical Reference Guide. ” NIST,National Institute of Standards and Technology,2001.
  41. Gary D. Loughheed,Ph.D., “ Smoke Movement for Sprinklered Fires ” ,ASHRAE Transactions:Symposia,2000.
  42. G. Grant,J. Brenton,D. Drysdale, “ Fire suppression by water sprays. ” Progress in Energy and Combustion Science 26,79-130,2000.
  43. V. Novozhilov,B. Moghtaderi, J.H. Kent,D.F. Fletcher, “ Solid fire extinguishment by a water spray. ” Fire Safety Journal 32 119-135,1999.
  44. V. Novozhilov, D.J.E. Harvie & J.H. Kent, “ A computational Fluid Dynamics Study of Wood Fire Extinguishment by Water Sprinkler. ” Fire Safety Journal 29 259-282,1997.
  45. P.L. Hinkley,FireE,MSFSE, “ Sprinkler operation and the effect of venting:studies using a zone model. ” ,Building Research Establishment Report,1992.
  46. 劉祥輝, “ 消防工程手冊-理論與實際 ” ,全華科技圖書股份有限公司,民國 90 年 11 月。
  47. 林船鐙, “ 高層建築物消防安全設備之概要-消防水系統介紹 ” 台灣省土木技師工會,民國 90 年 6 月。

# 附件 A

## 實驗結果之圖表

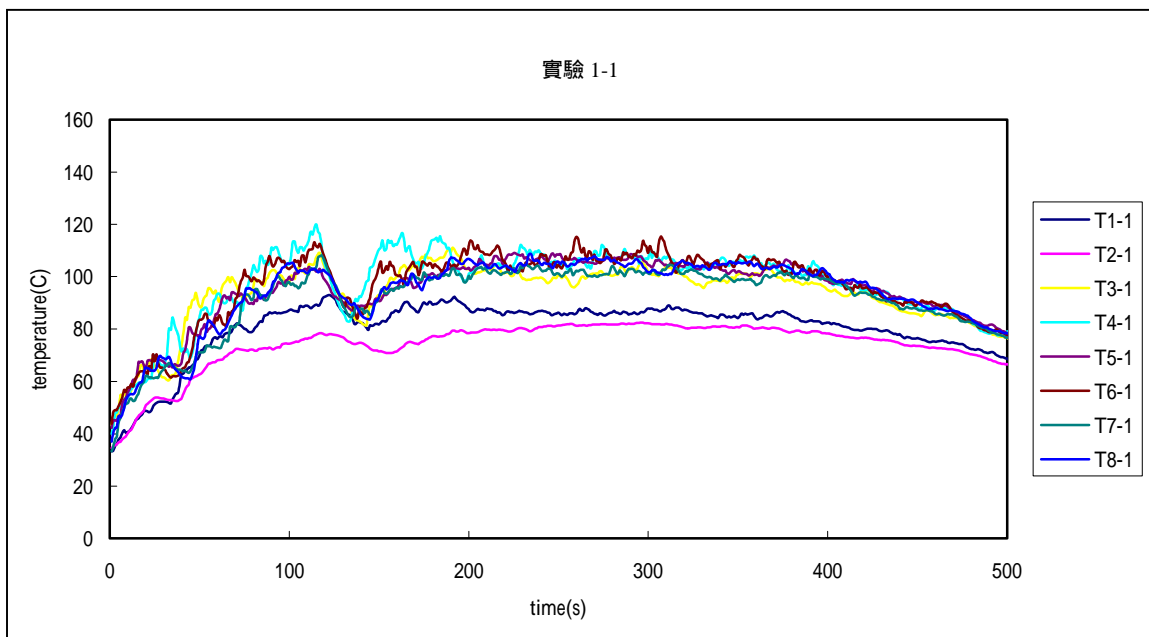


圖 A-1 實驗 1-1 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

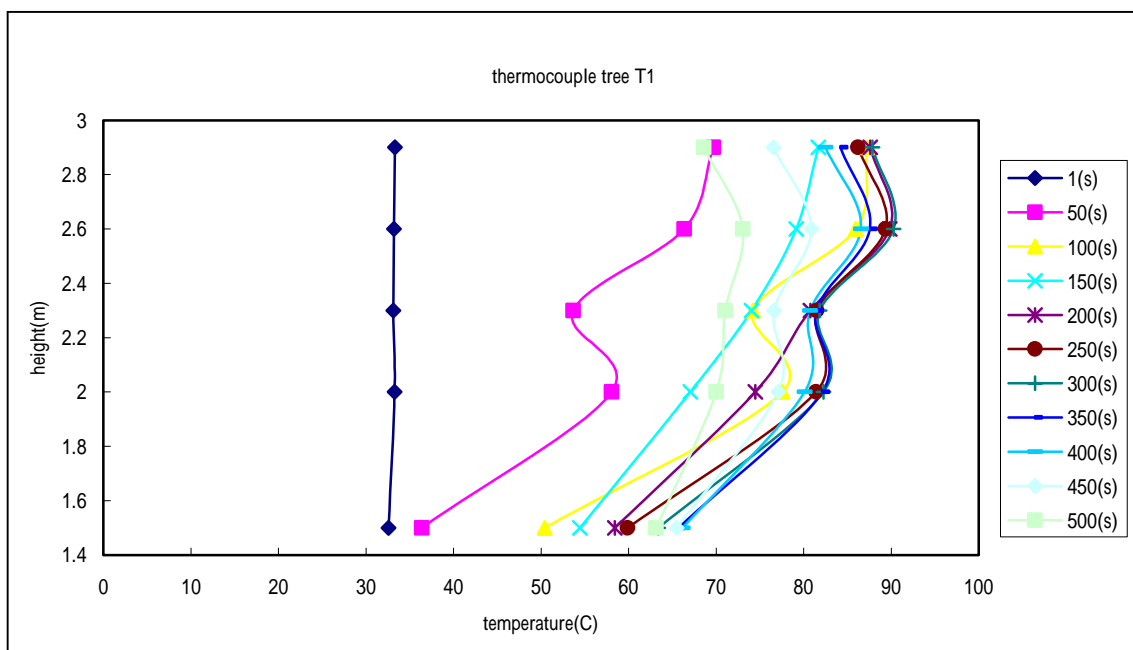


圖 A-2 熱電偶樹 T1 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

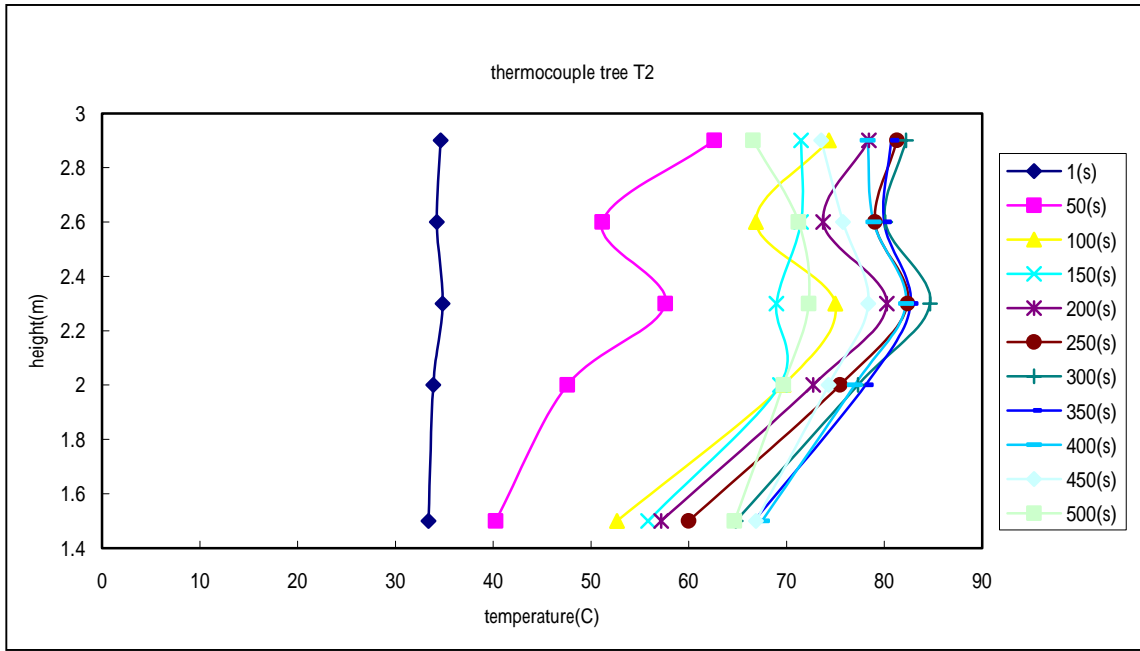


圖 A-3 熱電偶樹 T2 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

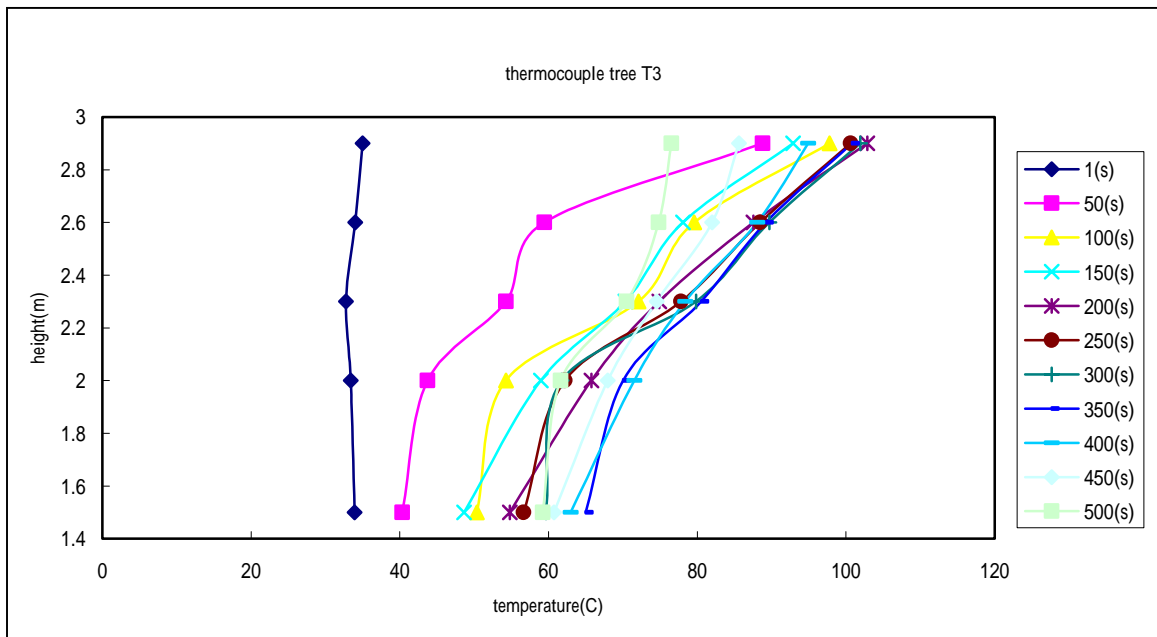


圖 A-4 熱電偶樹 T3 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

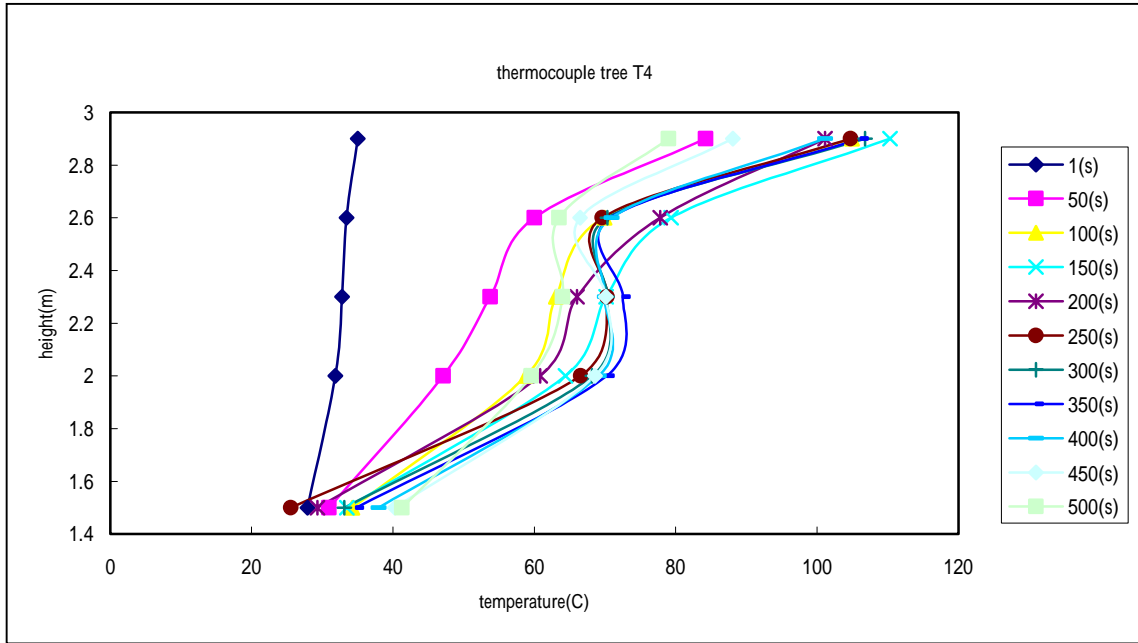


圖 A-5 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

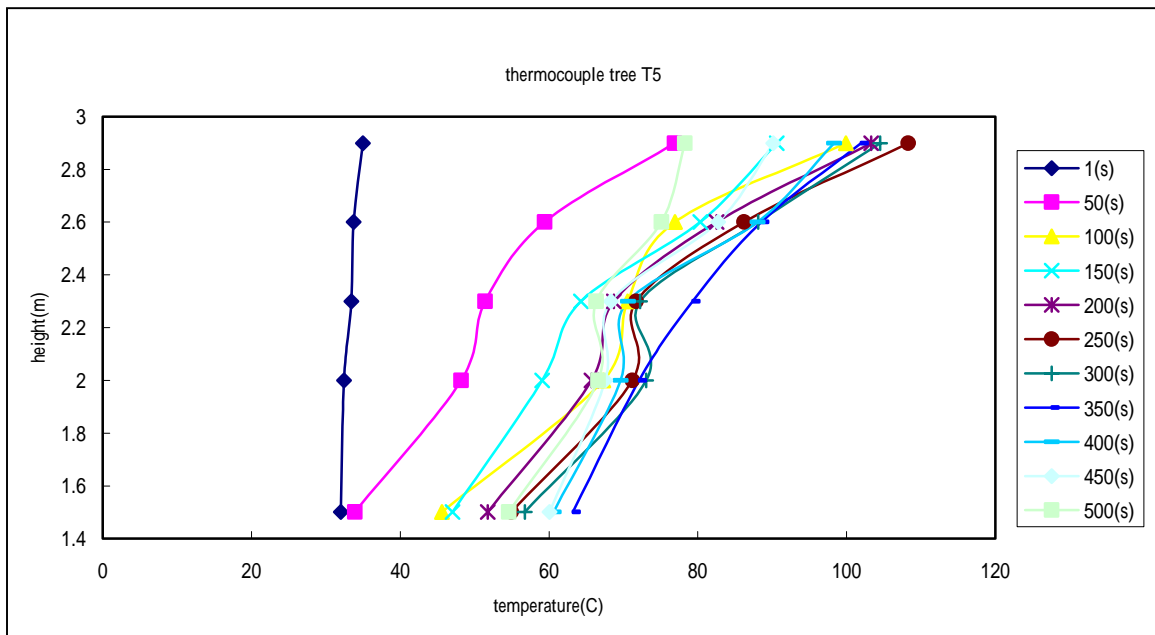


圖 A-6 熱電偶樹 T5 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )



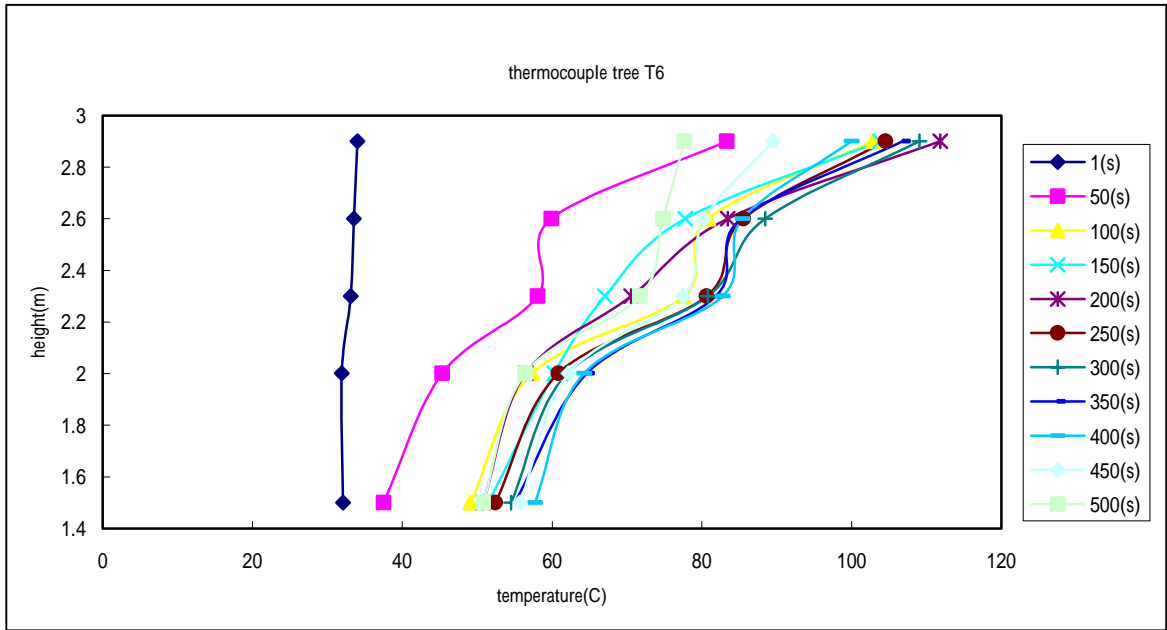


圖 A-7 熱電偶樹 T6 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

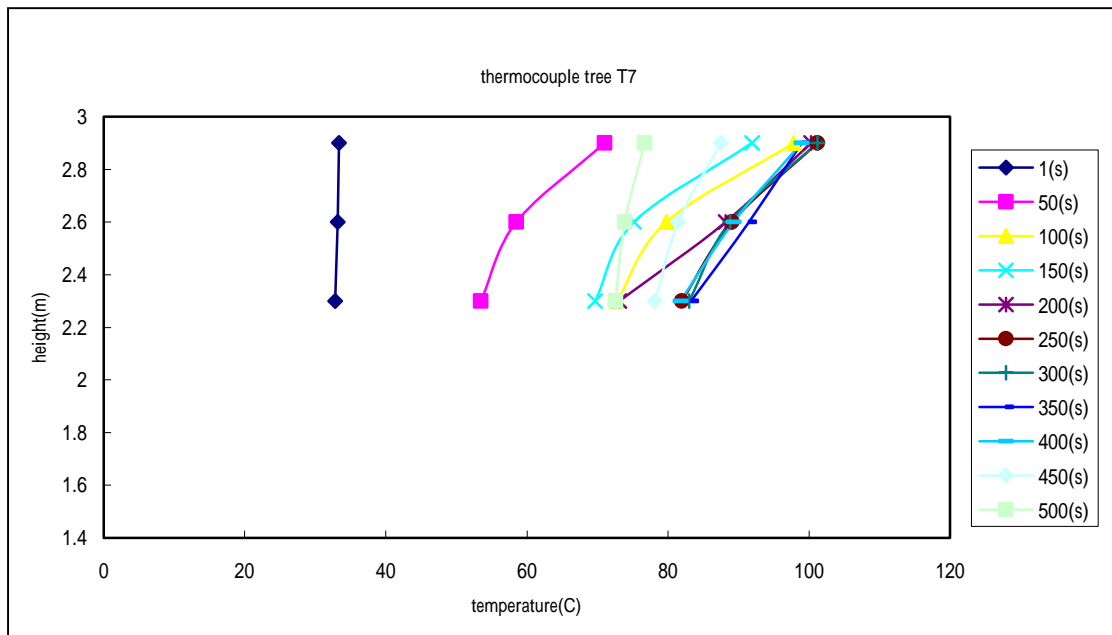


圖 A-8 熱電偶樹 T7 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

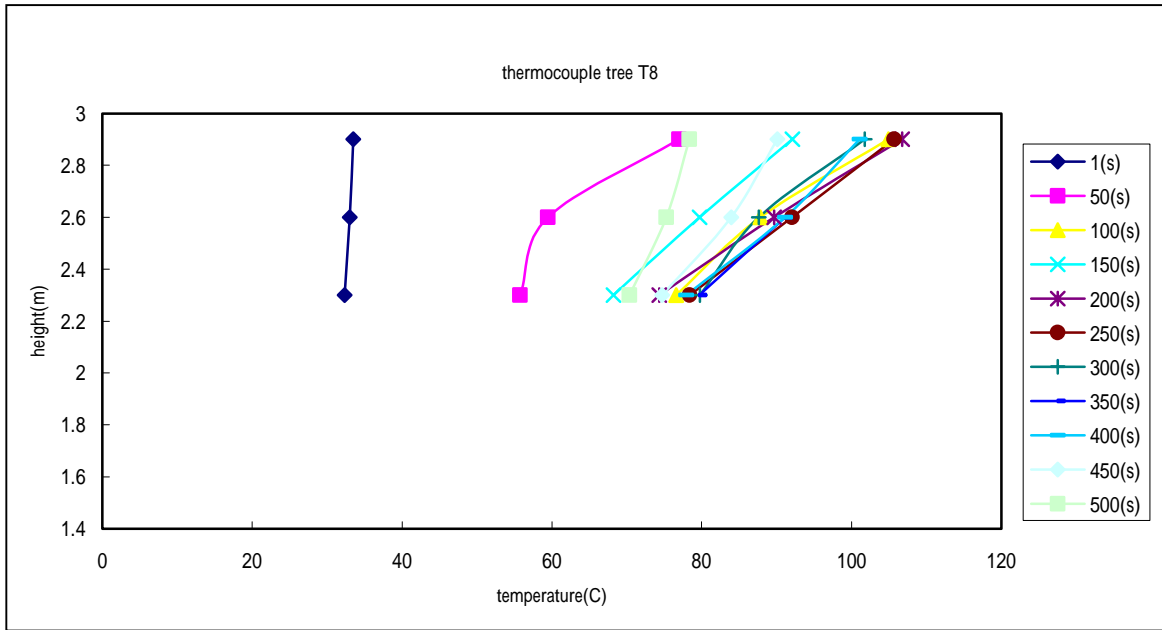


圖 A-9 熱電偶樹 T8 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-1 )

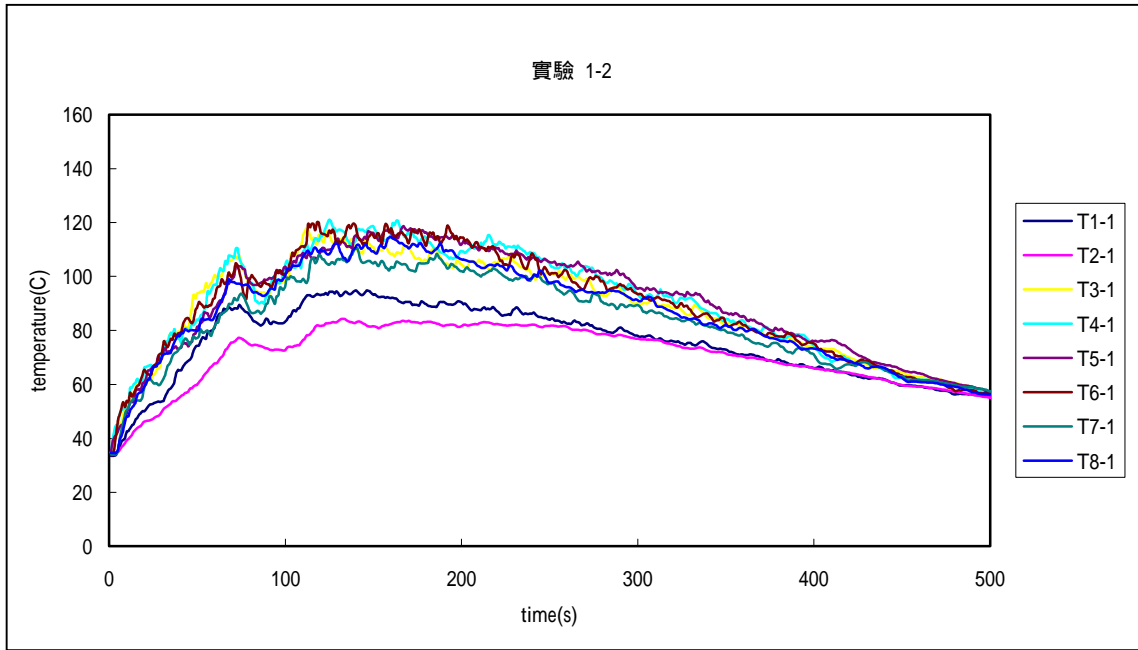


圖 A-10 實驗 1-2 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

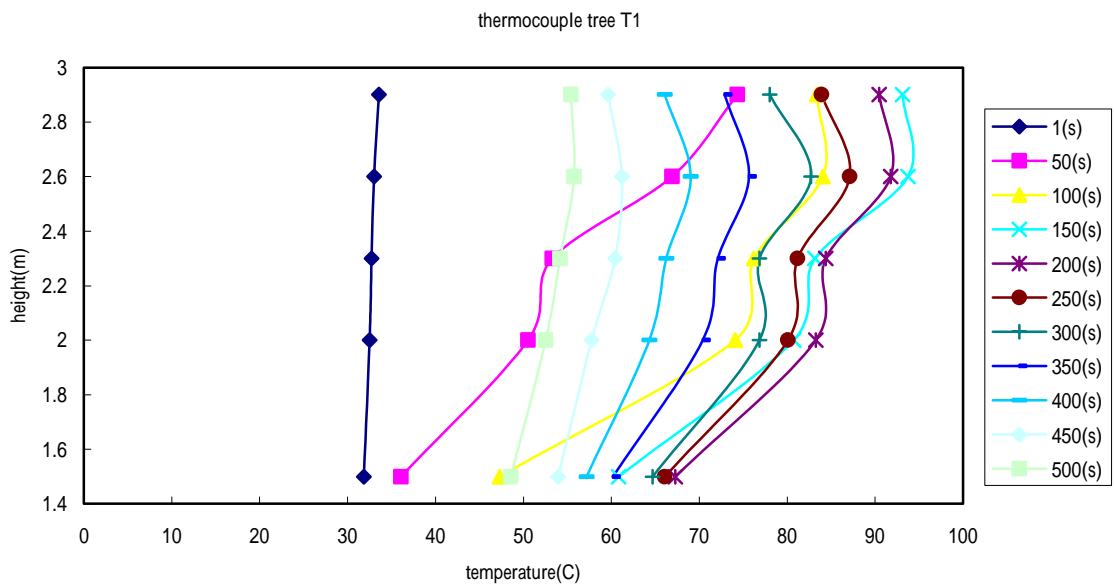


圖 A-11 熱電偶樹 T1 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

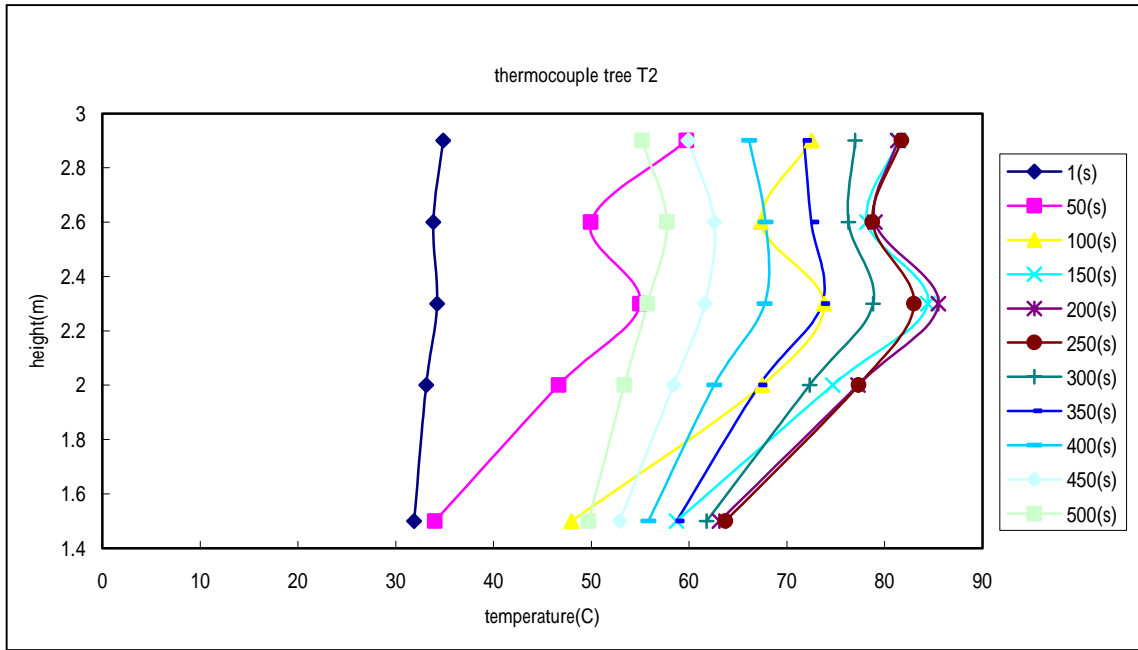


圖 A-12 熱電偶樹 T2 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

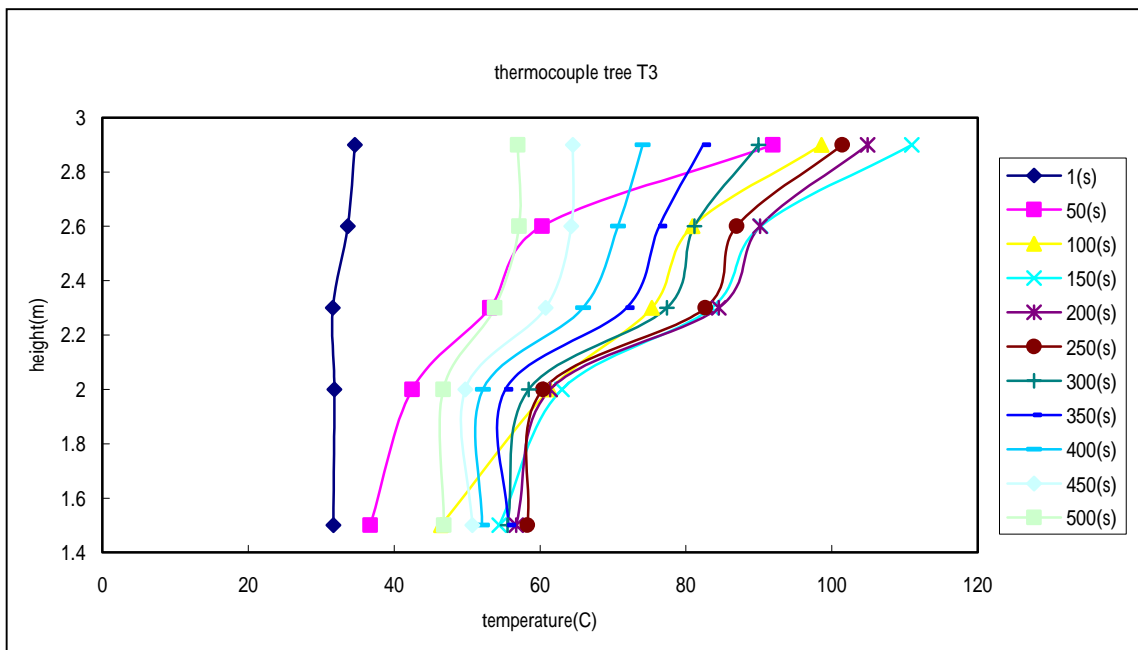


圖 A-13 熱電偶樹 T3 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

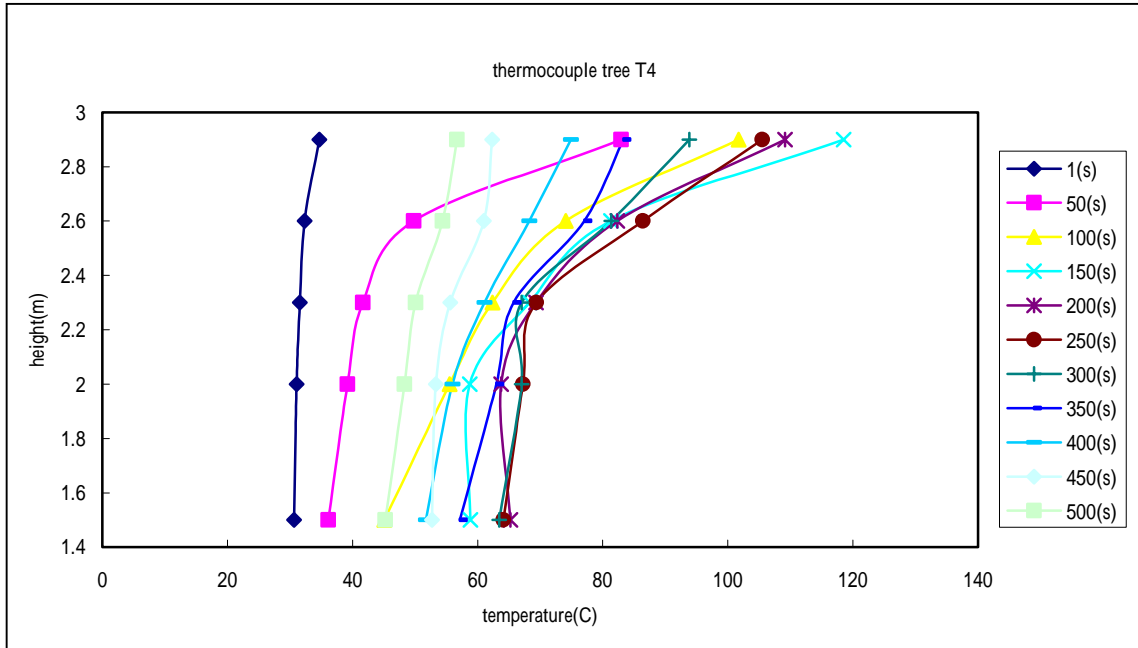


圖 A-14 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

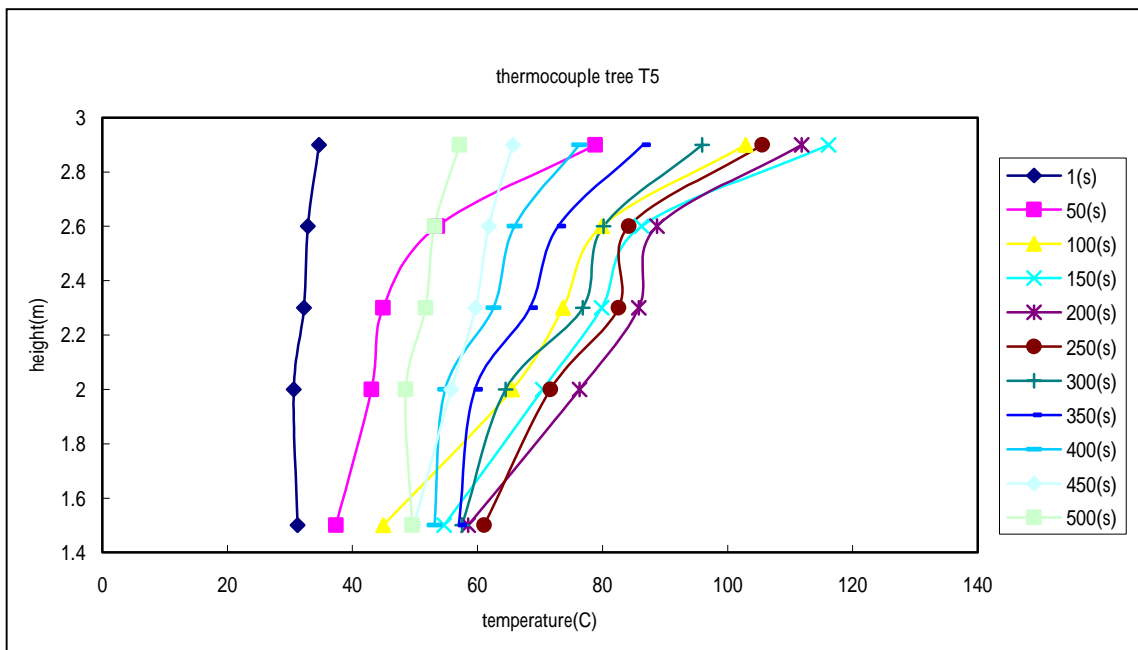


圖 A-15 熱電偶樹 T5 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

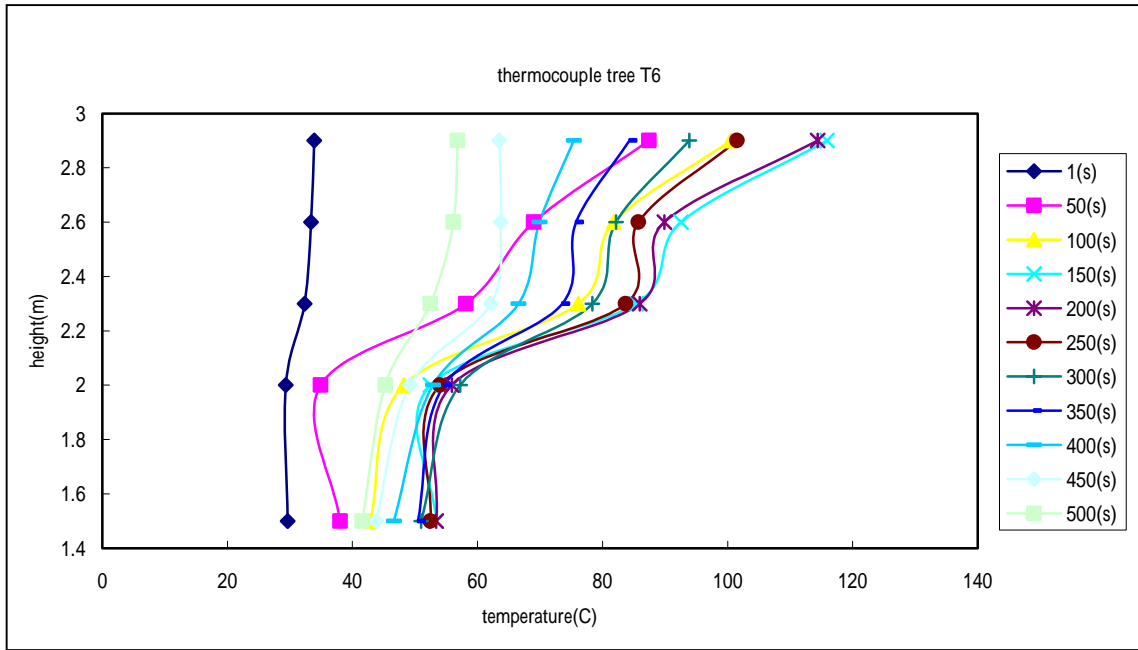


圖 A-16 熱電偶樹 T6 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

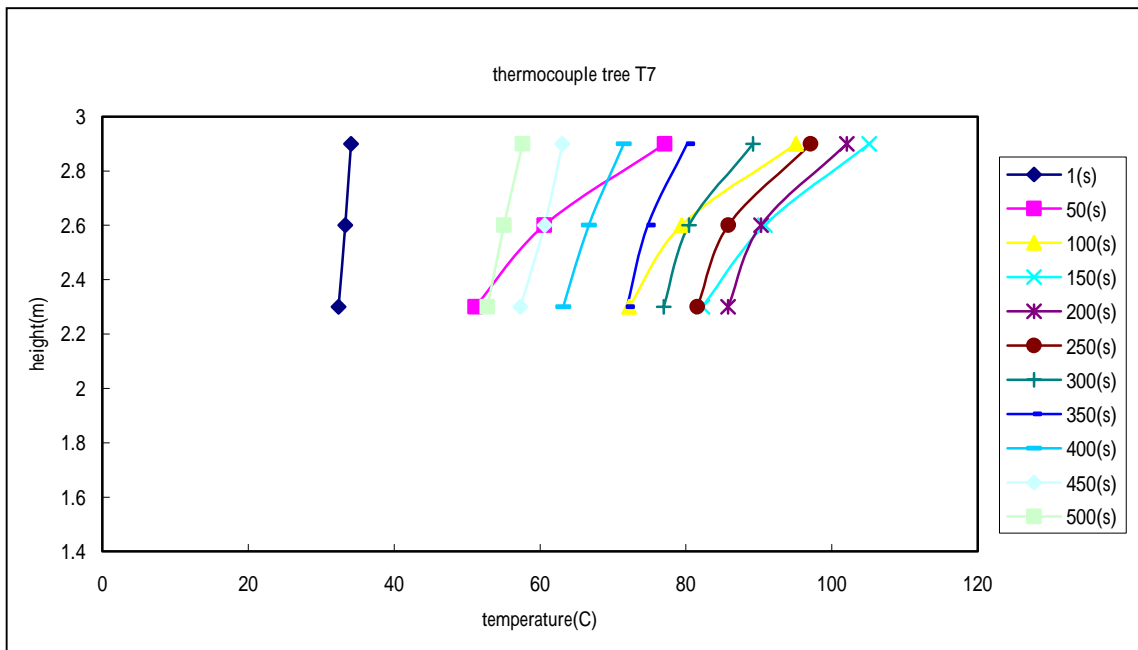


圖 A-17 熱電偶樹 T7 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

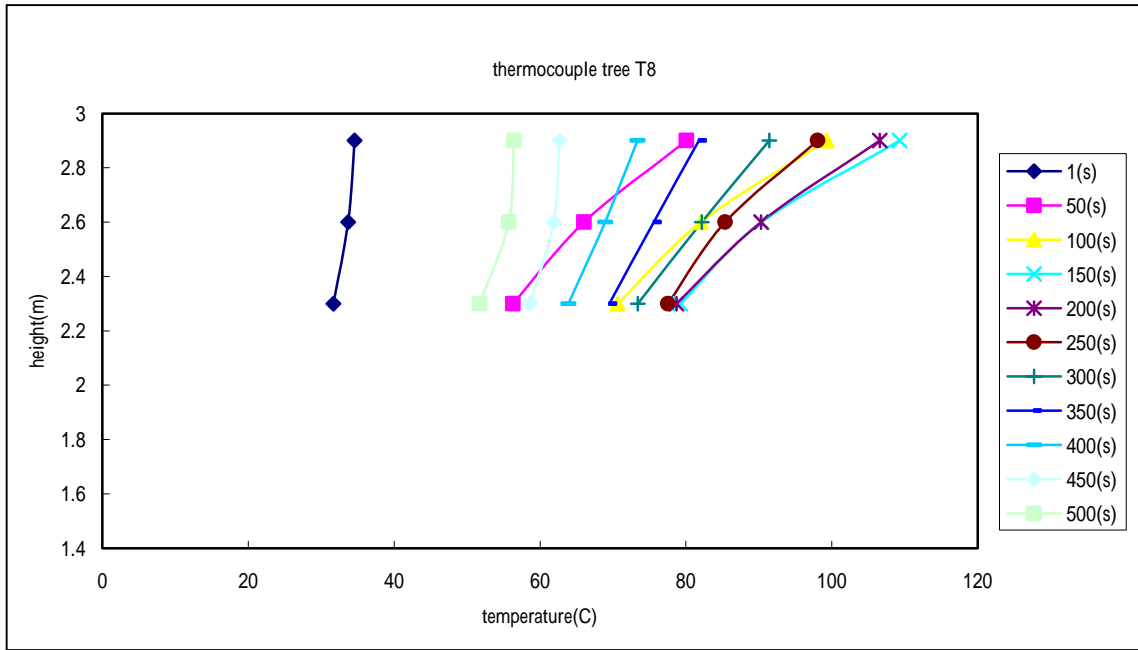


圖 A-18 熱電偶樹 T8 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-2 )

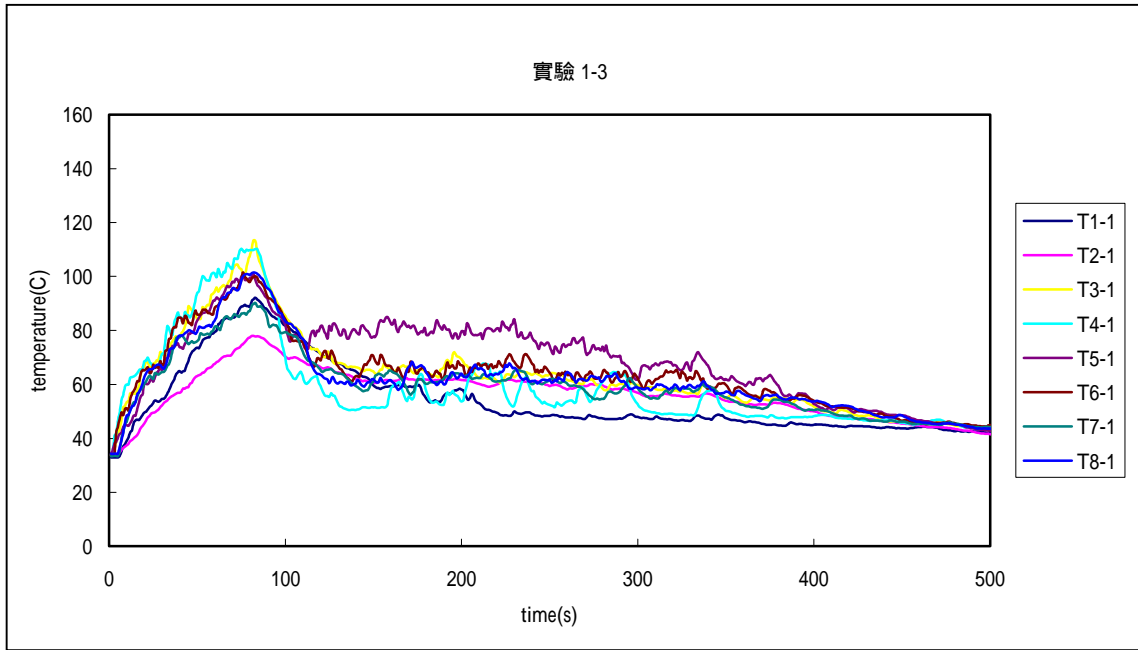


圖 A-19 實驗 1-3 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

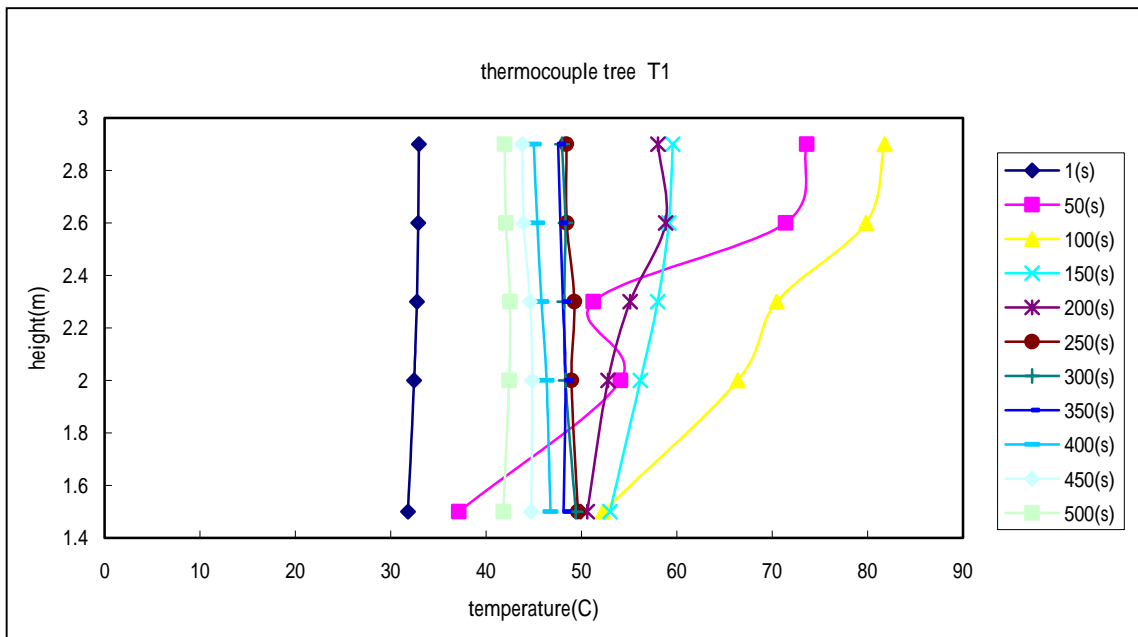


圖 A-20 熱電偶樹 T1 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )



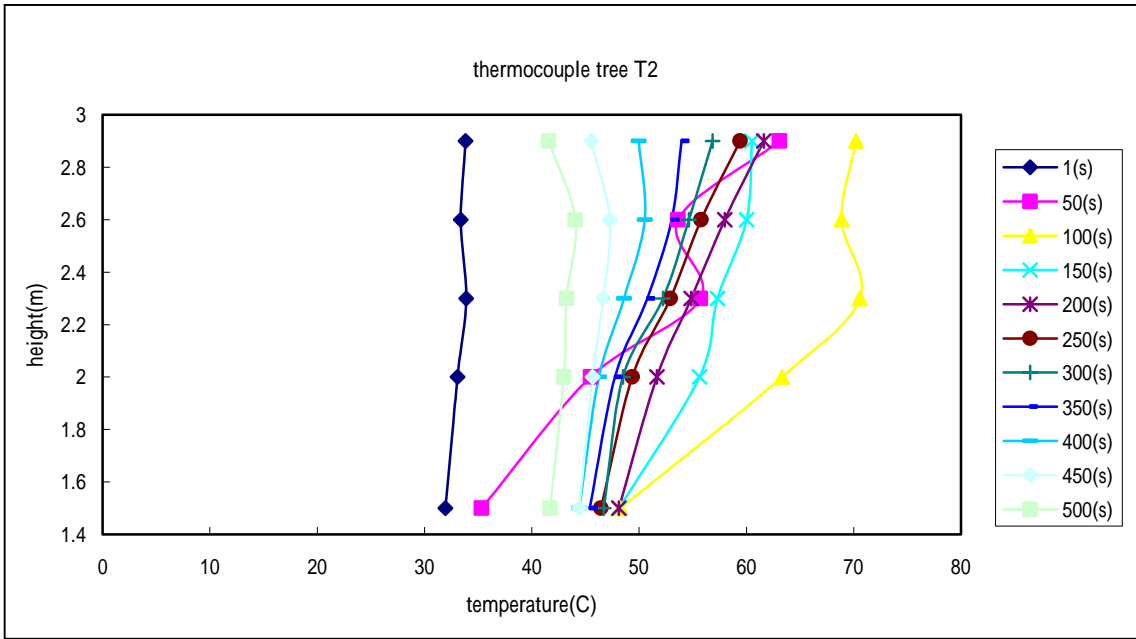


圖 A-21 熱電偶樹 T2 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

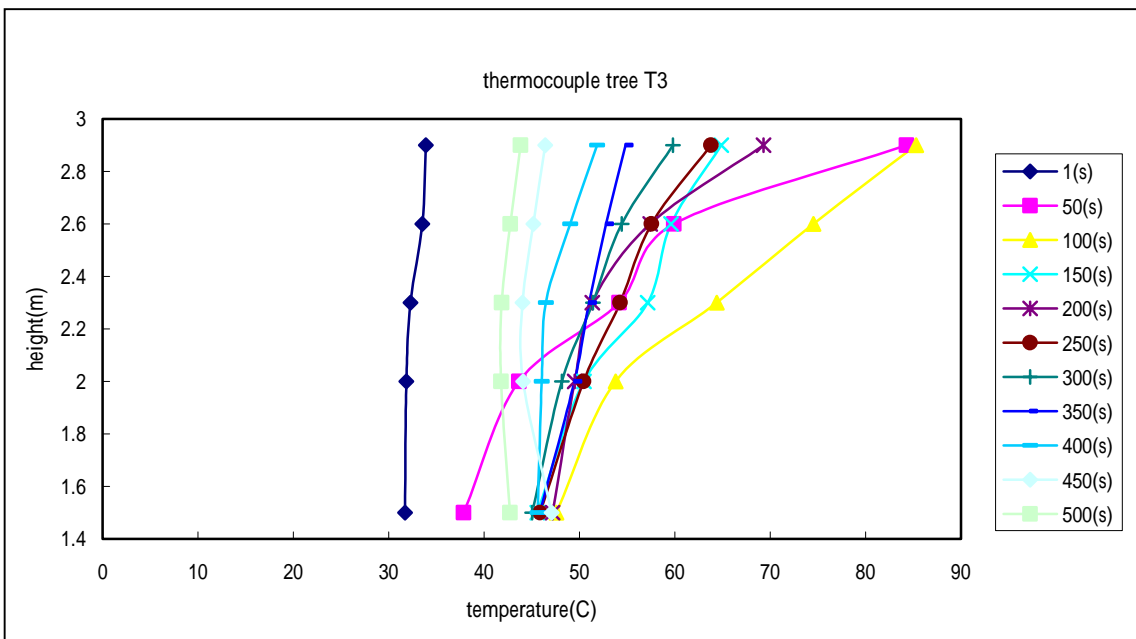


圖 A-22 熱電偶樹 T3 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

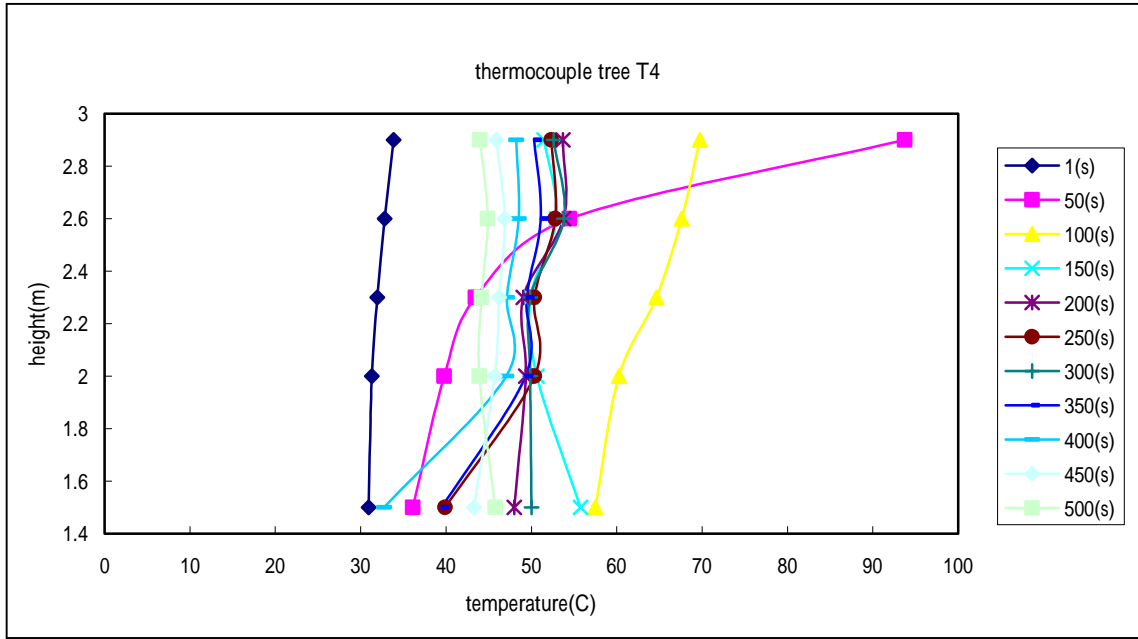


圖 A-23 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

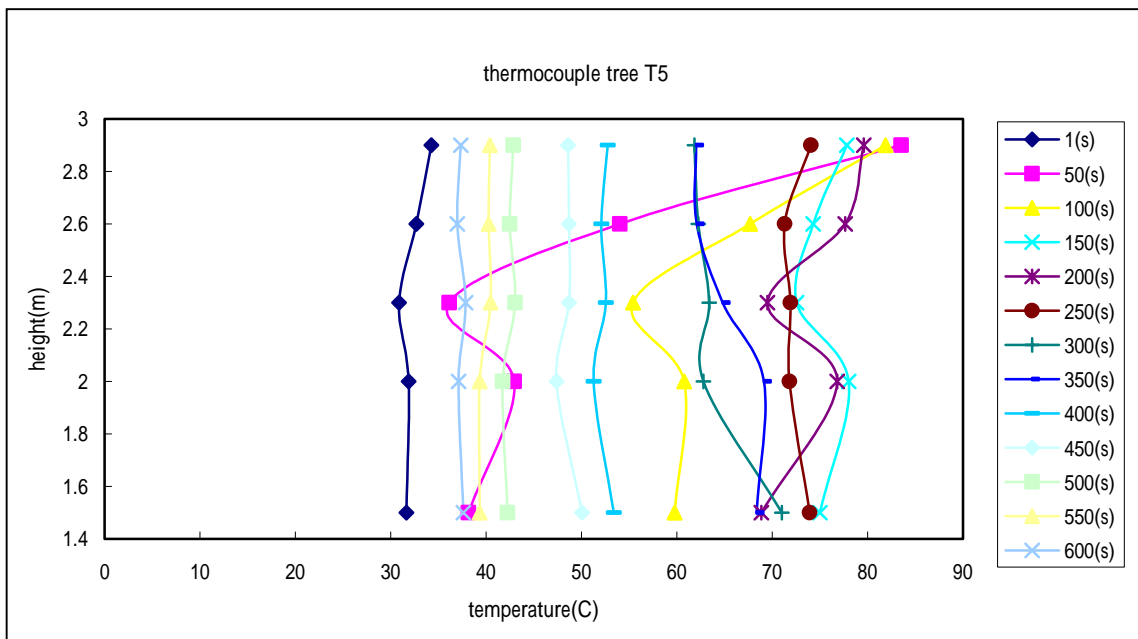


圖 A-24 熱電偶樹 T5 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

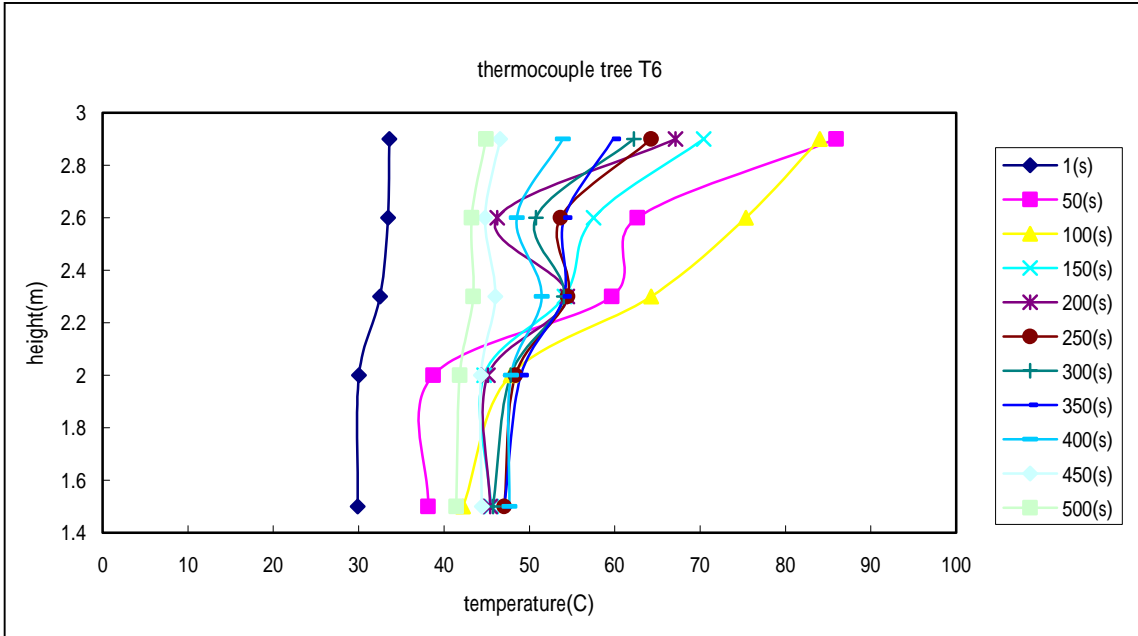


圖 A-25 熱電偶樹 T6 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

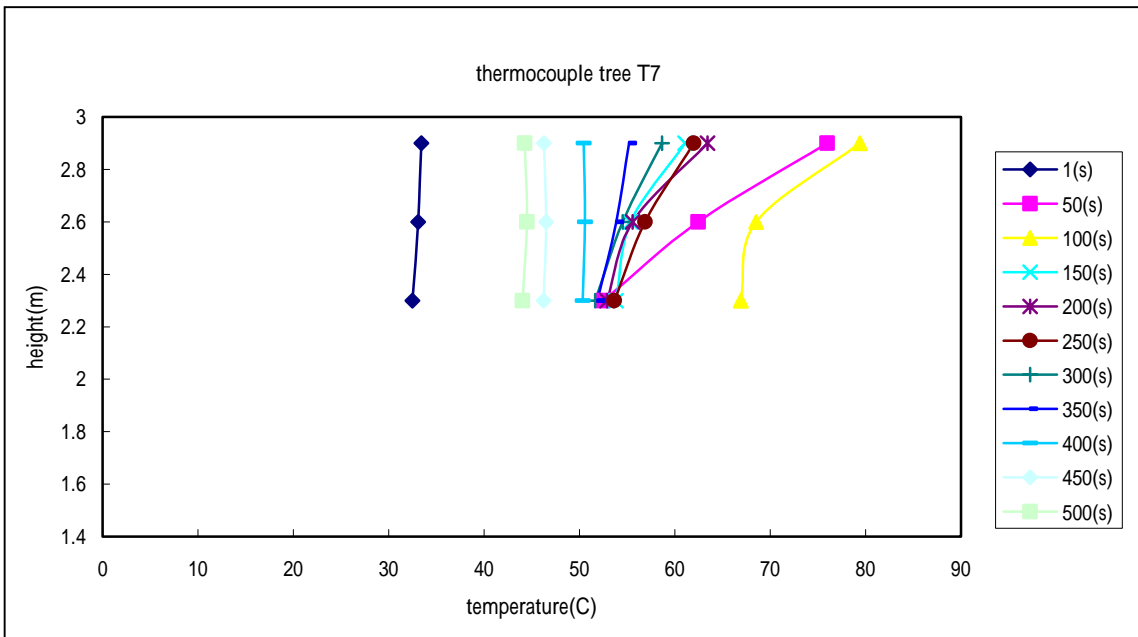


圖 A-26 熱電偶樹 T7 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

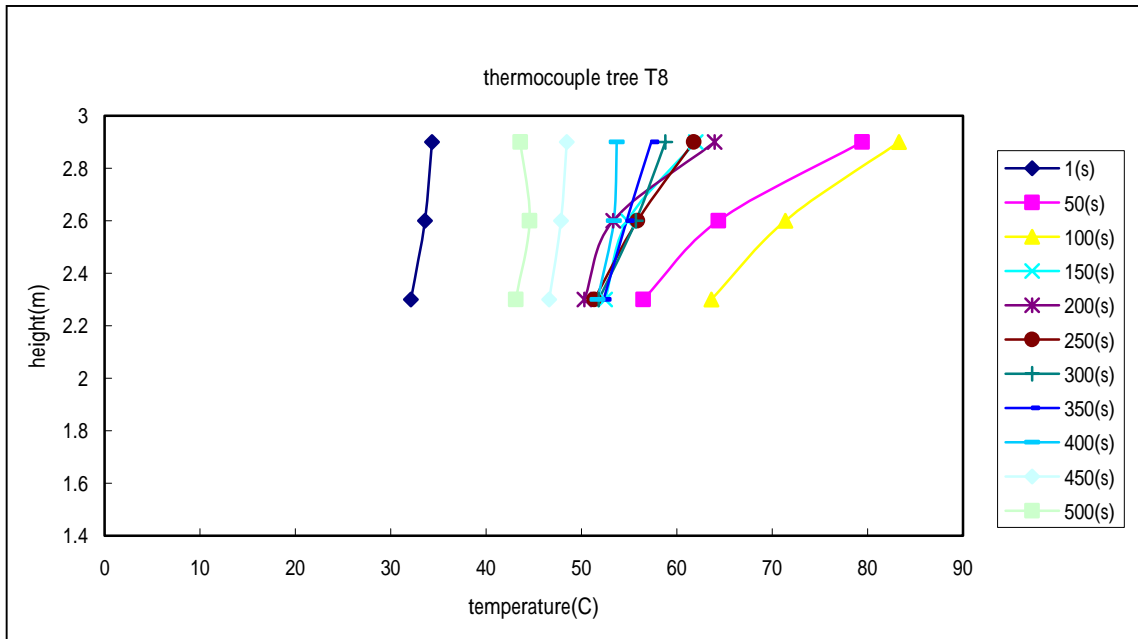


圖 A-27 熱電偶樹 T8 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 1-3 )

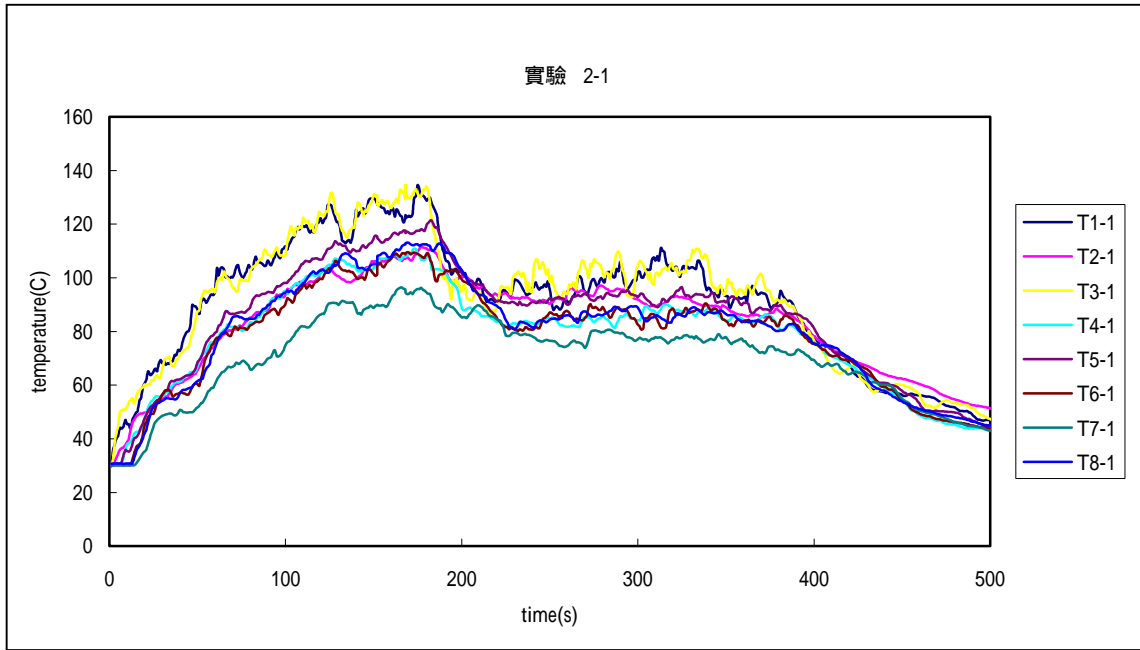


圖 A-28 實驗 2-1 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

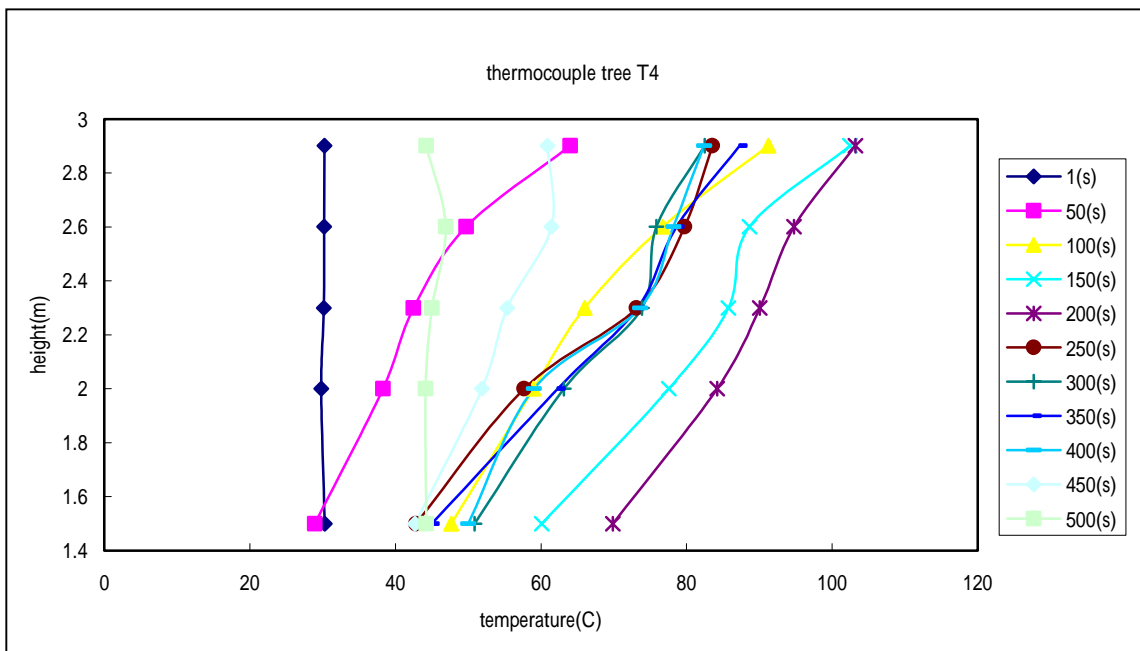


圖 A-29 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 2-1 )

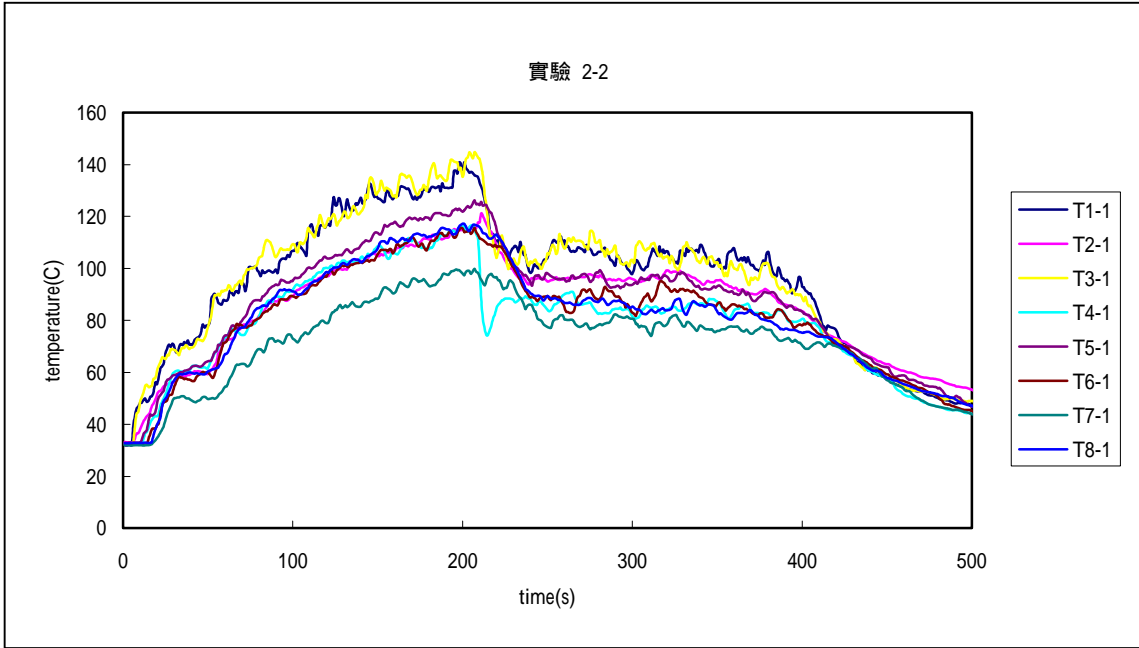


圖 A-30 實驗 2-2 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

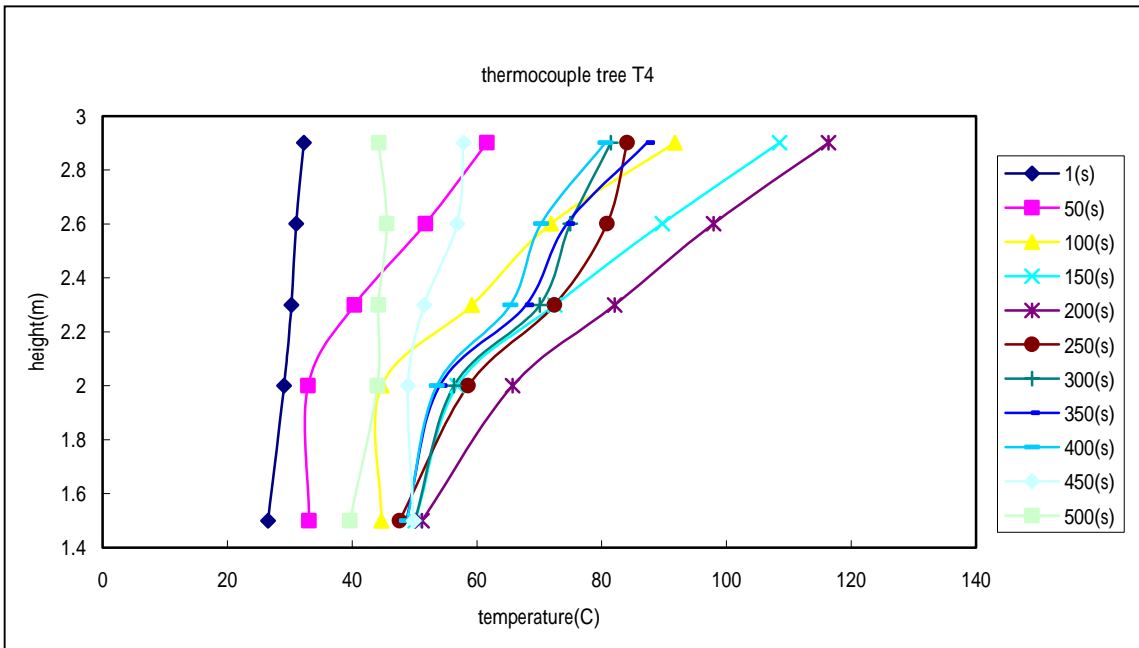


圖 A-31 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 2-2 )

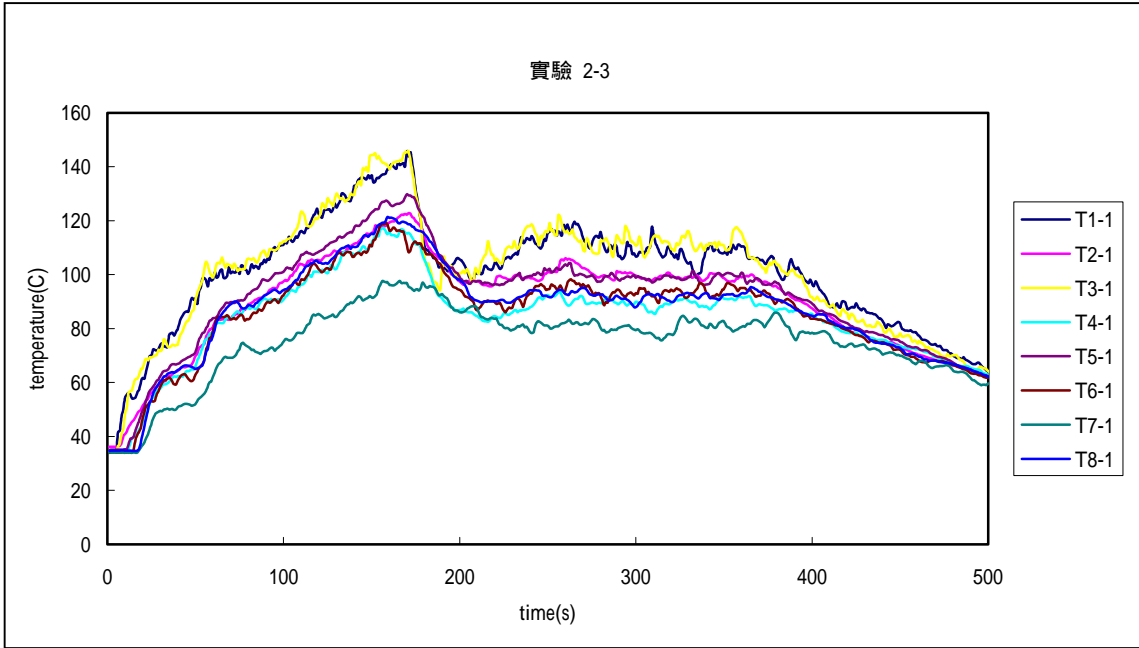


圖 A-32 實驗 2-3 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

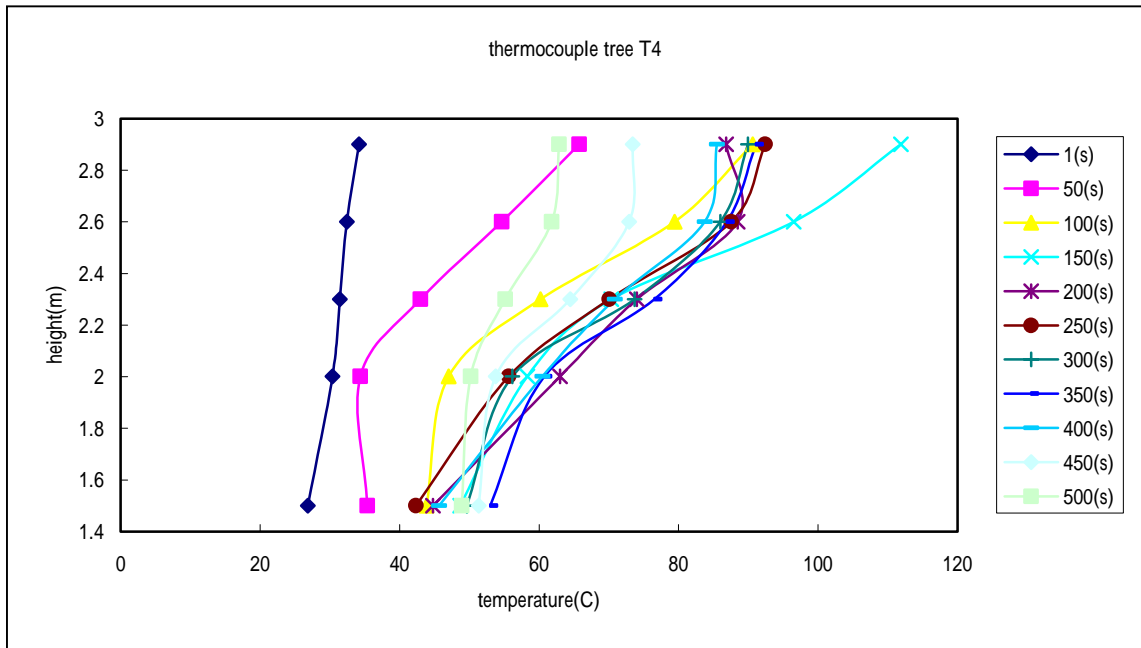


圖 A-33 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 2-3 )

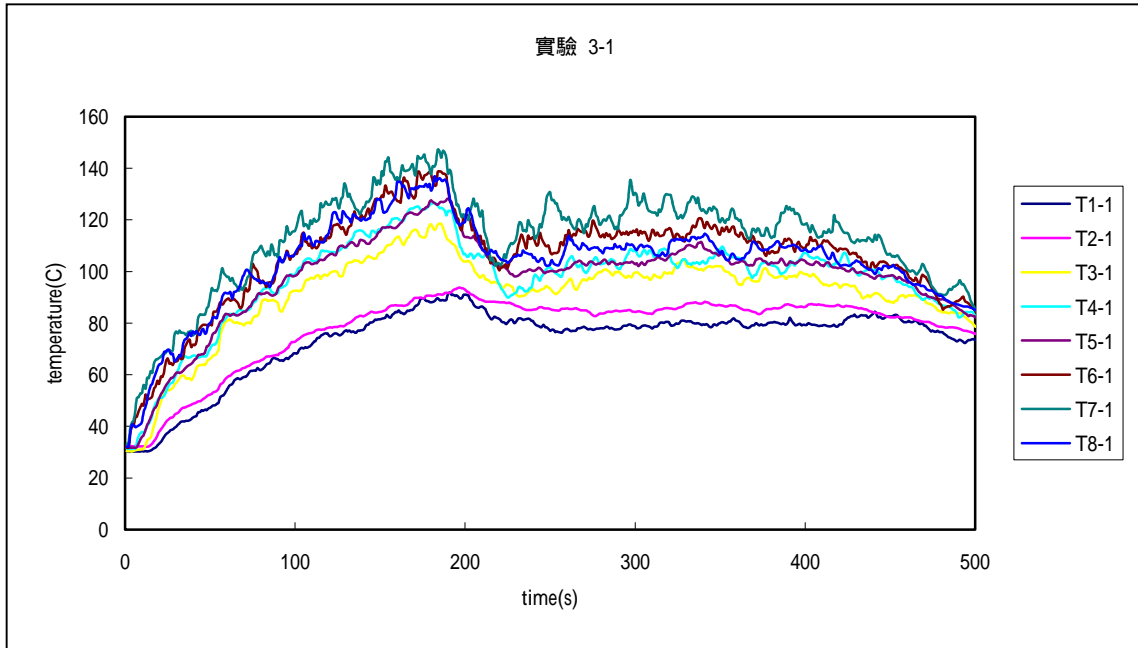


圖 A-34 實驗 3-1 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

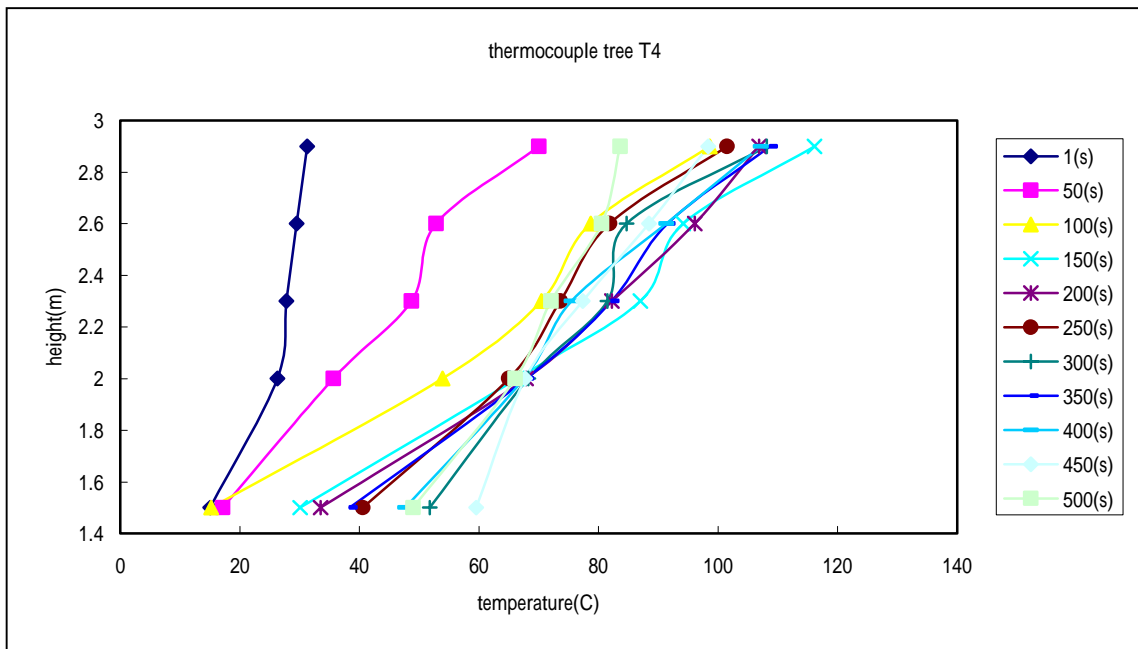


圖 A-35 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 3-1 )



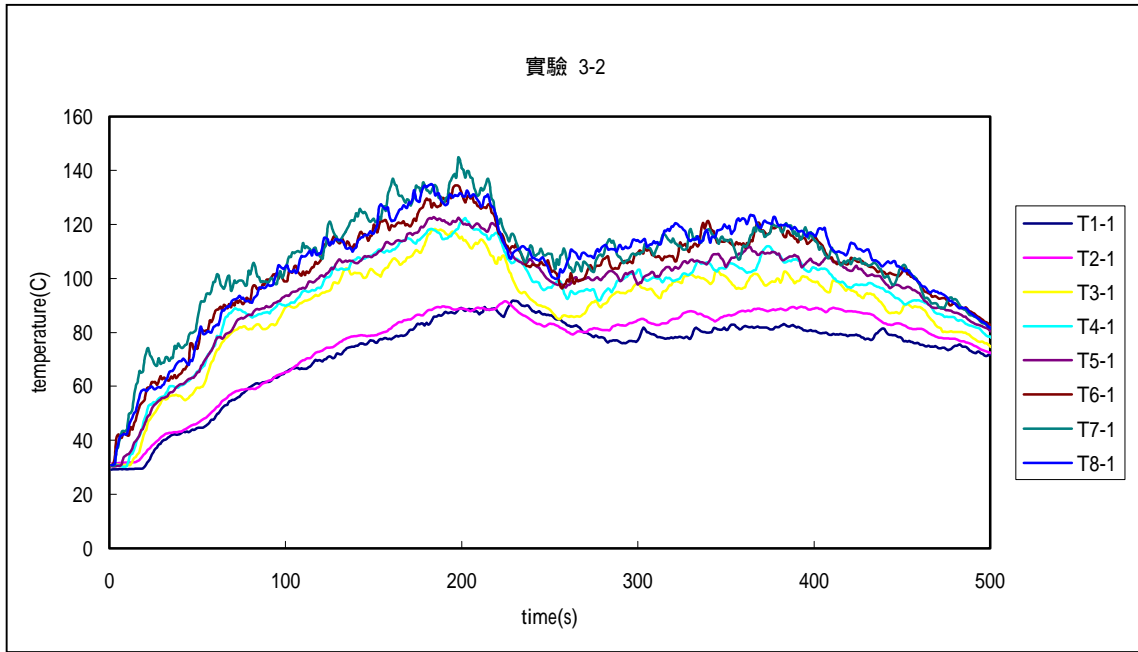


圖 A-36 實驗 3-2 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

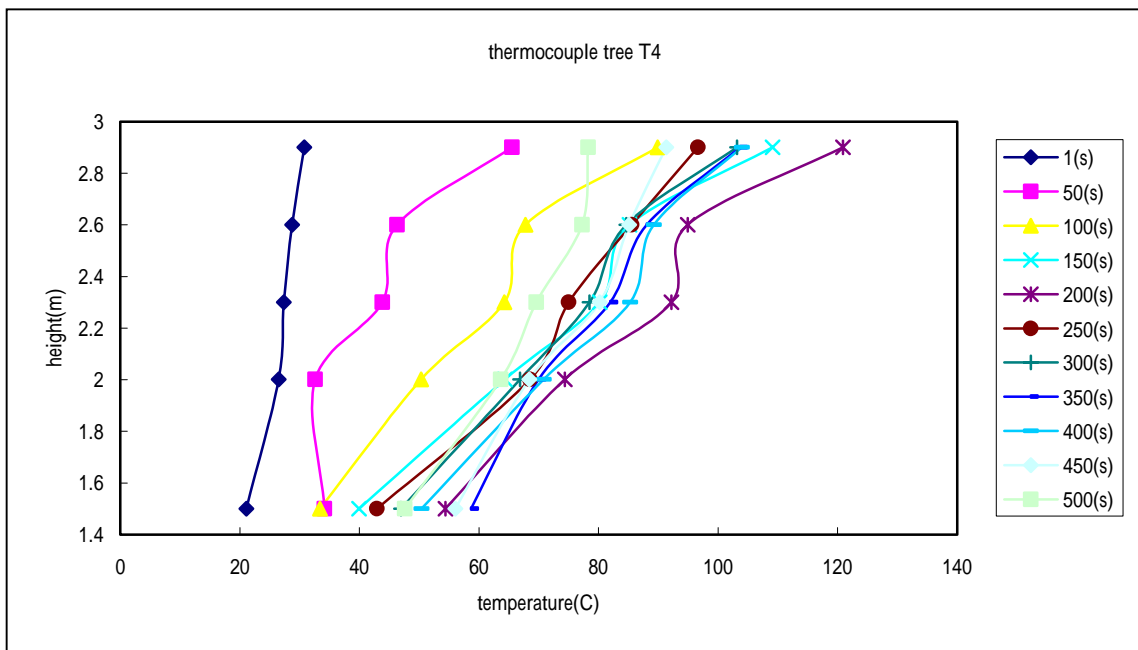


圖 A-37 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 3-2 )

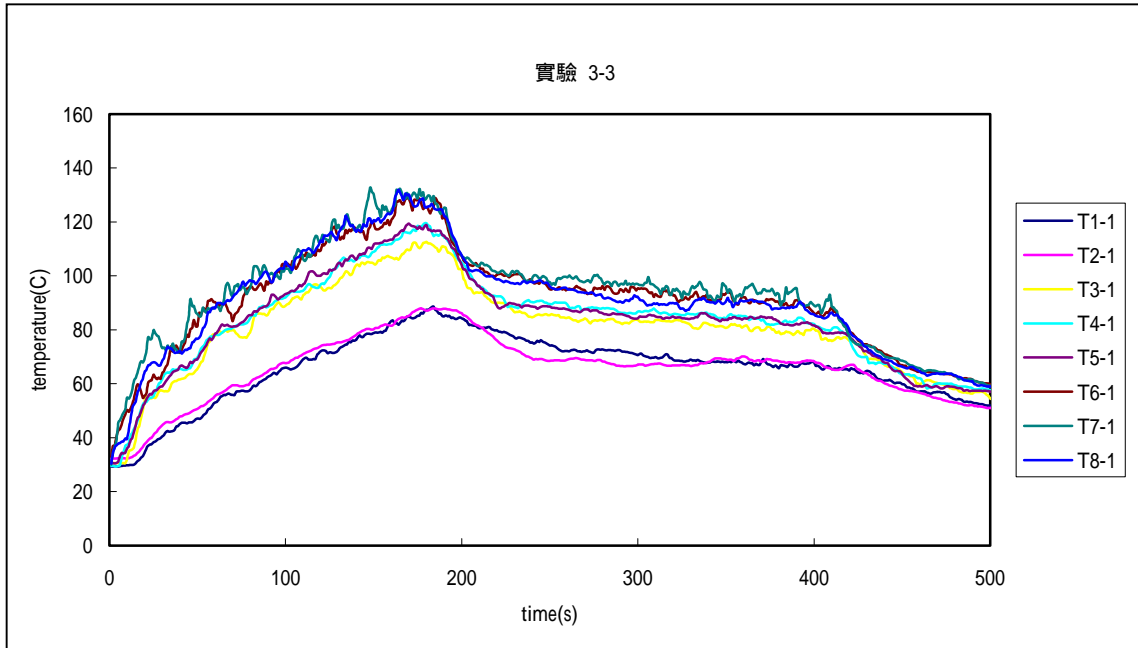


圖 A-38 實驗 3-3 之火場溫度變化 ( 高度 2.9m )

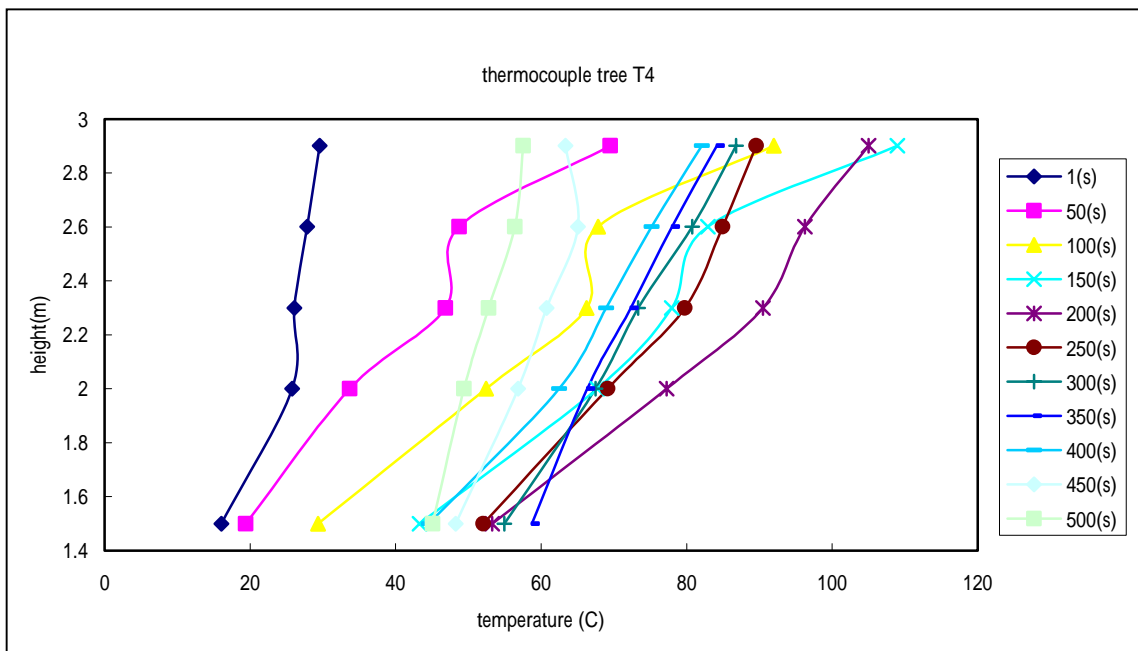


圖 A-39 熱電偶樹 T4 所測得之垂直溫度變化 ( 實驗 3-3 )

## 附件 B

電腦數值模擬結果之圖表

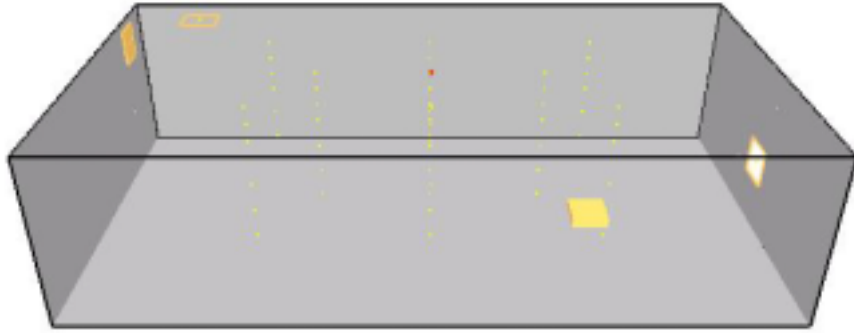
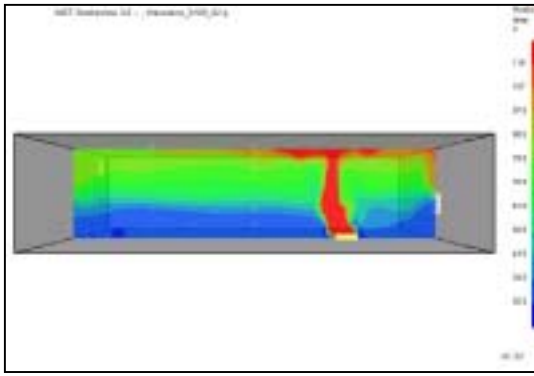
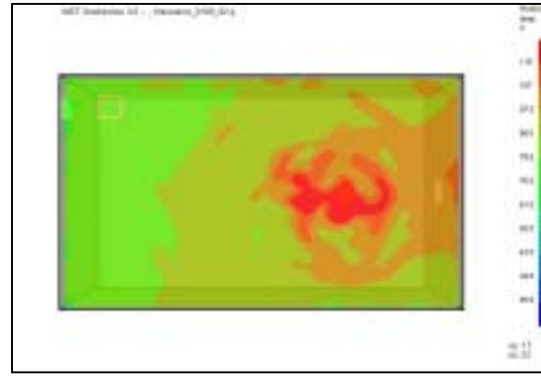


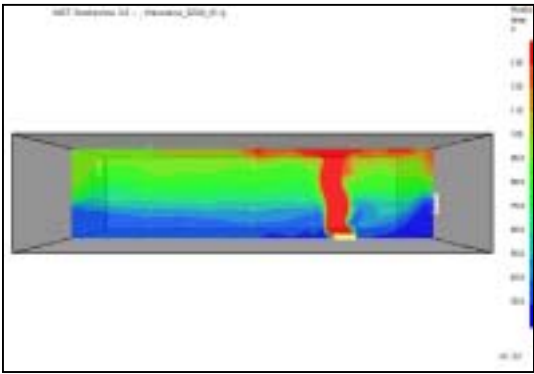
圖 B-1 模擬空間幾何示意圖



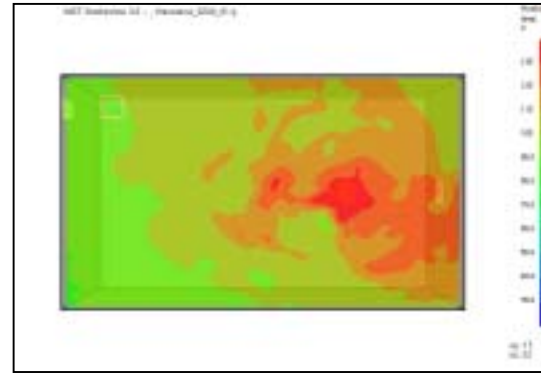
t=100s,y=3.5m



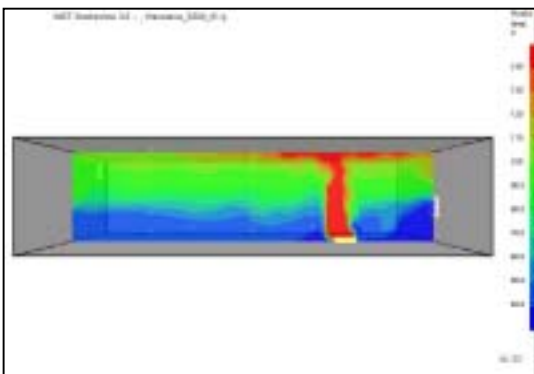
t=100s,z=2.845m



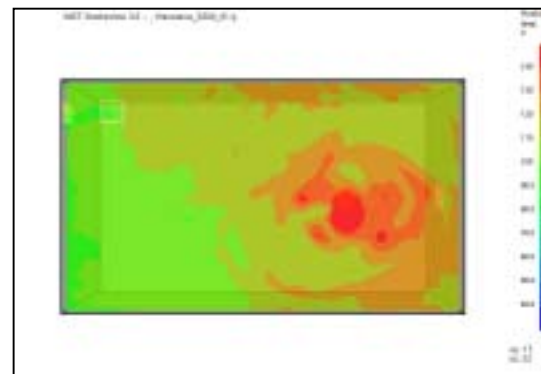
t=200s,y=3.5m



t=200s,z=2.845m

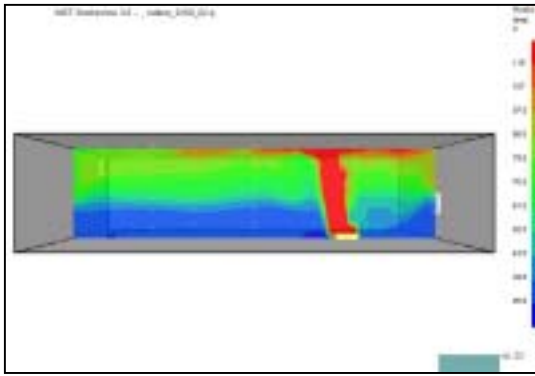


t=300s,y=3.5m

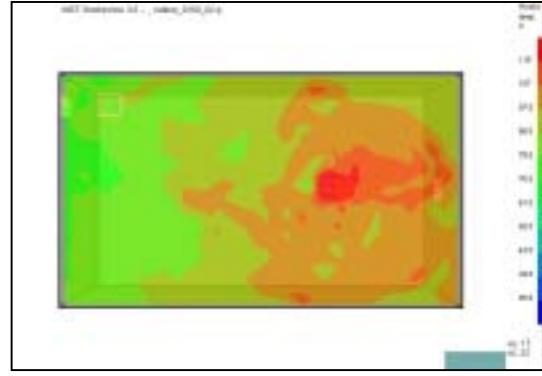


t=300s,z=2.845m

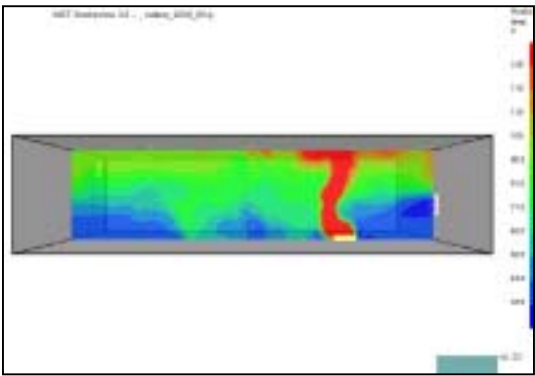
圖 B-2 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之溫度分布 ( 單獨火源 )



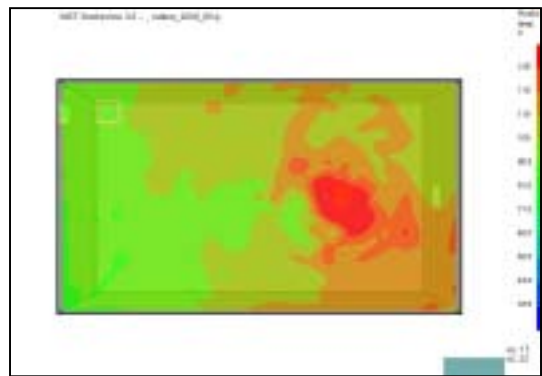
t=100s,y=3.5m



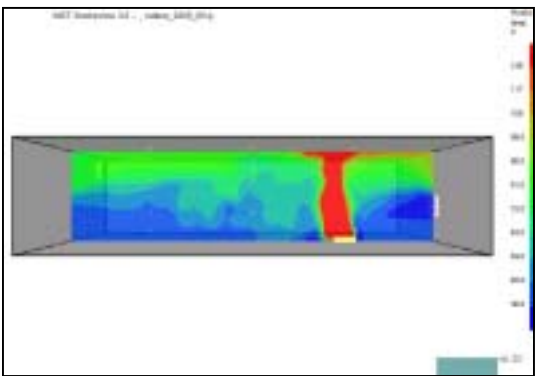
t=100s,z=2.845m



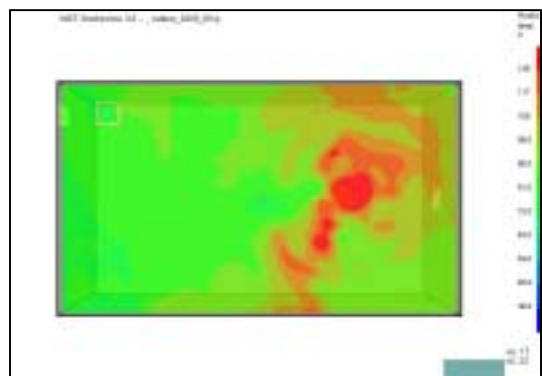
t=200s,y=3.5m



t=200s,z=2.845m

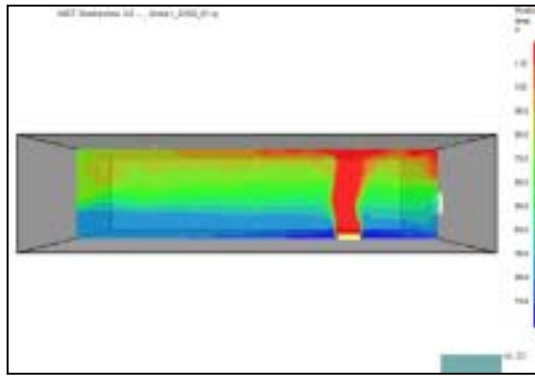


t=300s,y=3.5m

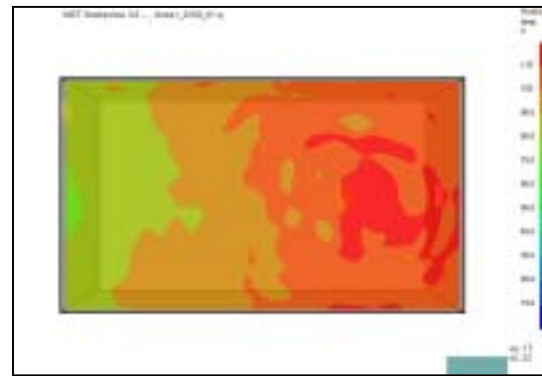


t=300s,z=2.845m

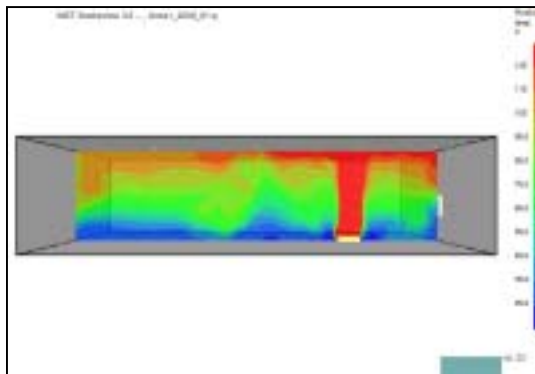
圖 B-3 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之溫度分布 ( 實驗 2-1 )



t=100s,y=3.5m



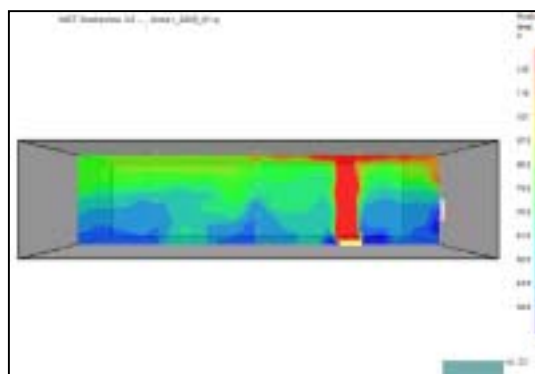
t=100s,z=2.845m



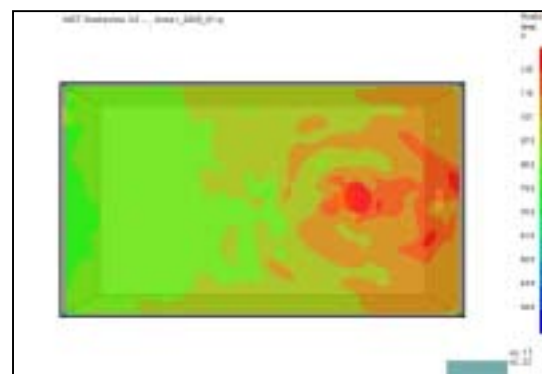
t=200s,y=3.5m



t=200s,z=2.845m

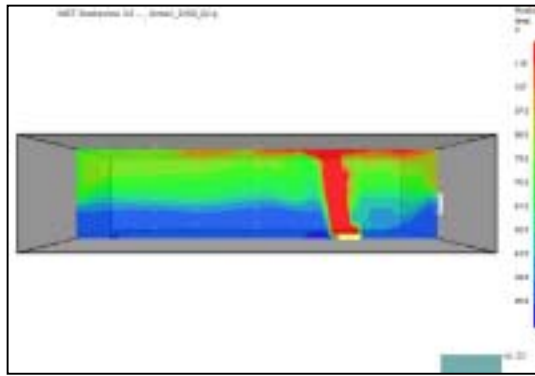


t=300s,y=3.5m

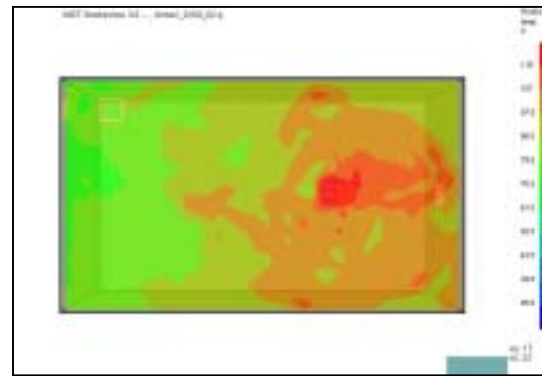


t=300s,z=2.845m

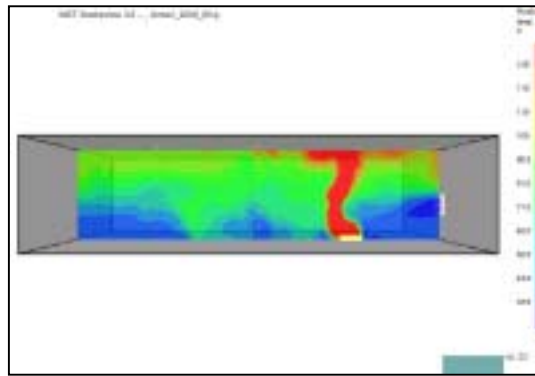
圖 B-4 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之溫度分布 ( 實驗 2-2 )



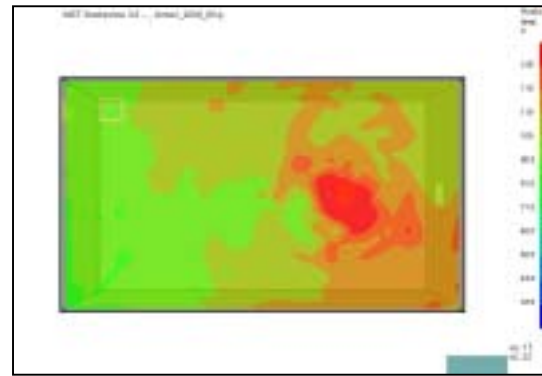
t=100s,y=3.5m



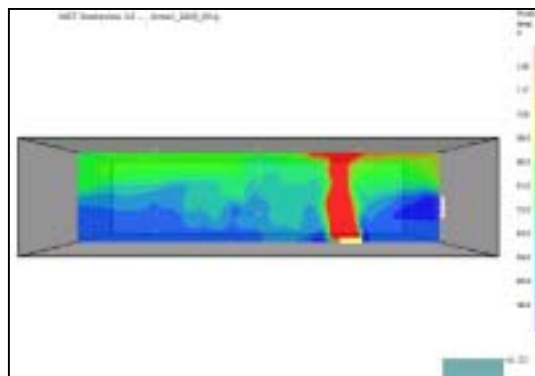
t=100s,z=2.845m



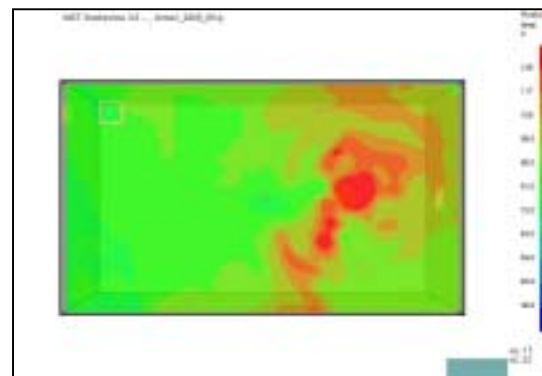
t=200s,y=3.5m



t=200s,z=2.845m



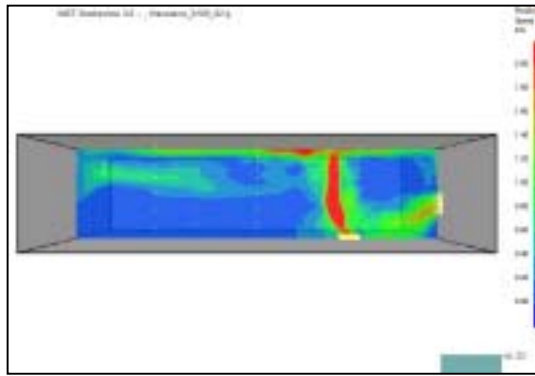
t=300s,y=3.5m



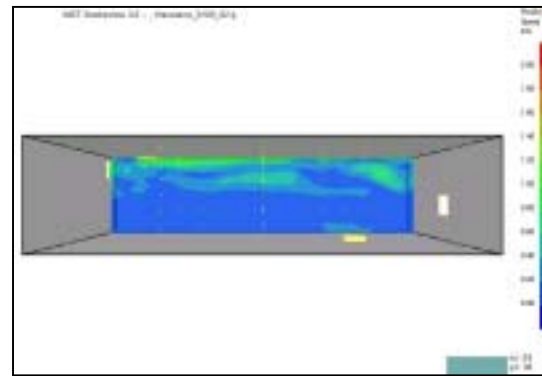
t=300s,z=2.845m

圖 B-5 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之溫度分布 ( 實驗 2-3 )

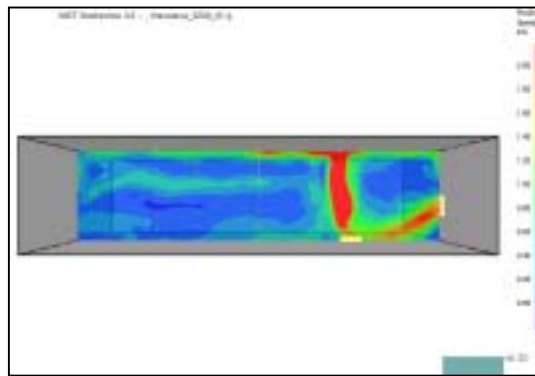




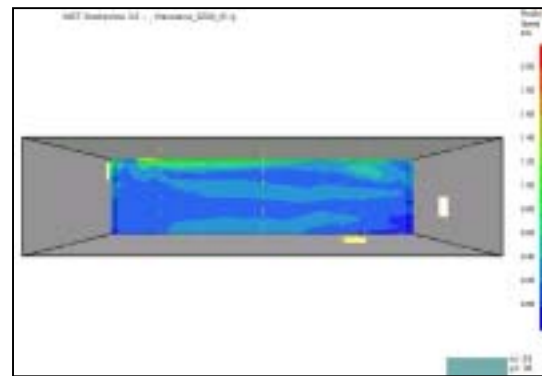
t=100s,y=3.5m



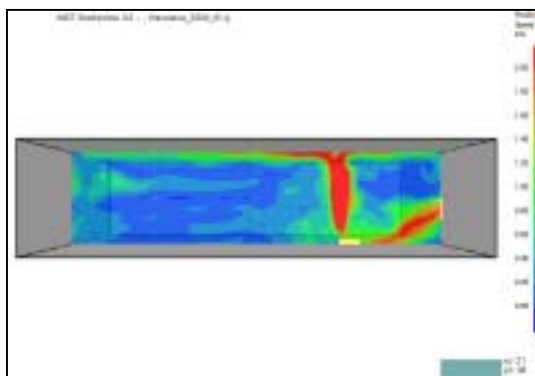
t=100s,y=6.0m



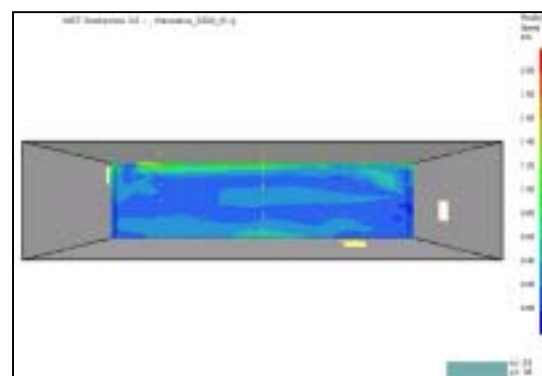
t=200s,y=3.5m



t=200s,y=6.0m

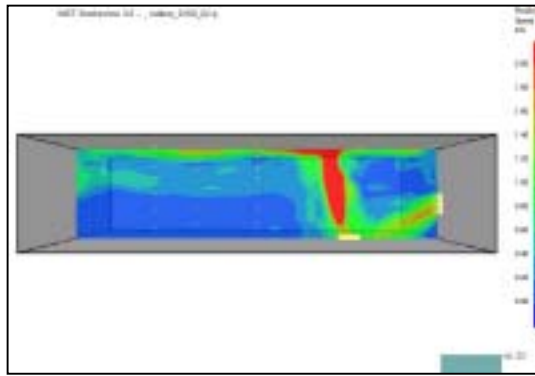


t=300s,y=3.5m

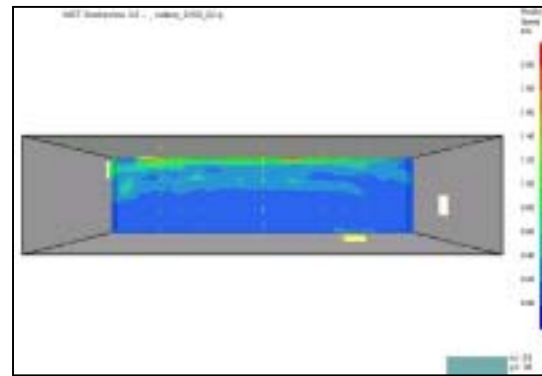


t=300s,y=6.0m

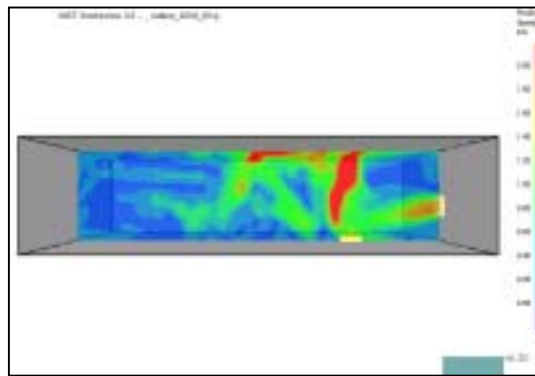
圖 B-6 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之速度分布 ( 單獨火源 )



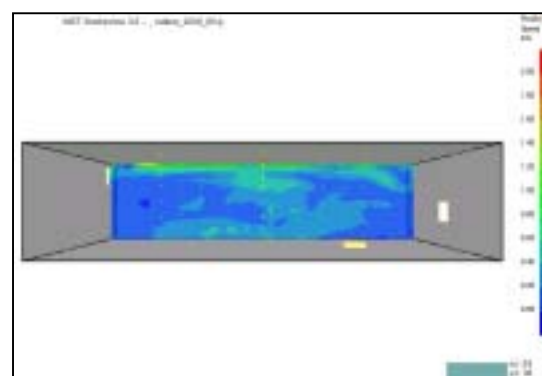
t=100s,y=3.5m



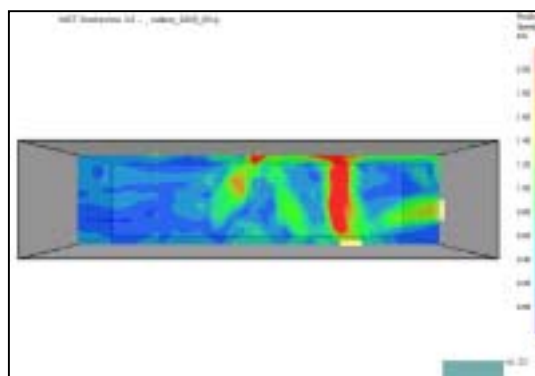
t=100s,y=6.0m



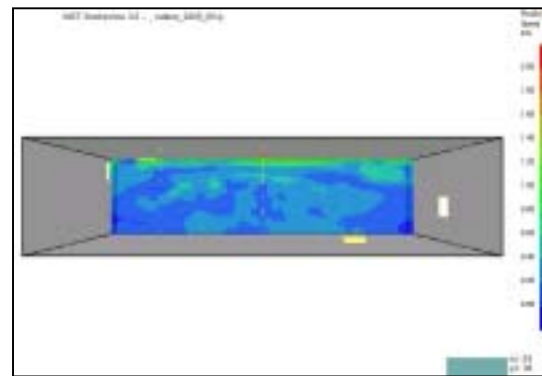
t=200s,y=3.5m



t=200s,y=6.0m

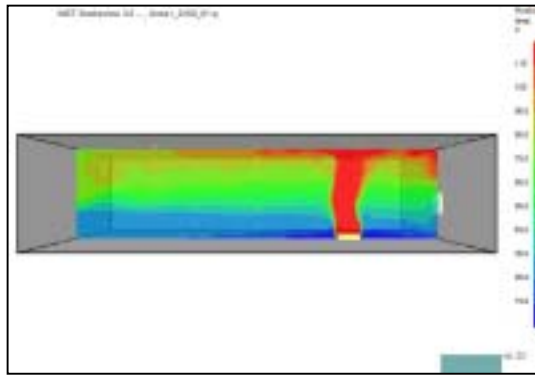


t=300s,y=3.5m

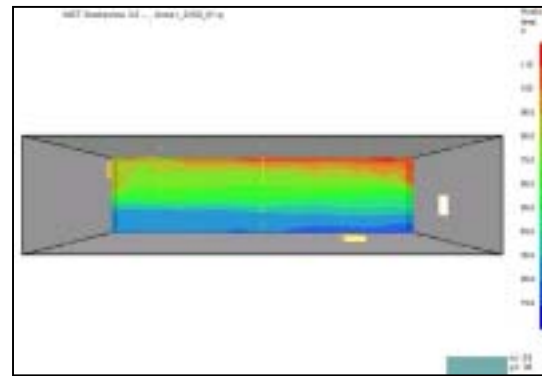


t=300s,y=6.0m

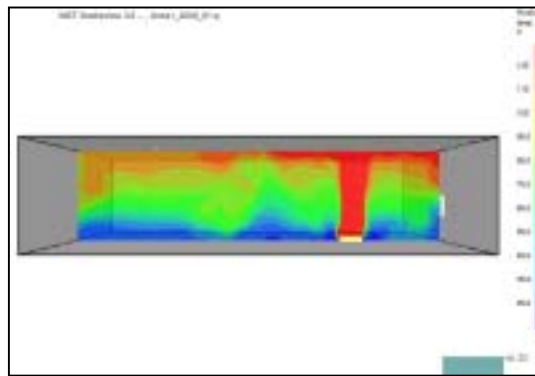
圖 B-7 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之速度分布 ( 實驗 2-1 )



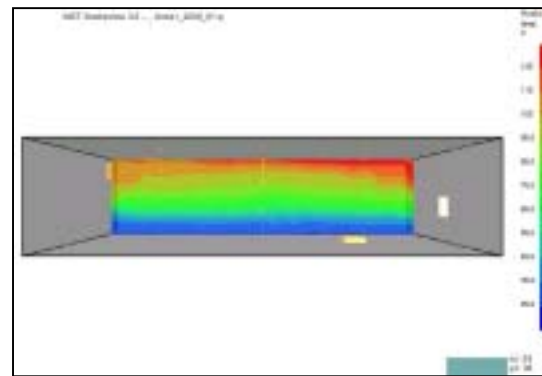
t=100s,y=3.5m



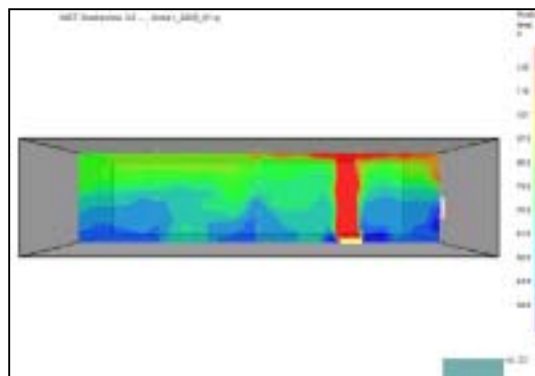
t=100s,y=6.0m



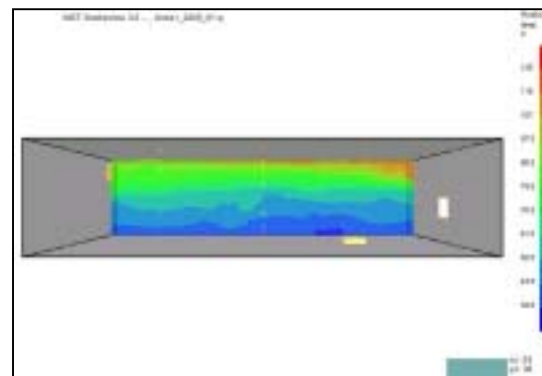
t=200s,y=3.5m



t=200s,y=6.0m

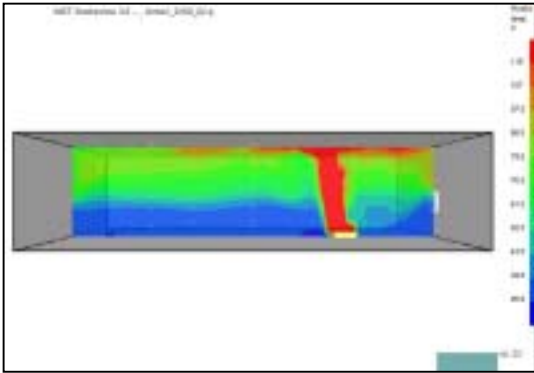


t=300s,y=3.5m

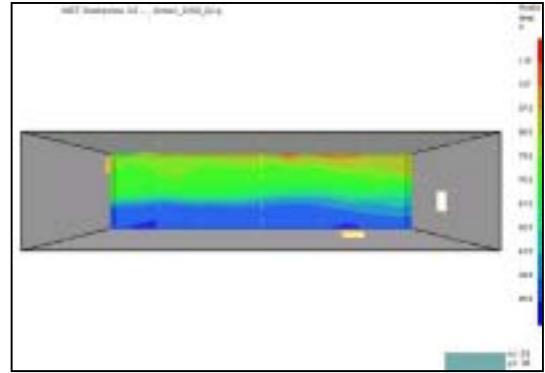


t=300s,y=6.0m

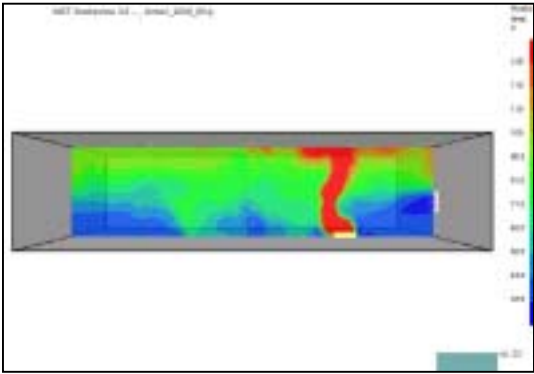
圖 B-8 t=100s,t=200s,t=300s 時火場之速度分布 ( 實驗 2-2 )



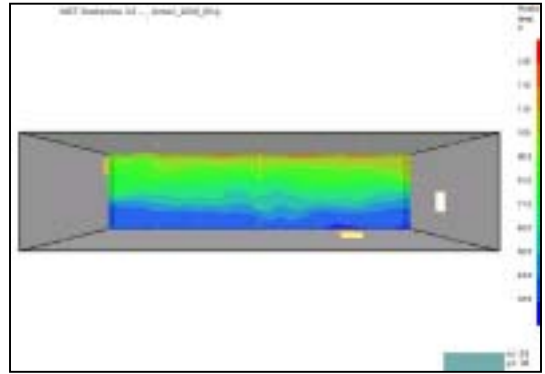
t=100s,y=3.5m



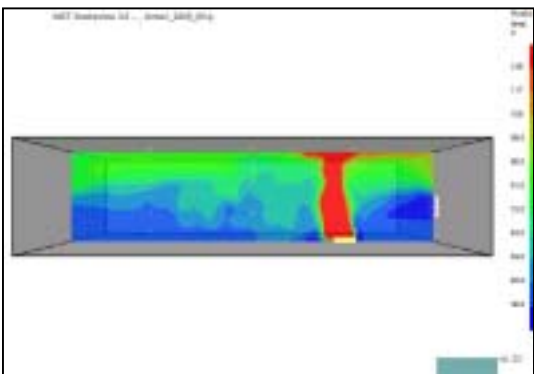
t=100s,y=6.0m



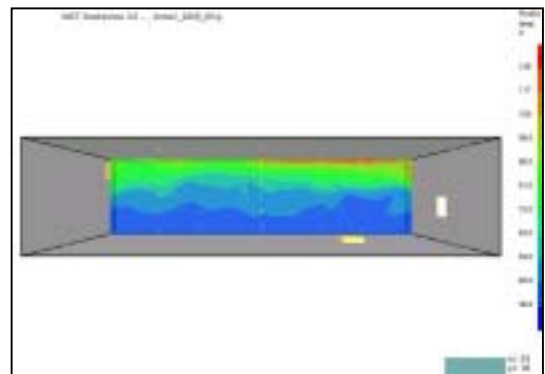
t=200s,y=3.5m



t=200s,y=6.0m



t=300s,y=3.5m



t=300s,y=6.0m

圖 B-9  $t=100s, t=200s, t=300s$  時火場之速度分布 ( 實驗 2-3 )

## 審查意見辦理情形

審議委員	審 查 意 見	辦 理 情 形
嚴組長定 萍	1.欣見國內已開始進行防火與滅火相配合的實驗，希望能持續進行。	此研究計劃為水系統研究計劃之第一部份，後續亦會有許多相關的研究計劃。
	2.實驗進行時請多考慮幾種排列組合相關之影響，除火源、排煙口、撒水頭之位置外，希望能增加不同位置開口、撒水量、不同設計之撒水頭（如具 module system 效能）等因素，當然做這些全尺寸測試不是短時間能完成的，希望計劃能延長作更周延之研究。	由於實驗經費與實驗設備有限，因此現階段所能作的實驗數目亦有限，但在後續的研究中，會陸續採購其它實驗設備，並針對其它參數進行實驗，以得到更完整的報告。
	3.在實驗與模擬中，火源的熱釋放率都大約為 100KW，這樣的熱釋放率似乎有點小。在後續的實驗中是否能將火源的熱釋放率加大到 1 至 2MW。	由於是第一次作此類實驗，為考量安全，因此從較小的熱釋放率開始實驗，後續的實驗會加大熱釋放率。
吳科長俊 瑩	1.本研究之成果對實際消防法規之訂定影響將非常深遠，且牽涉消防搶救戰術及困難程度，本研究是否檢討或以現行消防法規之規定列為參數設定之依據。另請說明排煙、撒水及消防員間之關係或影響（P.2 第二段）。	a. 本研究以現行消防法規之規定列為參數設定之依據，並藉由實驗判別是否有需要修正的地方，並作為以後修正消防法規之依據。 b. 排煙 撒水及消防員間之關係如第一章所說明，消防員之主要任務為搶救人員與撲滅火勢，而撒水可幫助撲滅火勢，排煙可幫助人員逃生，都具有相當的重要性，然而排煙與撒水設備是否會因相互影響而抵銷彼此之功能，甚至使消防人員之行動受阻，而這些都必須經由不斷的研究與實驗才能判斷。
	2.實際實驗模擬，是否可能以偵煙探測器連動排煙設備進行比對。	由於現階段並未裝設偵煙排煙器，因此無法進行此部份之實驗，在後續的研究計劃將把偵煙探測器連動排煙設備進行實驗與模擬。

	3.在實際的火災中會產生許多的濃煙，而這些熱煙氣的成分與煙層降速度對於撒水頭的作動、降溫是否有任何影響？而在實驗中，由於是採用酒精作為燃料，產生的煙量非常少，因此是否也能採用其它發煙量較大的燃料。	由於酒精取得較方便且燃燒較乾淨且較安全，因此現階段採用酒精作為試驗，在後續的研究中會嘗試使用其它熱釋放率較大且發煙量較多之燃料進行實驗。
黃教授榮芳	1.第 1、2、3 項之數值模擬部份已有成果，排煙行為與撒水系統之關係已有結論。	數值模擬結果會與實驗所得之數據進行比對，以得到一個更正確完整的結果。
	2.第 4、5、6 項計劃在次年的計劃中宜加速。	實驗場已經完工，並已經進行相關之實驗。
何主秘明錦	1.火源之選用宜與日常生活中常見之火源一致。	由於酒精之熱釋放率計算較為簡單，因此所算出的熱釋放率也會較精準，而由於模擬時需要輸入熱釋放率，因此需要正確的數值。但在後續的研究中會採購 load cell，就可求出火源之熱釋放率。
	2.試驗變數之選用，宜先用科學的方式篩選，如田口氏實驗計劃分析法。	由於現在初期的實驗可能只會改變火源位置、熱釋放率等，因此每一個實驗皆會進行，而在後續的研究中，實驗變數會增加許多，因此會先篩選出幾個影響較大的變數進行實驗。
陳組長建忠	1.在結論中有提到國外相關法規有規定撒水設備需在排煙設備前作動，是否能將此法規的相關內容加以補充。又此法規之規定與避難逃生之規定有何相關性？	從國外相關文獻得知，也有某些案例撒水系統不受排煙系統之影響，與火源相關位置有很大的關係，目前並無相關法規之強制規定。
現場出席人員	1.由於實驗的參數與變數相當的多，如果每一項都要進行實驗則需花費許多的時間與人力。應盡量選擇法規中有所規定的項目與數據進行實驗。	會盡量選擇法規中有所規定的項目與數據進行實驗，比如撒水頭間距、撒水量等。

	<p>2.在實驗中的撒水頭配置間距似乎有點密，與法規規定的有所不同，是否有其它原因或用途。</p>	<p>由於考慮到將來實驗可能的變動，撒水頭的數目或位置都會有所改變，因此預設許多的撒水口。在實際實驗時，撒水頭的間距會依照法規規定的3m。</p>
	<p>3.在實驗中火源大約都在八分三十秒的時候熄滅，這是因為被撒水頭所撲滅或者是燃料已經燒完？</p>	<p>由於每次實驗時所使用的酒精量皆相同，因此酒精燒完的時間也都大致一樣。</p>