

撒水頭作動時間的實尺寸分析

蘇鴻奇* 曾俊達** 張岱軒*** 吳展維**** 林大惠***** 陳建忠***** 蔡銘儒****

關鍵字：撒水頭，FDS，壁面效應，角落效應

摘要

本研究針對密閉式撒水頭於火場之作動時間進行實驗與探討，於 6m×5m 之實尺寸房間進行密閉式撒水頭作動時間實驗與分析影響因素，並使用 FDS (Fire Dynamics Simulator) 進行比較分析。

在本研究中，火源位置設定為火源位於房間中央區域、火源緊靠於壁面以及火源位於房間角落等三類。實驗結果顯示撒水頭作動時間與流場特性有關，而流場特性又與壁面、火源與撒水頭距離以及通風口有關。實驗過程發現火源緊靠壁面時，火焰高度會較火源位於房間中央區域時高，且煙氣的上升速度增快，而致使撒水頭作動時間縮短。若火源位於房間角落，則其對於火場的影響會比壁面效應更大，且撒水頭作動時間最快。

FDS 模擬實驗屋內昇溫曲線與實驗值比對發現兩者間存有偏差。經熱電偶靈敏度實驗結果，發現在撒水頭作動時，實驗屋所量得的溫度會與模擬預測火場溫度約低 30~40°C。若摒除熱電偶靈敏度影響，整體而言 FDS 對此實驗所進行的模擬相當準確，而且溫度的變化趨勢也與實驗相當一致。

Investigation of Thermal Response of Glass Bulb Sprinklers in a Full-Scale Room

Hung-Chi Su* Chun-Ta Tzeng** Thai-Shuang Chang*** Chan-Wei Wu**** Ta-Hui Lin*****
Chien-Jung Chen***** Ming-Ju Tsai****

KEYWORDS : Automatic Fire Sprinklers, FDS, Wall Effect, Corner Effect

ABSTRACT

With regard to the activation of the automatic fire sprinklers, a series of tests were carried out by using a gas burner sat at various locations in a full-scale room. At the same time, Fire Dynamics Simulator was used to predict the temperature field of the tested room.

The gas burner was placed in three different locations. When the burner was placed against the wall, the height of flame was higher and the movement of smoke was faster, and the activation time of the sprinkler was reduced. The effect of corner was greater than the effect of wall, so that the activation time of the sprinkler was the shortest when burner was at the corner. The activation time was longest when the gas burner was placed in the center of the room.

From comparisons of the experimental and predicted data, it was found that the trends of temperature variations from experiments and FDS simulations were similar, but there existed a temperature difference of 30~40°C in between. This temperature difference was caused by the response time of thermocouples justified by the sensitivity test of thermocouples.

* 國立成功大學建築系博士候選人(通訊作者 Email: hung@abri.gov.tw)

內政部建築研究所防火實驗中心副研究員

Ph.D. Candidate, Department of Architecture, National Cheng Kung University, Taiwan

Associate Researcher, Fire Experiment Center, Architecture and Building Research Institute, Ministry of Interior, Taiwan

** 國立成功大學建築系副教授

Associate Professor, Department of Architecture, National Cheng Kung University, Taiwan

*** 國立成功大學機械系碩士

Master, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

**** 內政部建築研究所防火實驗中心研究員

Researcher, Fire Experiment Center, Architecture and Building Research Institute, Ministry of Interior, Taiwan

***** 國立成功大學機械系教授

Professor, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

***** 內政部建築研究所防火實驗中心研究員

Researcher, Fire Experiment Center, Architecture and Building Research Institute, Ministry of Interior, Taiwan

一、前言

火災所造成財物與生命的損害常是社會關切的重點,因此預防火災的發生與如何抑制火勢的成長減少損害,一直是防火工程的重點。撒水頭在防火工程上扮演抑制火勢成長非常重要的角色, Peacock 等人(1999)的研究指出當距離天花板下方 0.1m 處的溫度若到達 600°C 時將會發生閃燃,火災現場一旦發生閃燃,火勢就會很難控制,因此撒水頭必須在火災初期就能偵測或感應到火災的發生,並且迅速作動將火源控制。

1971 年, Alpert 曾對火災引起的天花板煙流,對於火災偵測器的反應時間進行研究,研究指出火災偵測器應該垂直放置於天花板下,且與天花板的距離要小於 6% 天花板高度(Alpert, 1971); 1978 年, Heskestad 和 Delichatsios 則針對不同火勢大小,不同天花板高度下,火災偵測器附近的溫度環境進行研究,並提出火災初期的溫度成長曲線會符合 Power Law 的關係式(Heskestad and Delichatsios, 1978)。

Vettori (2003)針對傾斜天花板進行撒水頭動作時間實驗,研究中發現當天花板傾斜時,會縮短撒水頭的作動時間;然而當屋內天花板含有樑柱時,因為樑柱會阻檔與延緩天花板煙流,因此撒水頭的作動時間會較長,此研究亦使用 FDS 模擬預測撒水頭的作動順序,即使在傾斜的有樑天花板,也可得到準確的模擬預測結果。Nam (2004)利用實尺寸實驗,使用不同 RTI 值的撒水頭以及不同環境溫度條件,研究撒水頭所能作動的天花板最大高度與在各種環境下的作動情形。

火災的數值模擬方法已是分析火場的重要工具,對於防火工程上的規劃以及火場的重建都有很大的幫助,如美國 NIST(National Institute of Standards and Technology)發展的 FDS 火災模擬軟體。利用這些模擬方法可使工程師有能力來估計火災的影響,其中預估溫度偵測器作動時間的能力是相當重要的,因為這些偵測器不僅可以警告居民有火災發生,並且可以第一時間將火源撲滅。

最近研究, Lee 和 Ryou (2006)提到雖然實尺寸的實驗可以得到最真實且有效的實驗數據,但花費昂貴並耗時甚久,且有安全上的風險;因此使用中尺寸實驗或數值模擬的方法是可行的替代性方法。此研究使用 FDS 模擬軟體計算分析不同長寬比的開口部條件下,在通道內的煙氣流動情形。在這研究中,模擬預測與實驗結果的溫度比較,其誤差在 10°C 以內。所以 FDS 在通道火災的模擬有很高的準確性。

Ryder 等人(2004和2006)利用多種既有的實驗數據與 FDS 模擬的結果相比較,其中包含了甲烷火焰的小房間實驗、大型油盤火焰、瓦斯洩漏引發爆炸實驗以及倉庫悶燒實驗等,證明了 FDS 可應用於火災預測,且有相當準確的結果。

二、研究目的與方法

撒水頭在防火工作上扮演一個非常重要的角色,在 Peacock (1999) 的研究中提到,火場上層溫度若到達 600°C 則會發生閃燃,因此撒水頭就必須在火災初期就能偵測到火源,並且迅速的作動將火源撲滅。本文主要目的是探討實尺寸房間中,火源位置對撒水頭的作動時間與作動順序的影響。研究的方法是在實尺寸房間中固定撒水頭位置,設定不同火源位置為變因,進行燃燒實驗。實驗觀察撒水頭在火源開啓後的作動情形,並且放置熱電偶測量房間內的溫度場,實驗量測之溫度變化結果再與 FDS 模擬軟體所計算的結果進行比較。

2-1 撒水頭作動時間實尺寸實驗規劃

本研究所使用的實驗屋平面尺寸為6m×5m，牆體採用砌磚構造方式構築，活動天花板高度設定為3.5M並設置4個撒水頭可進行撒水作動與滅火測試。另外，實驗屋北側與南側牆面各設有一開口部，西側牆面與南側牆面配置了兩個大面積之實驗觀視窗，可直接觀測火場內撒水頭撒水分佈情形以及對火焰的抑制過程情況。實驗規劃在實驗屋內設定三種火源位置變因，第一種是房間中央區域，第二種為靠牆壁中央，第三種是位於房間角落，總共進行12組位置實驗。FDS數值模擬分析則選取房間中央區域、房間牆壁與房間角落，三種位置類型各一組實驗進行數值模擬分析，之後再與實驗結果比較討論。

2-2 FDS模型理論基礎與執行架構

FDS 數值模擬的理論基礎包含熱流模型、燃燒模型以及熱輻射模型等，詳細的理論模型內容可參考 FDS 技術手冊(McGratten, 2004)。FDS 適用於低馬赫數 (low mach number) 的流場分析，可模擬三維的火災情境，將建築物空間分割為許多細小格點，利用數值分析方法計算模擬預測火災的成長趨勢。FDS 的執行架構分為三部分，第一、設定空間尺寸、邊界條件與格點範圍，第二、由整體流場模型所架構的基本守恆方程式包含了質量守恆、動量守恆、能量守恆以及氣體狀態方程式，利用數值運算求得區域流場中的速度、溫度、與壓力等物理量，第三、模擬分析結果以 3D 圖形或動畫的方式呈現。

$$\text{質量守恆方程式：} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\text{動量守恆方程式：} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla \rho = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (2)$$

$$\text{能量守恆方程式：} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q} + \Phi, \quad (3)$$

$$\text{氣體狀態方程式：} p = \frac{\rho RT}{M}; \quad (4)$$

以上程式係數說明如後， ρ 為氣體密度， \mathbf{u} 代表速度向量， \mathbf{f} 為包含重力等的力量項， h 為熱焓， τ_{ij} 是壓力張量， \dot{q}''' 是化學反應中單位體積產生的熱釋放率， $\nabla \cdot \mathbf{q}$ 代表傳導與輻射熱通量， Φ 則是動能因為黏滯性轉換成熱能的逸散項。

三、撒水頭作動時間實驗規劃與FDS參數設定

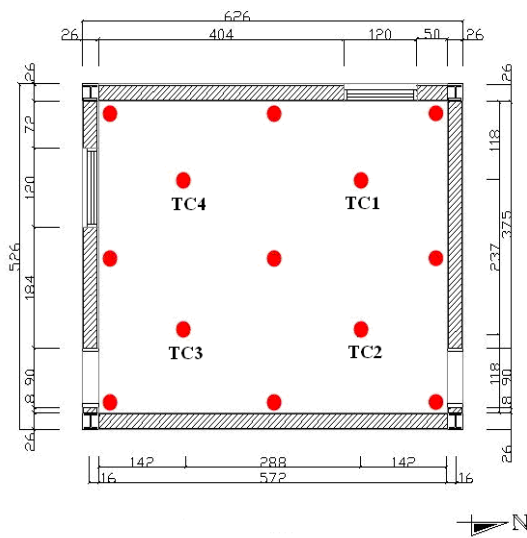
實尺寸房間的設計是為了模擬實際的建築區劃空間火災狀況，所以起火點可能位於房間的任何一個角落。因此本研究探討火源位於房間中不同的位置時，可能產生的各種燃燒狀況對於撒水頭作動之影響。火源位置設定以房間中央區域、靠牆壁中央與房間角落為探討的重點，如下討論。

3-1 實驗屋整體架構與撒水系統配置

實驗屋平面尺寸為6m×5m，牆面厚度設計為0.26m使用砌磚構造方式。北側與南側各有一個2.1m×0.9m之單開門作為房間開口，可依實驗需求自由開啓或關閉，實驗場平面圖如圖1(a)所示。為能更直接地觀測火場內撒水頭撒水情形，以及撒水對火焰的抑制情況，分別於西側牆與南側牆配置了兩個大面積的防火玻璃觀視窗，尺寸為2.4m×1.2m，觀視窗台度為0.6m。整體實驗屋外觀如圖1(b)所示。

撒水頭之設置依「各類場所消防安全設備設置標準」以符合實際之使用狀況。本研究將實驗房間設定為一般公室空間，且依照消防法規定辦公大樓等防火構造建築物撒水頭數量之最低要求設置，所以每一個撒水頭有效防護半徑為2.3m，則每一個撒水頭最大有效防護面積為10.56 m²；因此，撒水頭數量計算應為5×6 m²/10.56 m²，所以至少需要設置3個。而實際設計時，因有整齊配置或美觀等因素之考量，需長寬均衡設置；故實際設置時因r=2.3m時，撒水頭間距 $S=\sqrt{2}r=3.25\text{m}$ ，所以在實驗屋平面矩形中，長軸方向間距計算為6m/3.25m=1.846，為了可以有效的防護整體區域，因此使用2個，而短軸方向間距計算為5m/3.25m=1.538，也採用2個。所以實際裝設撒水頭數量為4個。

撒水系統由四根獨立的管路組成，每一水管末端出口接撒水頭以進行實驗；水管出口位置分別位於實驗屋四個等分平面的中心點，每個水管末端並設置壓力錶及快速接頭。本實驗中所使用的撒水頭皆同為標準型向上式撒水頭。撒水頭包含了玻璃球、支撐承座及迴水板，標示作動溫度為68°C。撒水頭安裝位置距離天花板約為0.1m。撒水頭作動的判定可由四組獨立的撒水系統管路末端壓力表之壓力下降變化瞭解。



(a) 實驗屋平面與熱電偶樹位置圖 (單位: cm)



(b) 實驗屋外觀圖

圖 1 實驗屋的平面圖與外觀圖

3-2 溫度量測系統配置

實驗使用 K 型熱電偶來量測室內的溫度變化，以十個熱電偶為一組，將熱電偶依設定間距綁

於細鐵鏈上組成一組熱電偶樹，並在外圍包覆一層防火棉以保護熱電偶免於被燒毀。在實驗屋中總共用了 13 組熱電偶樹，有八組位於房間的八個角落，剩下五組則分別配置於四個撒水頭的位置下方與房間的中心點。參考圖 1(a)所示平面圖，西北方向的熱電偶樹編號為 TC1（對應 S₁ 撒水頭），其他的熱電偶樹則依順時針方向編號為 TC2（對應 S₂ 撒水頭）、TC3（對應 S₃ 撒水頭）、TC4（對應 S₄ 撒水頭）。單組熱電偶樹的熱電偶設定間距為，自天花板下 0.5m 內每 0.1m 分配一點，共分配五點；天花板下 0.5m 後，每 0.5m 分配一點，亦分配 5 點，所以每組共計 10 個熱電偶。透過數據擷取系統可將實驗過程中熱電偶、壓差計、流量計所得到的電子訊號轉換為數位數據，再傳送至電腦進行記錄；總計同時記錄 135 筆數據資料。

3-3 實驗火源位置規劃

本研究針對實驗屋模型設定不同的火源位置，這些位置基本上可分為三種類型，第一種是房間中央區域，第二種為靠牆壁中央，第三種是位於房間角落，總共進行 12 組位置實驗。實驗所設定的火源位置如圖 2 所示，編號方式如後所述。

房間中央區域部份：其中心點為標準實驗的火源位置，編號 M₁；其他則在房間中的對稱線以及對角線中取數點，編號 X₁~X₃、Y₁~Y₂、Z₁~Z₂。靠牆壁中央部份：探討火源位於壁面時所造成的壁面效應，選定靠近房間三面牆壁的中心點作為火源位置，編號 W₁~W₃；房間角落部分：探討火源位於房間角落造成的角落效應，選定房間西北方角落作為火源，編號 C₁。

本實驗使用瓦斯燃燒器作為實驗的火源，燃料為 LPG 液化石油氣，瓦斯燃燒器為 18cm×18cm 矩形燃燒器，熱釋放率為 100kW，燃燒器中間鋪有小石頭及細砂整流，使火焰均勻分布。

實驗時為了模擬實際密閉濕式撒水頭之狀態，先在管中充水再進行實驗。實驗由火源引燃後開始計時，同步記錄火場溫度以及撒水頭作動時間，並進行攝影；當撒水頭的玻璃球達到作動溫度爆破時，管內壓力會驟降，經壓力錶我們可精確的判斷撒水頭作動與否。

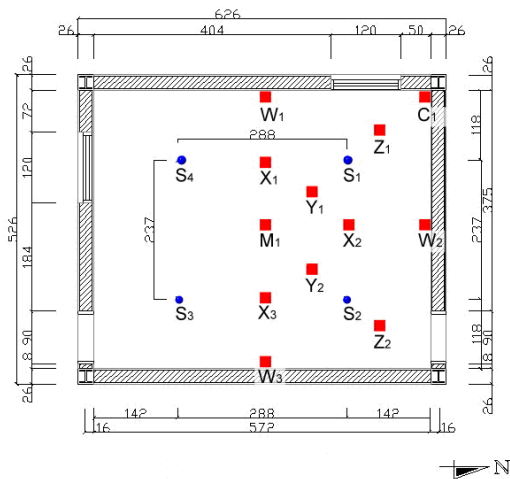


圖 2 火源位置圖（單位：cm）
註：S 為撒水頭位置

表 1 火源位置說明表

實驗次數	火源位置	說明	位置符號
1		房間中央	M1
2		房間中央與各壁面連線的中點位置	X1
3			X2
4			X3
5	房間中央區域	房間中央與撒水頭之間的連線中點位置	Y1
6			Y2
7		房間中央與角落連線中點的位置	Z1
8			Z2
9		緊靠北、東、西側牆面中心點	W1
10	房間壁面		W2
11			W3
12	房間角落	西北側角落	C1

3-4 FDS 模擬參數設置

使用 FDS 模擬計算時, 相關參數的選擇設定是很重要的。有關材料參數設定, 因為在本實驗中僅著重於整體空間的溫度分布, 並無其他材料的延燒, 所以在分析溫度場上, 我們直接使用內建資料庫中的牆壁、天花板等材料參數。依據實驗屋的建材, 牆壁、天花板和觀測窗分別選用 Brick、Gypsum Board、Glass 等材料參數如表 2 所述, 各項材料特性請參考文獻(McGrattan, 2004)。空間計算格點的設定, 依據實驗屋的實際尺寸分割計算格點於 x、y、z 三個方向間距分別為 0.05 m、0.048 m、0.048 m, 總格點數為 816,480 個。FDS 對於邊界條件的設定已考慮輻射損失、傳導損失與對流損失等熱損失情況, 其輸出 EXCEL 檔案格式中有「RAD LOSS」、「CONV LOSS」與「COND LOSS」欄位顯示熱損失計算結果。

圖 3 為火源在靠西側牆壁中央(編號 W₁)時的空間模型圖, 圖的右方向為實際火場的北方。由圖 3 可看出左右兩邊各有一個開口分別代表實驗屋的北方與南方開口, 前方與左方的窗戶則分別代表實驗屋西方與南方的觀視窗, 而模擬空間中的黃點則為熱電偶的位置。圖 4 為空間模型 x-y 平面的格點分布圖, 因為每一個格點與整體空間大小比較起來相當小, 所以在圖中可看到格點的設定分布非常的密集。

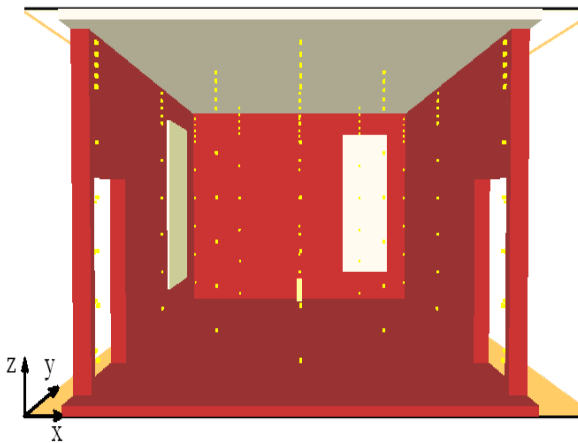


圖 3 火源位於房間西側靠牆壁中央(編號 W₁)的空間模型圖

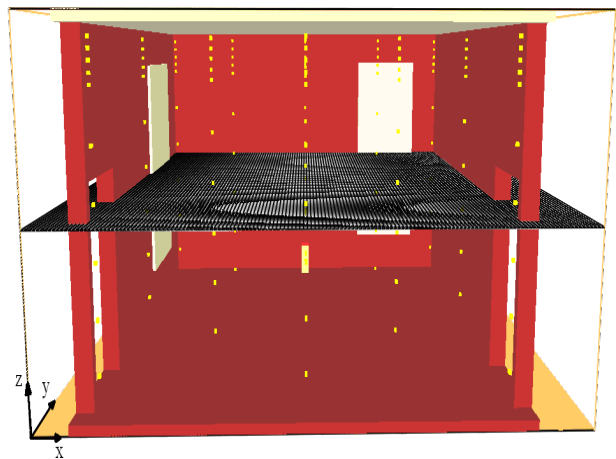


圖 4 空間模型 x-y 方向的格點分布圖

表 2 FDS 參數設置

實驗屋設定參數種類	選用 FDS 材料特性	KS		CP		DENSITY	
		Thermal conductivity		Specific heat			
天花板	'GYPSUM BOARD'	0.48	W/m/K	0.84	kJ/kg/K	1440	kg/m ³
牆壁	'BRICK'	0.69	W/m/K	0.84	kJ/kg/K	1600	kg/m ³
窺視窗	'GLASS'	0.76	W/m/K	0.84	kJ/kg/K	2700	kg/m ³
開口	'OPEN'	-		-		-	
火源	HRR=100kW	-		-		-	

註：參數資料參考 McGrattan, K.B. (2004) *Fire Dynamics Simulator Version 4 - User's Guide*

四、實驗結果整理與討論

實驗規劃之設定參數與程序確定後，實驗依火源位置不同共進行 12 次。實驗結果討論分為三部分，第一部分為火源位置對於撒水頭作動時間之影響。第二部分為於規劃的三種火源位置各選一組代表性實驗使用 FDS 進行模擬分析，再與實驗結果進行比較討論。第三部分實驗誤差的討論。

4-1 火源位置對於撒水頭作動時間之影響

本次實驗共進行了 12 組，各組實驗的作動撒水頭、所對應的作動時間與溫度，整理列表於表 3，表中第二欄編號，第一項符號 LPG 代表火源使用液化石油氣，第二項符號則代表火源的位置，第三項 W 代表管內充水。當火場溫度達到撒水頭作動溫度時，作動瞬間會噴出高壓水，因此管路壓力表所顯示的壓力會驟降，由壓力表變化可判斷作動的時間與作動的撒水頭。

表 3 不同火源位置下，作動撒水頭位置、所對應的作動時間與溫度（實驗值）

實驗次數	編號	火源位置	最先作動撒水頭	作動時間(s)	作動溫度(°C)
1	LPG-M ₁ -W	M ₁	S ₄	142	102.7
2	LPG-X ₁ -W	X ₁	S ₄	141	102.7
3	LPG-X ₂ -W	X ₂	S ₁	123	104.8
4	LPG-X ₃ -W	X ₃	S ₄	130	99.6
5	LPG-Y ₁ -W	Y ₁	S ₁	61	83.4
6	LPG-Y ₂ -W	Y ₂	S ₂	96	102.7
7	LPG-Z ₁ -W	Z ₁	S ₁	73	99.0
8	LPG-Z ₂ -W	Z ₂	S ₂	92	83.7
9	LPG-W ₁ -W	W ₁	S ₄	97	102.7
10	LPG-W ₂ -W	W ₂	S ₂	91	99.0
11	LPG-W ₃ -W	W ₃	S ₃	109	104.3
12	LPG-C ₁ -W	C ₁	S ₁	75	106.9

註：編號說明，第一項LPG代表火源使用液化石油氣，第二項符號代表火源位置，第三項W代表管內充水。

整體實驗的火源位置可大致分為：房間中央區域、靠房間壁面中央與房間角落等三大類。房間中央區域的實驗包括了 X、Y、Z 系列與 M₁，靠房間壁面中央為 W 系列，而角落則僅有進行 C₁ 一組。X 系列是將火源設置在房間中央與各壁面連線的中點位置，Y 系列為房間中央與撒水頭之間的連線中點位置，而 Z 系列則為房間中央與角落連線中點的位置。詳細的分配情形可參考圖 2。

從上段描述的火源位置配置來看, 可以發現距離撒水頭最近的火源位置應該是 Y_1 、 Y_2 與 Z_1 、 Z_2 , 所以可以判斷所需的實驗時間較短; 從實驗結果表 3 中可發現, Y_1 、 Z_1 所需的實驗時間分別約 61 和 73 秒, 而 Y_2 、 Z_2 大約需要 90 秒左右的時間, 雖然幾何位置相同但因為在 Y_2 、 Z_2 附近有通風口的關係, 導致流通的空氣冷卻了附近的高溫, 使得 Y_2 、 Z_2 的作動時間比起相同對稱位置的 Y_1 、 Z_1 要來的長。而此四組實驗所作動的撒水頭, 如預期般的都是距離火源位置最近的撒水頭。

X 系列實驗的火源位置, 因為距離撒水頭較遠, 而且沒有靠近任何壁面, 因此作動時間比起 Y、Z 系列實驗會較長。從表 3 的數據可以得知, X 系列實驗的作動時間平均約在 130 秒左右, 比起 Y、Z 的時間要長了許多。

火源位於壁面的 W 系列實驗, 因為受到壁面效應的影響火焰高度會較高, 所以煙氣上升的速度會比火源位置中央區域之實驗快速。從實驗結果得知, W 系列三次實驗的撒水頭作動時間平均約 99 秒。惟 LPG-W₃-W 實驗之火源位於西側牆壁中央位置, 實驗結果撒水頭作動時間較慢, 因西側牆壁末端皆緊靠通風口, 所以應當與通風效應有關。此次實驗的火源位置於在兩個通風口之間, 火焰受到的擾動較大, 無法穩定的往上傳遞煙氣, 並且在火源兩旁的撒水頭也會受到通風口的影響而使得溫度受到冷卻, 因此撒水頭作動時間較同系列其它兩組實驗較慢。

位於房間中央區域的 LPG-M₁-W 實驗結果撒水頭作動時間為 142 秒, 此實驗未受到任何牆壁影響, 且與四顆撒水頭的距離皆相等, 因此撒水頭作動時間應為所有實驗中最慢的。而房間角落的 LPG-C₁-W 實驗, 因為受到兩個壁面的影響, 會產生角落效應, 使得火焰高度竄升相當高, 在實驗過程觀察發現火焰高度已幾乎接近天花板, 所以導致煙流上升相當快, 也因此撒水頭作動時間作動時間非常迅速, 僅需 75 秒。

4-2 FDS 模擬與實驗結果討論

實驗的主要控制變因在於火源的位置, 雖然實驗進行了三種位置類型總共 12 組, 但在 FDS 選取房間中央、房間壁面與房間角落, 三種位置類型各一組實驗進行模擬。

1. 火源位於房間中央的溫度變化討論

火源位於房間中央時, 因為遠離實驗屋壁面與通風口, 因此可以預測整體實驗屋溫度會較低, 且溫度分布很均勻。圖 5 顯示撒水頭玻璃球旁的氣體溫度隨時間變化曲線, EXP 代表實驗值, FDS 代表使用 FDS 模擬出的計算值。由圖 5 得知實驗過程中, 撒水頭 S_1 與撒水頭 S_4 的溫度曲線是相當近似的, 且都比 S_2 、 S_3 溫度較高。會有這種結果是因為 S_2 、 S_3 較靠近通風口, 而通風口附近會有冷空氣流過, 因此 S_2 、 S_3 的溫度會比較低, 而 S_1 、 S_4 因為較靠近房間角落, 火源的熱量由門口被氣流帶入, 累積在房間角落, 所以 S_1 、 S_4 溫度會比 S_2 、 S_3 較高。針對 FDS 的模擬結果發現, 因為火源位在房間正中央也恰好位於四顆撒水頭中心位置, 所以 S_1 、 S_4 與 S_2 、 S_3 溫度曲線幾乎一樣, 顯示通風效應在數值模擬中並不顯著。進一步與實驗溫度值相比較, 數值計算的溫度上升很明顯的較快, 且相差大約 40°C。雖然存在溫度值的差距, 但對實驗與模擬的整體變化趨勢結果顯示具有一致性。

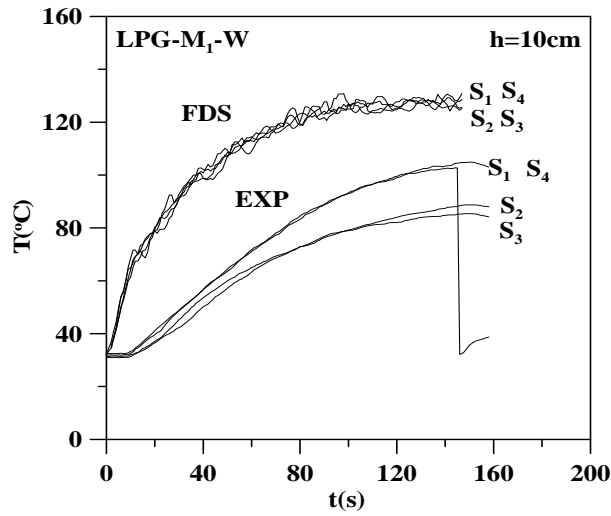


圖 5 編號 LPG-M₁-W 撒水頭玻璃球旁的氣體溫度隨時間變化曲線

表 3 中可以觀察到當火源位於房間正中央且未靠近任何壁面與通風口時，作動的時間是最為緩慢的。作動時間較其他不同火源位置較為緩慢的原因，可推估為因為火源在房間中央時，與各個撒水頭的距離皆一樣，且整個火場未受到任何壁面的侷限，因此熱量很均勻的向四周延展，並沒有特別往哪個方向擴散，所以整體的溫度爬升皆較緩慢，圖 6 為接近撒水頭作動時間時，實驗量測與 FDS 計算的等溫線圖，此圖是天花板下 0.1m 處的 13 個溫度點繪製成的等溫線圖。由兩個等溫線圖可看出整體溫度分佈大都由中心均勻的往四周擴散，房間天花板下 0.1m 處實驗的最高溫約 110°C，而 FDS 模擬的最高溫則為 190°C；而且 FDS 計算的等溫線圖比較對稱，南北開口造成的通風效應則較不顯著。

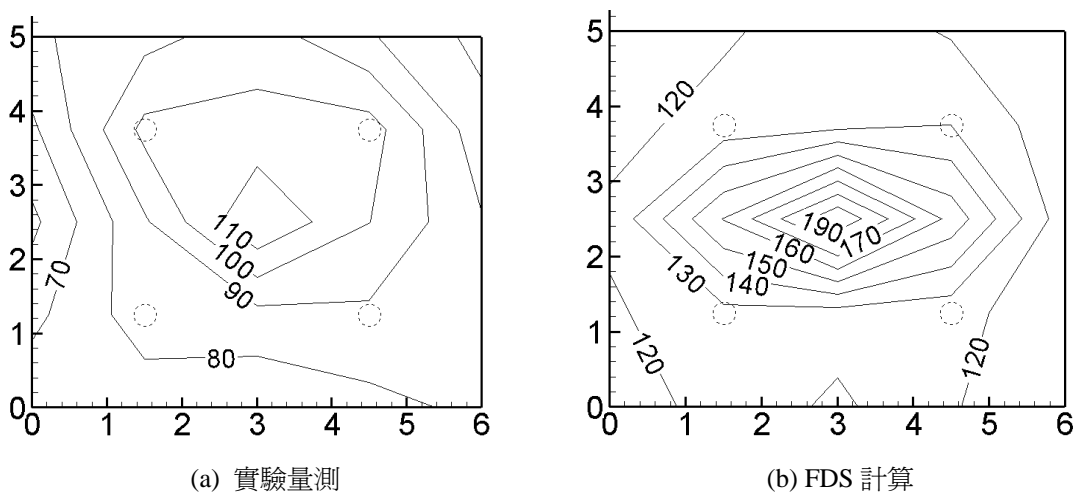


圖 6 編號 LPG-M₁-W 接近撒水頭作動時間 (t=145s) 時，天花板下 0.1m 處的等溫線圖

2. 火源位於房間靠牆壁中央的溫度變化討論

當火源位於房間壁面時, 因為受到壁面效應的影響, 火源有一半的地方被侷限, 因此全部的熱量及煙氣皆往遠離牆壁的一端流動, 圖 7 顯示編號 LPG-W₁-W 撒水頭玻璃球旁的氣體溫度隨時間變化, 其溫度變化比起編號 LPG-M₁-W (圖 5) 火源位於房間中央時要快了许多。圖 7 的實驗量測結果顯示, S₂、S₃ 因為離火源較遠, 使得溫度上升比 S₁、S₄ 來得慢。至於 FDS 計算結果, 四條溫度曲線都很接近, 但 S₁、S₄ 稍微高於 S₂、S₃, 同樣的與實驗趨勢很近似。與實驗溫度值相比較, 數值計算的溫度上升顯著, 相差大約 40°C。

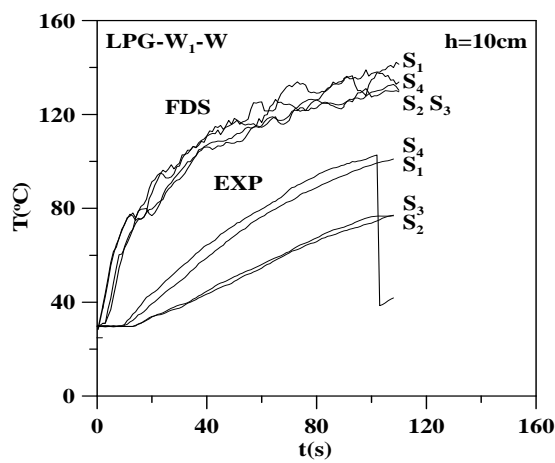


圖 7 編號 LPG-W₁-W 撒水頭玻璃球旁的氣體溫度隨時間變化曲線

圖 8 顯示編號 LPG-W₁-W 接近撒水頭作動時間 (t=102s) 時, 天花板下 0.1m 處的等溫線圖。由圖 8 等溫線圖觀察到, 整體的熱量由西方的牆壁均勻的往房間傳遞, 實驗量測在時間點為 102 秒, 且 S₄ 撒水頭已經作動, 整體房間最高溫在火源上方約為 170°C, FDS 計算的最高溫則約為 230°C。

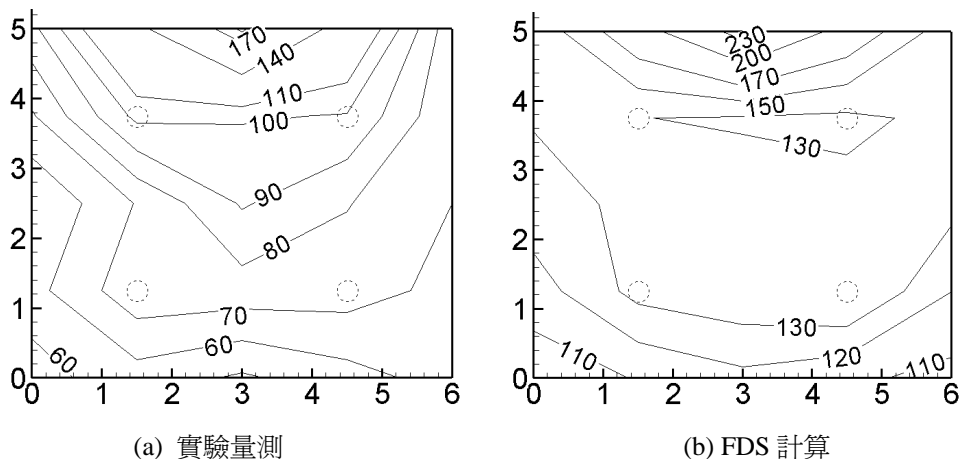


圖 8 編號 LPG-W₁-W 接近撒水頭作動時間 (t=102s) 時, 天花板下 0.1m 處的等溫線圖

3. 火源位於房間角落的溫度變化討論

當火源位於房間角落，同樣受到壁面侷限的影響，而且是受到兩個壁面包圍，整個火源熱量的傳遞方向僅剩 4 分之 1 空間可傳遞，所以火源的熱量與煙氣全部集中往僅剩的空曠方向傳遞，如此造成火勢相當集中，火焰高度也非常高。圖 9 顯示編號 LPG-C₁-W 撒水頭玻璃球旁的氣體溫度隨時間變化。因為火源位於遠離房間通風口的角落，因此 S₁ 撒水頭最靠近火源，從圖 9 顯示無論實驗還是 FDS 的模擬結果，S₁ 的溫度曲線上升的遠遠比其他三個快。圖 10 顯示編號 LPG-C₁-W 接近撒水頭作動時間 (t=72s) 時，天花板下 0.1m 處的等溫線圖。由圖 10 等溫線圖觀察到，整體的熱量由西北方的房間角落往房間傳遞，實驗量測在時間點為 72 秒，且 S₁ 撒水頭即將作動，整體房間最高溫在火源上方約為 230°C，FDS 計算的最高溫則約為 350°C。

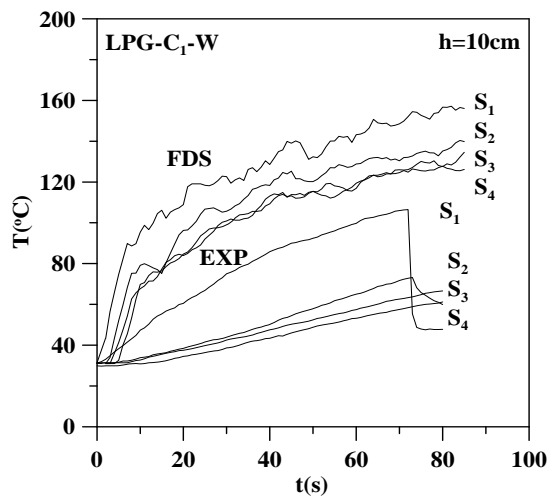


圖 9 編號 LPG-C₁-W 撒水頭玻璃球旁的氣體溫度隨時間變化曲線

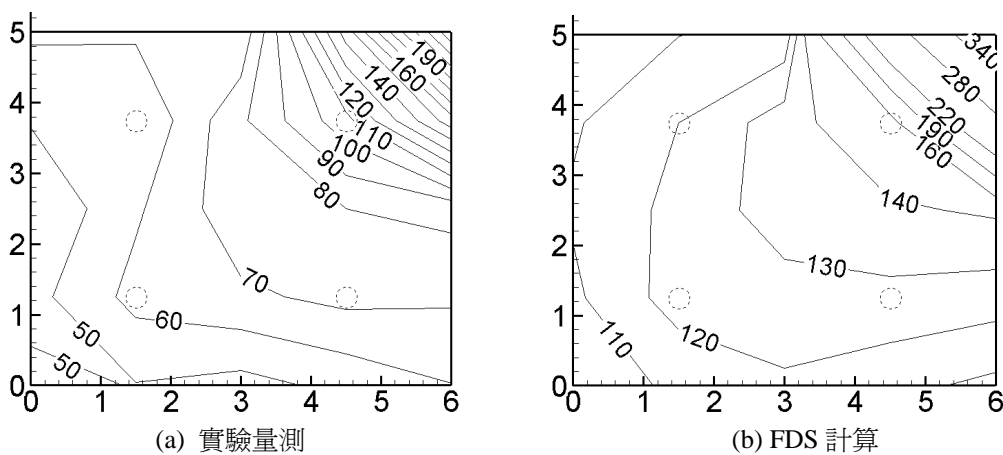


圖 10 編號 LPG-C₁-W 接近撒水頭作動時間 (t=72s) 時，天花板下 0.1m 處的等溫線圖

4-3 實驗量測誤差討論

FDS 數值模擬撒水頭作動時間與實驗結果的比較上, 發現定性的變化趨勢相當一致, 但 FDS 模擬的溫度值幾乎都比實驗值高約 30~ 40°C。在分析過許多因素後, 發現除了因為 FDS 中未設置撒水頭, 所以沒有考慮到玻璃球的熱傳問題外, 其他因素則為熱電偶的靈敏度與熱電偶樹影響流場變化等檢討如下。

1. 熱電偶靈敏度討論

根據熱傳遞學理, 熱傳時間常數(thermal time constant)會影響物體對於外界環境變化的反應, 當熱傳時間常數越大則反應會越遲緩, 因此在相同環境條件下, 熱電偶接點大小會直接影響熱電偶反應時間的快慢。對此問題本研究以 2 種外接銅片接點大小之熱電偶進行靈敏度實驗, 第一種(A) 為比對組熱電偶直徑接點 0.05mm, 第二種(B) 為實驗中使用的約 2mm 直徑接點熱電偶。

實驗結果發現當 40 秒時(A) 比對組熱電偶溫度達 100°C 時, (B) 實驗用熱電偶才約 60°C 左右, 兩者約有 40°C 的差距, 與前述 FDS 模擬及實驗結果之誤差值 30~40°C 非常接近。所以由此靈敏度實驗可以得知, 撒水頭作動時的溫度其實驗結果與 FDS 模擬結果的誤差的應為熱電偶電偶靈敏度的影響。

2. 撒水頭作動溫度討論

目前撒水頭的作動溫度檢測標準係依據內政部消防署所公佈之「密閉式撒水頭認可基準」, 其「作動溫度」實驗程序為將撒水頭置於加熱水槽中, 由低於標示溫度 10°C 的溫度開始, 以不超過 0.5°C/min 的加熱速度升溫, 直至撒水頭動作, 即記錄當時的溫度。本實驗所使用的撒水頭標示作動溫度為 68°C, 實驗時將撒水頭置於天花板下, 周圍環境屬空氣傳熱, 所以量測得的 4 個撒水頭個別作動時之溫度平均大約在 130~140°C 左右, 這也代表了當撒水頭旁的空氣溫度達到撒水頭作動溫度時, 仍需要一段時間將熱傳入玻璃球內使之爆裂。

3. 熱電偶樹影響流場討論

實驗房間中總共設置 13 組熱電偶樹, 熱電偶樹由防火棉包覆防止受到火焰燒毀直徑大約有 5 公分, 熱電偶樹會在火場中形成障礙物, 因此對於火場煙氣的流動影響頗大。在 FDS 的模擬分析中, 熱電偶只是一個點而非實體, 因此在 FDS 模擬中火場煙氣的流動未受到熱電偶樹實體的影響。所以實驗設置之熱電偶樹影響流場變化也是可能 FDS 模擬與實驗結果產生誤差的原因之一。

五、結語

本研究針對消防工程經常使用的密閉式撒水頭於實際火場之作動時間進行實驗與探討, 在全尺寸實驗室之天花設置 4 個密閉式撒水頭, 使用 LPG 液化石油氣燃燒器作為實驗的火源, 設定三種火源位置變因, 包含房間中央區域、靠牆壁中央、房間角落, 進行撒水作動時間測試。獲致結論為撒水頭作動時間與流場特性有關, 而流場特性又與壁面、火源與撒水頭距離以及通風口有關。

從「牆壁影響的程度」來探討，當火源位置距牆壁 1.25m 時，撒水頭作動時間遠比靠近於牆壁慢許多，因此靠近牆壁的影響效應會加速上層溫度的成長。在「火源與撒水頭距離」來探討，當火源位於房間中央的實驗中，因為火源未貼近任何壁面，距離撒水頭的位置也是最遠，因此實驗時間耗時相當久；若與同樣未接近任何壁面，但火源與撒水頭的距離只有火源在房間中央時一半的實驗，可發現實驗時間縮短了近兩倍之多。所以得知火源距離撒水頭的遠近，對於作動時間亦有很大的影響。對於「通風口的影響」則可以觀察火源在房間中心點與西北方撒水頭連線中點的位置以及房間中心點與東北方撒水頭連線中點的位置，從實驗結果可看到作動時間比位於西北方的火源延遲了約 30 秒之多，因此得知通風口對於撒水頭的作動時間有延遲的影響。

FDS 數值模擬分析選取火源設置房間中央、房間壁面與房間角落等，三種位置類型各一組實驗條件進行模擬分析結果得知，發現定性的變化趨勢相當一致，但 FDS 模擬的溫度值幾乎都比實驗值高約 30~ 40°C。在分析過許多誤差因素後，發現因為 FDS 中未設置撒水頭，所以沒有考慮到撒水頭玻璃球的熱傳問題外，其他因素則為熱電偶的靈敏度與熱電偶樹影響流場變化等。若摒除前述的影響因素，則 FDS 模擬值相當準確，而且溫度的分布型態也大致一樣，因此往後若要進行耗費昂貴的全尺寸實驗之前，可預先利用 FDS 進行模擬，可得到大致的延燒趨勢，如此對於實驗之前的事先規劃可以有很大的助益。

謝 誌

本研究承內政部建築研究所 2006 年委託研究計劃「性能式防火設計基準全尺寸驗證研究」提供研究經費及承內政部建築研究所防火實驗中心同仁協助技術支援與提供設備進行性能驗證實驗，謹此致謝。

參考文獻

- Alpert, R.L.(1971) Fire induced turbulent ceiling jet, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA., FMRC Serial Number 19722-2.
- Heskestad, G. and Delichatsios, M.A. (1978) The initial convective flow in fire, *Seventeenth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute: 1113-1123.
- Lee, S.R. and Ryou, H.S. (2006) Numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio, *Building and Environment*, Vol. 41: 719-725.
- McGrattan, K.B. (2004) *Fire Dynamics Simulator Version 4 - User's Guide*, National Institute of Standards and Technology.
- Nam, S. (2004) Actuation of sprinklers at high ceiling clearance facilities, *Fire Safety Journal*, Vol. 39: 619-642.
- Peacock, R.D., Reneke, P.A., Bulowaski, R.W., and Babrauskas, V. (1999) Defining flashover for fire hazard calculations, *Fire Safety Journal*, Vol. 32: 331.

- Ryder, N.L., Schemel, C.F., and Jankiewicz, S.P. (2006) Near and far field contamination modeling in a large scale enclosure: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured observations, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 130: 182-186.
- Ryder, N.L., Sutula, J.A., Schemel, C.F., Hamer, A.J., and Brunt, V.V. (2004) Consequence modeling using the Fire Dynamics Simulator, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 115: 149-154.
- Vettori, R.L. (2003) Effect of beamed ceiling on the activation time of a residential sprinkler, National Institute of Standards and Technology.