

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

電腦模擬應用於撒水幕系統隔熱性之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-216-020-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中華大學營建工程學系

計畫主持人：鄭紹材

共同主持人：雷明遠

計畫參與人員：蘇鈺婷

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 31 日

摘 要

關鍵詞：Kameleon FireEx (KFX)、撒水幕、隔熱性、電腦模擬

國內有許多火災模擬軟體之相關研究，但尚未有研究將模擬軟體應用至撒水幕系統隔熱性之研究，而一個撒水幕全尺寸試驗的人力成本花費龐大，因此，本研究利用電腦軟體輸入火場發生情形，分析模擬的結果求得撒水幕的防火設計參數。

本研究以電腦模擬針對全尺寸試驗之數據加以驗證。在蒐集國內外火災模擬軟體之相關文獻，經歸納、整理、分析、比較後，選出由挪威籍 Magnussen 教授及其團隊研發，針對火災和爆炸所發展 CFD 評估模式的火災模擬軟體 Kameleon FireEx (KFX)，應用至撒水幕系統，以電腦模擬驗證之方式，觀察火災發生時撒水幕之隔熱性與週遭溫度變化之情形，並與全尺寸實驗所得之數據結果進行比較分析及探討，來建立與修正撒水幕系統之參數，並獲得電腦模擬軟體滿足撒水幕系統機能之相關資訊。

ABSTRACT

In Taiwan, the study of heat insulation performance for water curtain by using fire model has not been presented yet. As a result of a highly spending on the full-scale experiment of fire-resistant, this research use the real fire experiment data and parameter which has been finished already and cooperate with the fire simulation software to analyze heat insulation performance of water curtain. We have consulted an extensive study of various journals, published and unpublished research papers about fire simulation software by literature review in this research, and using Kameleon FireEx (KFX) which is a 3-dimensional transient simulator for fire and gas dispersion analyses in Computational Fluid Dynamics to water curtain system. Then, we observe the heat insulation of water curtain and the condition that the temperature of surrounding area changes while the fire takes place by putting the test in computer simulation method, and compare with the full-size experiment data to analyze and discuss the result. After finishing the experiment and getting firing prevention the design parameter of performance for water curtain to improved the standards of its.

Keywords: Kameleon FireEx (KFX)、water curtain、heat insulation、fire model.

一、前言

1-1 研究背景與目的

隨著科技的進步與性能式法規的推動，使得建築物之防火設計更朝向設計多元化的優點。在防火區劃方面，建築技術規則設計施工編第七十五條，「撒水幕」與防火門窗同屬於可裝設於開口之「防火設備」。撒水幕系統之應用，讓業者除了舊有設計的防火門窗或防火鐵捲門外，更多了新的選擇。撒水幕之定義「係以噴水而形成水幕之方法來阻擋火焰之進入」[1]，而國內首宗撒水幕防火設備系統，已於93年4月29日經內政部以「內授營建管字第0930083883號」核發性能認可書，裝置於○○公司台北廠之「挑空處垂直區劃防火設備」，成為垂直區劃設計之另一個設計手法[2]；然而國內撒水幕相關之研究及使用仍相當少見，尚有很大的進步空間，因此有必要進行此一相關研究。

本研究主要採用火災模擬軟體，將其應用在撒水幕防火設備，來瞭解撒水幕隔熱性的設計參數，將電腦模擬分析得到的參數應用在建築設計上，除了配合建築物之性能式設計節省防火設計的花費與因設計不良產生的損失外，應用電腦模擬分析將節省實驗所需的龐大費用，由於全尺寸試驗會花費許多的時間、人力、及成本，若以電腦模擬軟體進行相關測試，除了會有效的節省許多資源外，亦可藉由本研究了解各火災模擬軟體使用之差別與國內之應用情形，對於日後學術界之應用將更為得心應手。

電腦模擬軟體的應用，減少了撒水幕全尺寸試驗所需的人力負荷，且全尺寸試驗只有單一情境，電腦模擬軟體不論是大型空間或複雜的幾何形建築等，可模擬多種情境。然而，目前國內尚無任何一套軟體確定可用於撒水幕系統，因此，套用電腦模擬軟體來建立與修正撒水幕系統之參數，透過參數的設定、修改，訓練電腦模擬軟體對撒水幕系統的適用性。因此，本研究之研究目的如下：

- 一、分析及比較電腦軟體模擬與試驗數據之可行性，
- 二、獲得電腦模擬軟體滿足撒水幕系統機能之相關性資訊。

1-2 研究方法

電腦模擬分析為本研究的研究主軸，在火災模擬軟體方面，一般可分為區域模式(Zone model)和場模式(Field model)，區域模式是將建築物空間劃分為若干個區域，利用能量守恆定理來預測每個區域內火災的溫度和煙層濃度的變化情形，但區域模式只能測出區域內煙平均流動的情形，無法實際預測建築物內部詳細的溫度分佈情形；場模式也就是CFD模式，主要是將建築物空間分為若干個格點，並以數值方法來描述火災現象，能較為仔細及正確的預測出每個格點在火場中之速度、壓力、濃度值、溫度等之變化情形，但場模式需要高階的電腦配備操作及較長的計算時間。為了確立撒水幕防火性能依據之準確性，以電腦軟體模擬出火災發生時撒水幕之隔熱性與週遭溫度變化之情形，將模擬結果所得之參數，與全尺寸實驗所得之數據結果進行比較分析及探討。

1-3 研究流程

本研究之研究流程圖 1 所示：

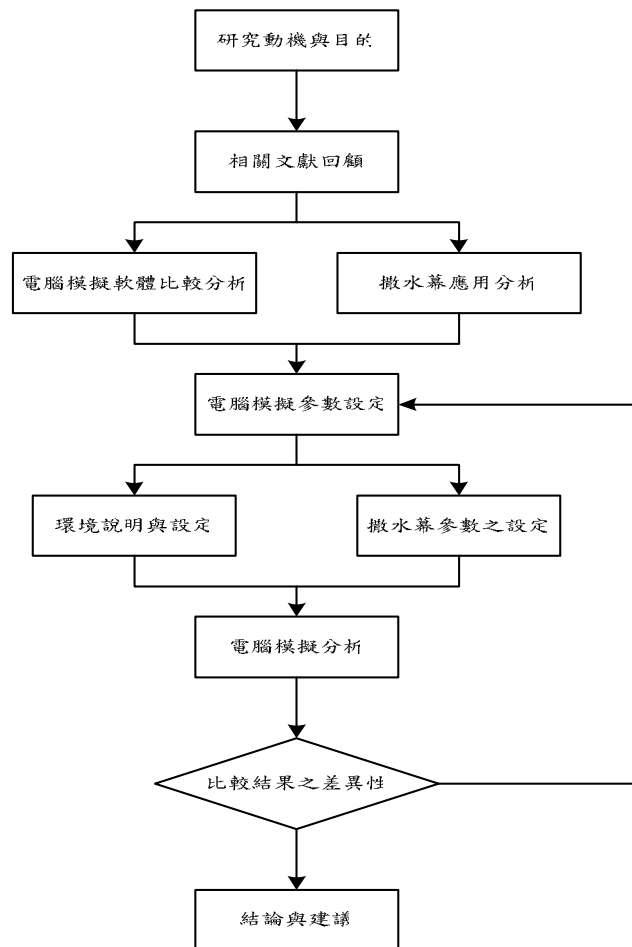


圖 1 研究流程

二、撒水幕試驗案例

本研究主要根據文獻案例「撒水幕防火設備評定基準之研究」[2]中水平延燒試驗之試驗規格，以電腦模擬軟體驗證，其水平延燒試驗規格如表 1 所示。詳細試驗測溫點位置如附件圖 1、附件圖 2 所示。試驗結果溫度分佈圖如圖 2 所示。

三、電腦模擬軟體

目前國內都採用國外所研發的火災模擬軟體來做應用與研究，火災模擬軟體的類型可分為區域模式(Zone model)與場模式(Field model)兩種，由於場模式對於火場模擬的情境比區域模式更為準確，較常為國人所使用。本研究針對國內較為常用之場模式火災模擬軟體整理如表 2。在國內應用之場模式電腦模擬軟體中，以美國 NIST 所研發的免費軟體 FDS 應用為最廣，本研究在最初曾嘗試以 FDS 模擬「撒水幕防火設備評定基準之研究」試驗之結果，由於 FDS 中之功能設定中，只有灑水頭的參數設定；而灑水頭與撒水幕之設計原理不同，防火性能亦不同，無法將灑水頭之參數套用至模擬撒水幕，因此無法以電腦模擬軟體 FDS 進行撒水幕

試驗之驗證。

表 1 水平延燒試驗規格表[2]

類型	水平延燒	
體積	4.4m*3.2m*3.45m + 4.2m*4.2m*4.2m	
火載量	50kg/m ²	
木材重量	70kg*9(堆)=630kg	
酒精膏	800g*9=7.2kg	
防火時效	1hr	
撒水幕設定	無	有(4顆)
實驗燃燒情形	1. 試驗 3 分鐘，前排左、右木堆起火； 2. 試驗 6 分鐘，前排木堆引燃中排木材試驗 7 分 30 秒，火焰開始竄出開口，向水平方向延燒； 3. 試驗 8 分鐘，火場內達到閃燃。	1. 試驗 1 分鐘，前排中、右木堆起火； 2. 試驗 1 分 20 秒，火場內平均溫度達到 70°C，啟動撒水幕系統； 3. 試驗 13 分鐘，火場內後排木堆開始燃燒； 4. 試驗 20 分鐘，火場內達到閃燃。

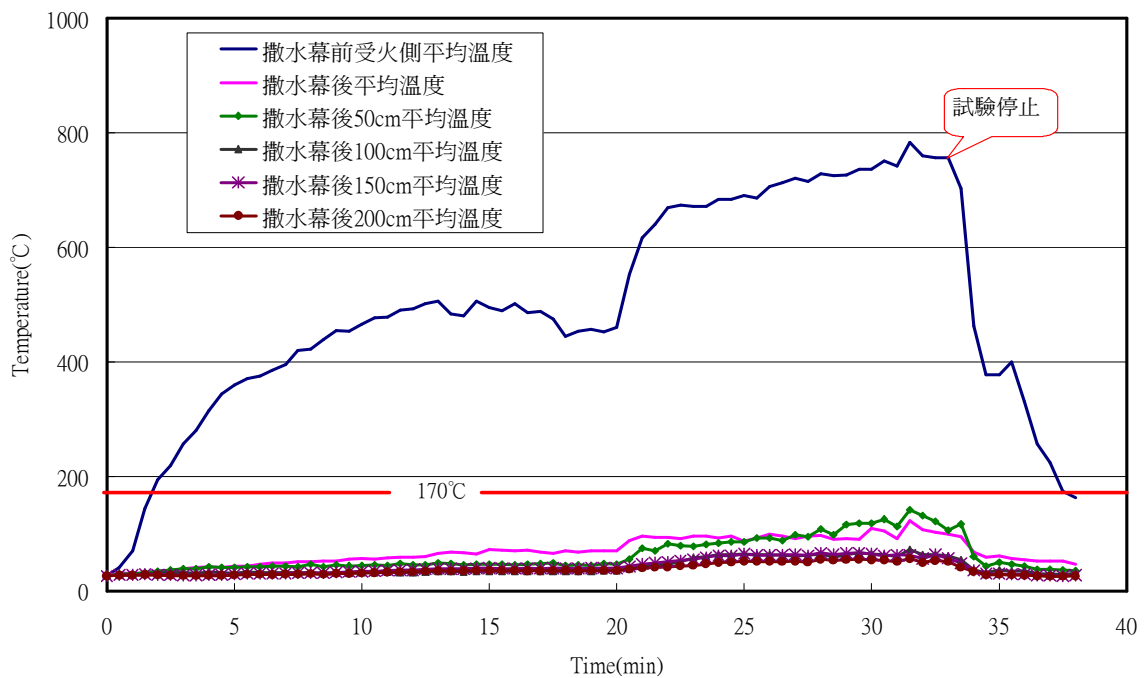


圖 2 撒水幕前、後之平均溫度變化[2]

瞭解無法以 FDS 模擬撒水幕後，本研究發現挪威 NTNU(Norwegian University of Science and Technology)的 Magnussen 教授及其團隊所發展之 CFD 模擬軟體場模式的 Kameleon FireEX(KFX) 的功能近似撒水系統的設定參數，由於 KFX 的使用需經認證，本研究亦幸運獲得挪威研發公司的授權，於本研究計畫之執行時間內將 KFX 應用至撒水幕防火性能之研究。

表 2 國內常用之場模式火災模擬軟體與 KFX 比較表

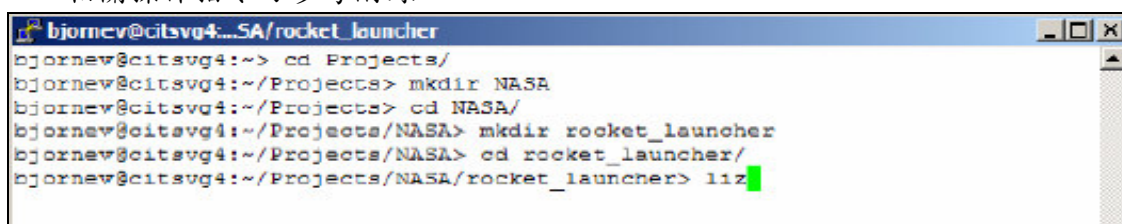
部分資料來源出自文獻[3、4]

項目	KFX	FDS	Star-CD	SMARTFIRE	JASMINE	PHOENICS
出版單位	挪威 SINTEF 防火研究實驗室	美國國家標準技術研究所 (NIST)	英國的 Computational Dynamics Ltd.	英國 GREENWICH 大學 消防工程小組(FSEG)開發	英國 BRE 的火災及 風險科學部門 (FRS)所發展	英國 CHAM 公 司開發
主要用途	分析火煙危 害、結構的抗火 能力分析	火災流場分析	熱傳、流體分析	火災流場分析	煙的流動、熱對流、 燃燒、熱輻射及邊界 熱傳導等模式	流場及熱傳、質 傳、燃燒與化學 反應分析
應用場所	複雜型建築物 如鑽油平台等	模擬大空間建築物	機械流場模擬	複雜的火場形狀	核能電廠、醫院、運 動場、隧道、捷運、 飛機和船艦等場所	
輸入條件	邊界設定條件 如速度、模擬時 間等。	邊界設置條件如速度、溫度。	邊界設置條件如速度、溫度、 濕度...等，較為嚴謹。			
設置功能	可與 Microstation 相 結合	在火災方面，例如 Sprinkler 與火原條件皆有 database 可 隨現況作調整，叫符合真實 狀況。	邊界條件較為嚴謹，但火災設 置功能較少，例如火源只能調 整大小不能改變燃燒材質，且 Star-CD 無 Sprinkler 這項功 能。	有自己的繪圖引擎 (CADEngine)，可讀取 AutoCad 的 DXF 檔，有 和善的使用者介面 (GUI)，方便使用者輸入 火場資料。		
火源選用	可同時處理多 燃料火災	可設置火源大小、燃燒材質 的化學物質的參數。	只能設置火源大小			可設置火源大 小、燃料設定。
軟體特色	設定較複雜，但 軟體在計算過 程中可修改設 定參數，可設定 模擬火災發生 時不同角度的 擬真動畫。	此套軟體設備較為簡潔明 瞭，所以修改容易且快速。	此套軟體因設置較為嚴謹，修 改不易且複雜，需有相當經驗 者才有能力修改。	開放式的平台架構，可 撰寫其他功能程式與其 相結合。		

四、KFX 模擬過程與設定

4-1 KFX 功能介紹

KFX 較不同於一般火災模擬（如 FDS）在於，KFX 是在 Linux 作業系統操作環境下模擬，無法在 Windows XP 的作業系統下操作，因此在執行 KFX 前需進行 Linux 作業系統的安裝，於 Linux 作業系統安裝完成後，打開終端機按照安裝步驟輸入安裝指令(圖 3)，安裝成功後打 liz，便可執行 KFX，安裝執行 KFX 的 Linux 相關操作指令可參考附錄一。



```
bjornev@citsvg4:~/SA/rocket_launcher
bjornev@citsvg4:~> cd Projects/
bjornev@citsvg4:~/Projects> mkdir NASA
bjornev@citsvg4:~/Projects> cd NASA/
bjornev@citsvg4:~/Projects/NASA> mkdir rocket_launcher
bjornev@citsvg4:~/Projects/NASA> cd rocket_launcher/
bjornev@citsvg4:~/Projects/NASA/rocket_launcher> liz
```

圖 3 KFX 於終端機之安裝情形

KFX 具有模擬濃氣、稀氣的氣體擴散、與碳氫化合物火災的能力，並能處理封閉空間與開放空間中的液體燃料與噴氣火災，其模擬結果經過挪威 SINTEF 防火研究實驗室、美國 SANDIA 國家實驗室等試驗的驗證，故任何與氣體擴散及火災相關的消防安全模擬皆可採用此系統。在應用領域上，KFX 除了可以分析火煙的危害（包括溫度分佈、組分濃度分佈、熱輻射分佈等），並瞭解滅火系統設計的性能外，亦可以結合 USFOS（軟體使用非線性的破壞分析，應用於鋼結構）法則做結構的抗火能力的分析，進行圖形化的顯示(圖)，使設計人員、學者專家、工程界更加瞭解火災對建築物、構造體所造成的危害，此系統亦成功應用在立管破裂和隨後的起火境況、鑽油平台火災及其相關結構構件之結構行為，KFX 可處理位於不同入口之多燃料火災(multiple fuels from different inlets)，故非常適合模擬因大區域火災延燒，及地震火災所造成多起火災及多處延燒的狀況，這比多數模擬軟體僅能模擬第一及第二起火點更優於處理火災延燒模式之處 [3]。

KFX 除了可在檔案模擬過程中修改環境的參數設定外，系統中包含撒水系統的設定(圖)，除了可模擬出撒水系統滅火的情況，亦可改變撒水幕系統水量與噴頭角度的設定，另外，針對複雜型建築物亦可做模擬[5]。

4-2 格點(grid)設定

KFX 為 CFD 模式的 3D 模擬軟體，KFX 的運算觀念主要是採用有限體積法 (Finite Volume Method)，其基本想法是將計算區域劃分為網格，使每個網格格點周圍有一個互不重複的控制體積並做計算，利用這原理計算出空間內溫度、熱等變化情形；因此，在使用 KFX 建置模型前，需先將要模擬計算的空間劃分為需要的格點數，電腦方能做計算並模擬火災情形。

本研究使用 KFX 模擬的初始設定條件如下表所示，設定的步驟由主選單 **control** 選項，選擇 **Initialize Domain** 內設定格點數，並設定建立模擬的空間大小；完成格點的設定後，再進入主選單 **cells** 根據 KFX 內建的 cells 的設定做選擇，搭配主選單 **Draw** 的功能建置模型如圖 4 所示。

表 3 KFX 模擬初始設定條件

體積	4.4m*3.2m*3.45m + 4.2m*4.2m*4.2m
模擬計算空間大小	10m*6m*6m
格點設定大小	20cm
初始格點數	50*30*30
計算的單位時間	0.001s

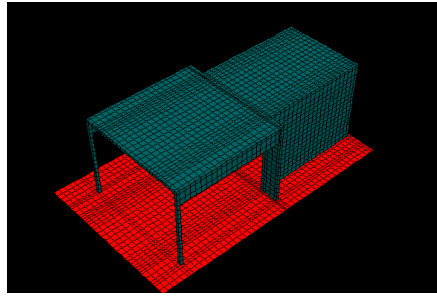


圖 4 KFX 模型建置圖

4-3 燃料設定

在「撒水幕防火設備評定基準之研究」之試驗中，主要以木材堆為試驗燃料，如圖 5 所示，由於 Kameleon FireEx 起火源相關預設值均為氣體與液體，故若要模擬如木材堆的固體火災，需考量利用物體釋熱率等價替換的適當性及可行性。由於固體(木頭)要進行燃燒的狀態前，主要是先由固體轉化為氣體，轉化了的氣體與氧發生氧化反應，即為所謂的「燃燒現象」，本研究利用這個觀念，將木頭的淨熱通量(Net Heat Flux, q'' , KW/m²) 除以氧化熱(Heat of Gasification, L, kJ/g)，得到氧化率(gasification rate, m , g/m²·s; $q''/L = m$)。淨熱通量指在燃料表面(fuel surface)的淨熱通量(net heat flux)代數和；氧化熱即為固體或液體產生燃料蒸氣所需要的能量。

本研究根據文獻[2]針對單堆木材之熱釋放率進行試驗(試驗結果如圖 6 所示)所得到的實驗數據計算，並將計算的值輸入 KFX 中 cells 的「**Transient Boundary Condition**」的 Mass flow 值；但由於燃燒有設定的面積，此面積亦包含很多的 computational cells，而每一個 burning cell 的 Mass flow 乘上 number of cell 才會等於 gasification rate 值(m , g/m²·s)；因此經由試驗得到的數據在經過公式計算後，仍須再除以建模時木材堆設定的 cells 數目。如在第 300 秒的熱釋放率(RHR)值為 356KW，試驗的木材堆表面積為 0.9m*0.9m，由國外文獻中查得松木的氧化熱值為 1.8 kJ/g[6]，在 KFX 內木材堆的 number of cells 為 10*5=50，因此得到在第 300 秒的氧化率為：

$$356/(0.9*0.9)/1.8/(10*5)/1000=4.89 \text{ g/m}^2\cdot\text{s}$$

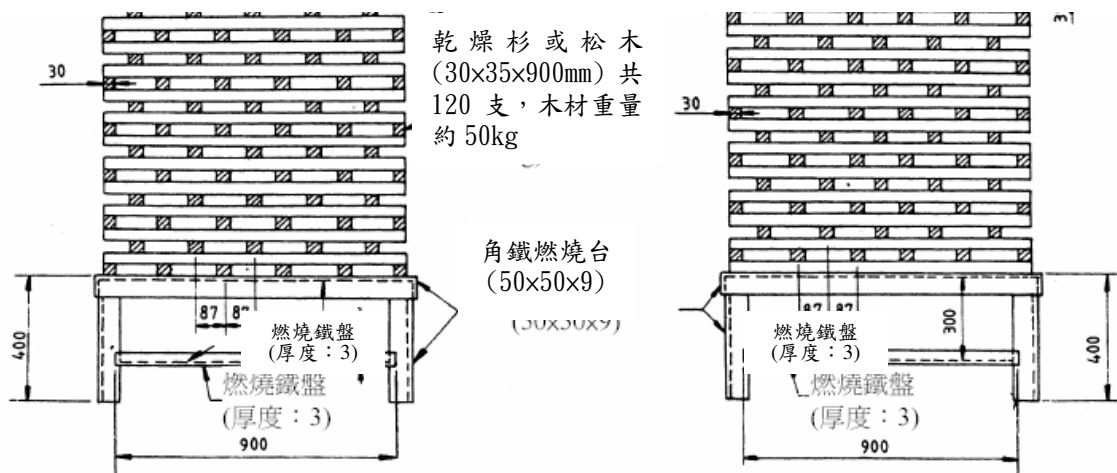


圖 5 火源配列模型

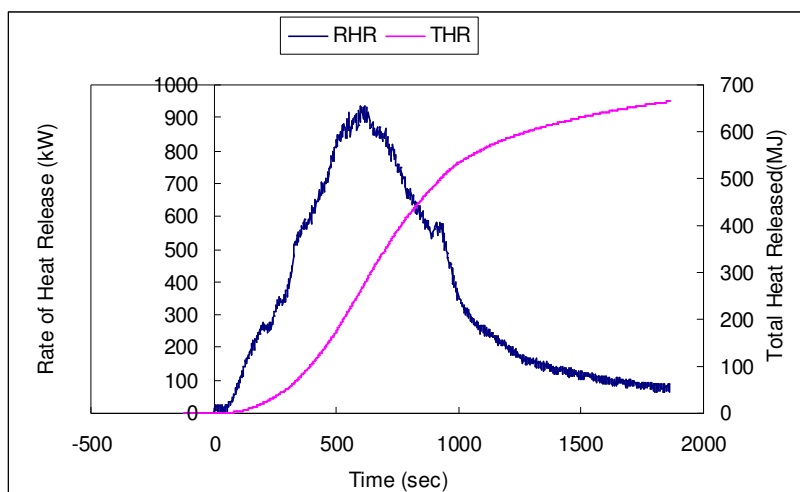


圖 6 單堆木材之熱釋放率

4-4 撒水幕設定

KFX 水系統的設定需進入主選單 **control** 中的 **Submodel properties** 做設定，在 KFX 關於水系統的設定是撒水系統(spray)的設定參數，而 spray 參數設定的示意圖如圖 7 所示，本研究採用以多個 spray 排列噴灑形成水幕狀來模擬撒水幕(water curtain)作用之情形(圖 8、圖 9)，求出實際撒水幕兩側“\”的角度並設定最左最右的 spray 滿足上面角度用 $\sin \theta$ 找出對邊的寬度，累積多個 spray 寬度成噴灑寬度範圍(圖 10)。

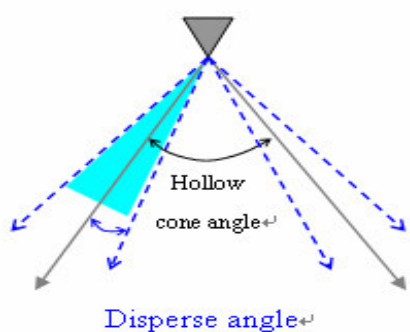


圖 7 KFX 中水系統 spray 設定示意圖

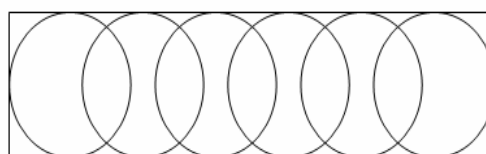


圖 8 水幕平面配置

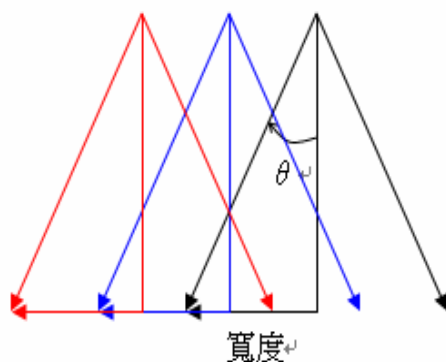


圖 9 模擬撒水幕示意圖

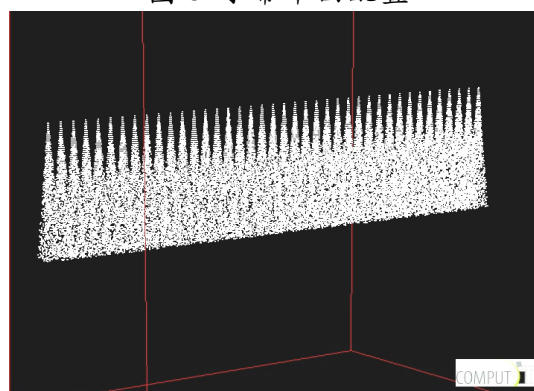


圖 10 Multi spray water curtain[7]

五、模擬結果與討論

本研究以 KFX 模擬水平延燒有撒水試驗時間共進行 30 分鐘，將撒水幕試驗之電腦模擬結果如圖 11 所示，與全尺寸試驗模擬結果(圖 2)相比較。在全尺寸試驗中的撒水幕能有效的降低火場的溫度，但以 KFX 模擬的結果發現對於溫度之降低無法有效呈現，可能原因及待修正之問題點歸納如下，可提供後續研究者之參考：

1. 全尺寸試驗現狀與電腦模擬環境不同

全尺寸試驗在現實中可能受到氣候(如溫度、濕度、空氣流動速度)等因素影響；而與模擬環境的設定較偏向理論的假設，需較為嚴謹的假設條件才能模擬出與現實生活近似的結果。在此次模擬的過程中，全尺寸的試驗模組外牆，考慮其結構體之密閉性之影響無法確定試驗的條件是完全的密閉空間，但在 KFX 的外牆設定中，當設定其外牆為實體即表示完全不通風，就通風因素影響的情況下，全尺寸試驗與電腦模擬產生的結果產生偏差值是很有可能發生的。

2. 燃料型態不同之燃燒

在全尺寸試驗中使用的燃料為木材堆，為固態火災，而 KFX 內燃料的設定只有氣體或液體的參數值，雖然以等價的氣體燃料釋放值來取代木材的燃燒這個方法解決模擬的問題，但不同型態的燃料燃燒導致結果可能也會不同。

3. 氣體燃料無法完全與 O₂ 作用

如圖 12、圖 13 所示，當全尺寸試驗進行到一半木頭燃燒劇烈、溫度上升很高時，而在 KFX 的模擬是以木材堆的熱釋放值來替換相對應產生的氣體燃料之釋放，由於溫度高而木頭的熱釋放值大，代表需替換釋放的氣體很多，大量氣體一下子釋放的結果是造成燃燒不完全之現象發生，模擬出的火場溫度無法均衡，與實際的火場狀況不符合。

4. 撒水幕水滴之密度與釋放之燃料氣體影響空氣流動因子

撒水幕的水滴顆粒之密度有限，而氣體燃料為氣體，當釋放量多時很容易穿過撒水幕與撒水幕後方的空氣中的 O₂ 結合進行燃燒的現象，致使模擬出無法與實際試驗撒水幕能降低火場溫度相同的情況。

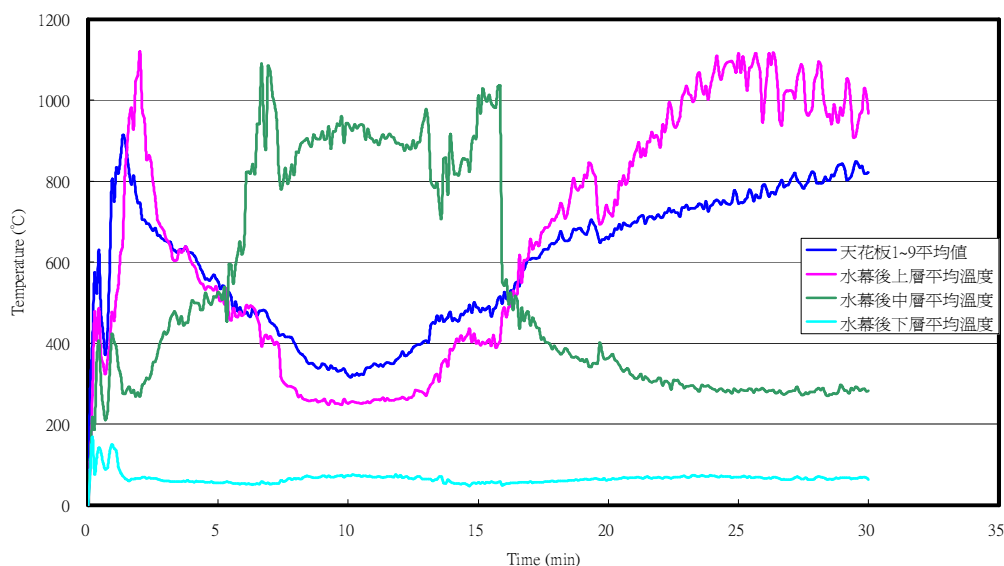


圖 11 KFX 模擬撒水幕水平延燒試驗之平均溫度

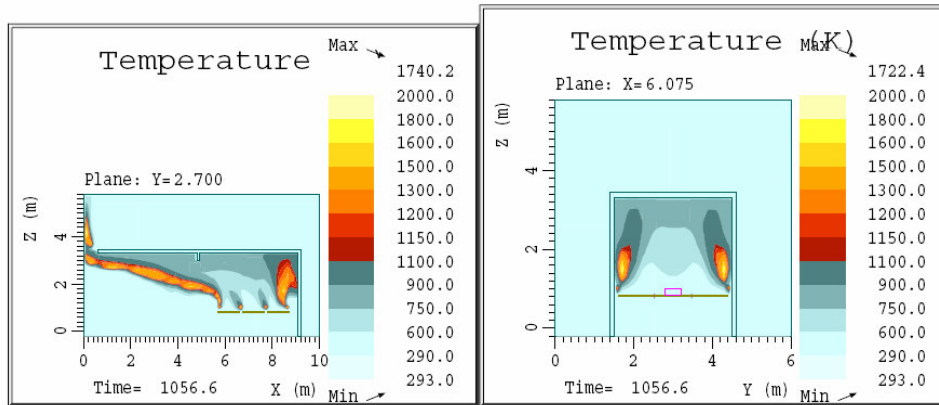


圖 12 KFX 模擬撒水幕水平延燒試驗之溫度切面圖

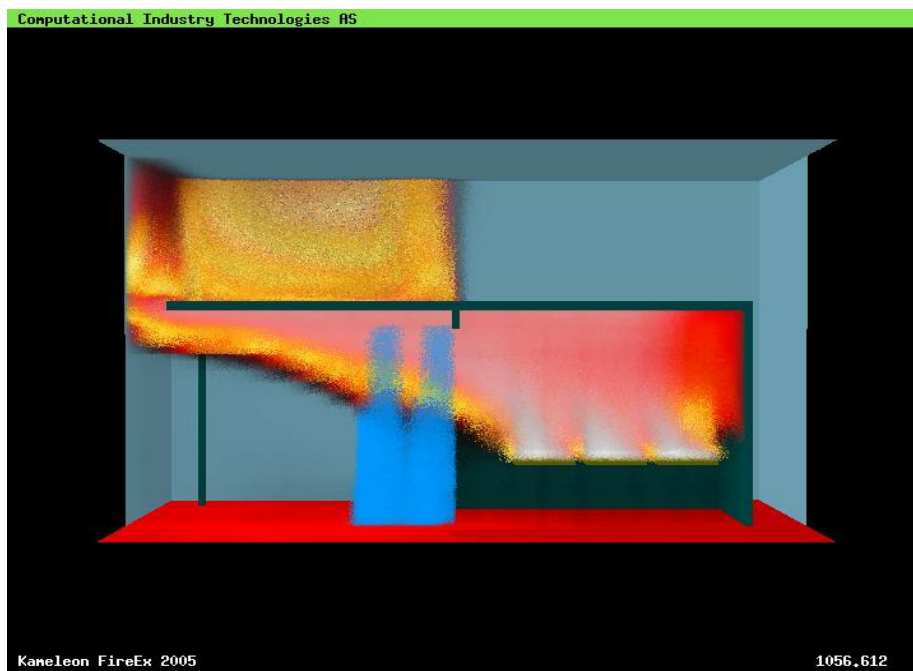


圖 13 KFX 模擬撒水幕水平延燒試驗之擬真圖(1056 秒)

六、結論與建議

本研究在進行電腦模擬應用於撒水幕系統隔熱性之研究，先後分別嘗試 FDS 與 KFX 軟體，探討模擬撒水幕系統之隔熱情境。發現 FDS 在水幕系統方面設定無法達成，因而選用較接近撒水幕系統功能的 KFX 軟體。在本研究進行當中，歸納下列結論與建議，提供後續研究者之參考。

1. 本研究利用 KFX 軟體中之撒水系統與幾何參數，可以模擬撒水幕系統之撒水運作。
2. 在模擬火災室起火燃燒，火焰與熱通過撒水幕之情境，發現模擬與試驗兩者大不相同，可能之原因與水幕水滴過大，可燃性瓦斯通過水幕與外界氧氣繼續燃燒所致，導致水幕之隔熱性在模擬上產生困難。
3. 若欲以電腦模擬撒水幕系統，建議需另考慮燃燒條件（例如氧氣充分供應）與考慮水幕水滴吸熱汽化作用等因素。
4. 在本研究操作 KFX 軟體，雖不易達成撒水幕隔熱性能之模擬，但若應用於鐵捲門等固體防火設備，去除水的不確定因素，應能模擬鐵捲門的防火設計。

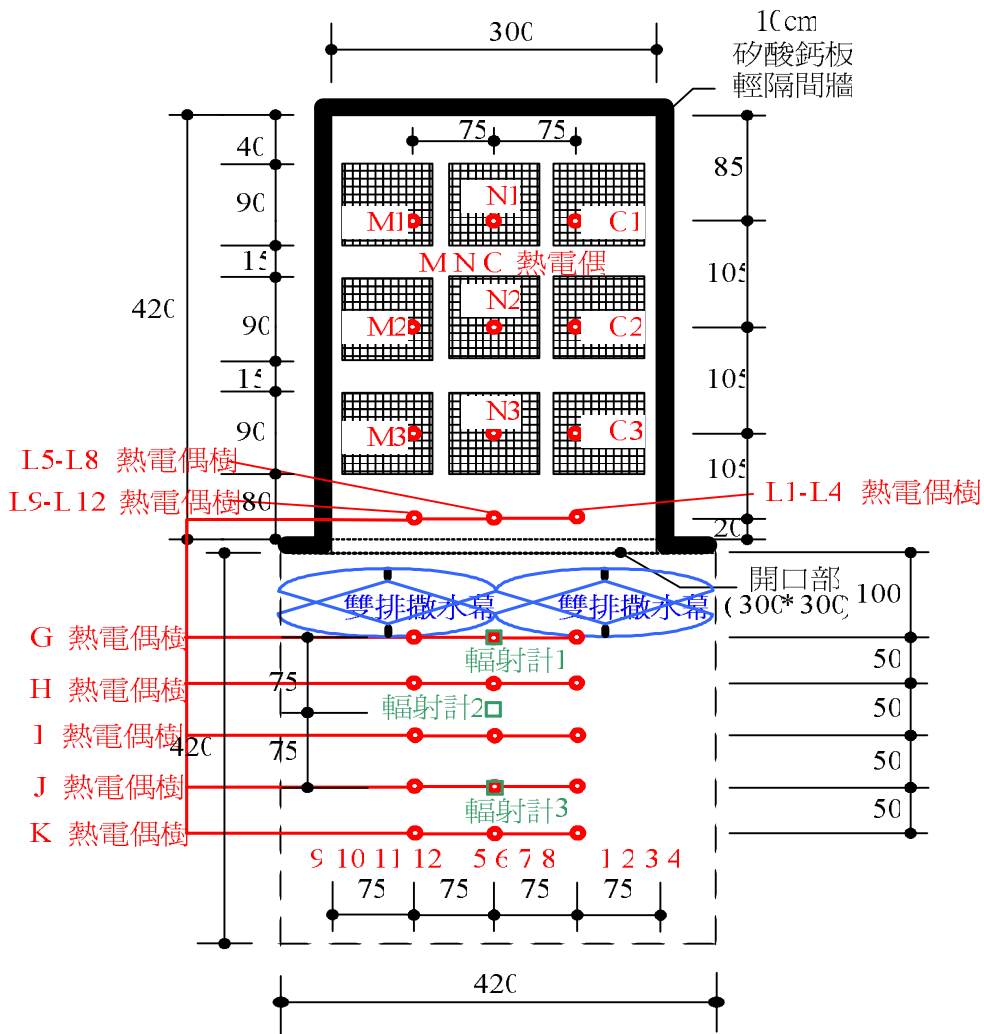
七、致謝

本研究感謝行政院國家科學委員會專題研究計畫NSC 94-2211-E-216-020在研究經費上的補助；ComputIT和Norwegian University of Science and Technology在模擬軟體的授權使用及展信科技、黎明技術學院在設備與技術上的協助，謹此誌謝。

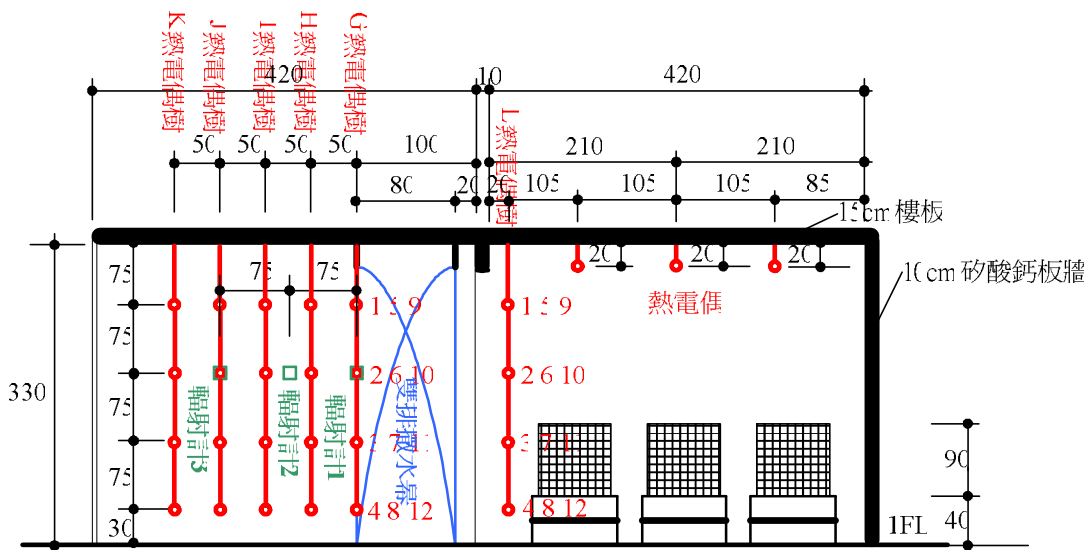
參考文獻

1. 蕭江碧、張俊哲，「建築技術規則防火安全有關規定增修訂之研究-第三章部分條文」，內政部建築研究所研究計畫成果報告，民國八十九年。
2. 何明錦、鄭紹材，「撒水幕防火設備評定基準之研究」，內政部建築研究所研究計畫成果報告，民國九十三年。
3. 簡賢文、高惠瑜、李婉菁，「Kameleon FireEx 之原理及應用」，消防與防災科技雜誌--透析大型空間火災安全防治，2005，P71~75。
4. 柯建明，2003，「大型車站建築之火災煙控系統設計與電腦模擬分析」，國立中山大學機械與機電工程研究所碩士論文。
5. Magnussen B.F et al.” Kameleon FireEX in Safety Application” ,Society of Petroleum Engineers, Norway, p26~p28, 2000.
6. Philip J. DiNunno, et al., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Engineering, USA, pp.3-68, 1995.
7. Bjørn F. Magnussen, Bård Grimsmo, Nils I. Lilleheie and Trond Evanger, ERA conference, Major Hazards Offshore and Onshore, London, UK, 2004.
8. 蘇鈺婷，以 KFX 模擬撒水幕系統隔熱性之研究，中華大學營建管理研究所碩士論文，2007。(學生畢業論文引用)

八、附件



附件圖 1 防止水平延燒試驗平面配置圖



附件圖 2 防止水平延燒試驗剖面圖

計畫成果自評

本研究原計畫為以電腦模擬軟體 FDS 模擬「撒水幕防火設備評定基準之研究」試驗之結果，因考慮撒水幕模擬之設定參數，改以電腦模擬軟體 KFX 取代 FDS 進行軟體之驗證，並針對「撒水幕防火設備評定基準之研究」中的水平延燒試驗部分進行模擬驗證之工作。

本研究以 KFX 模擬水平延燒有撒水試驗時間共進行 30 分鐘，在全尺寸試驗中的撒水幕能有效的降低火場的溫度，但本研究以 KFX 模擬出的結果是對於溫度之降低無太大影響，可能之原因應是受限於全尺寸試驗規格條件未能與電腦模擬環境之設定的需求充分調和，例如燃燒性狀與可燃性氣體通過水幕而在水幕外燃燒等因素。

本研究首先嘗試根據實驗結果得到的單堆木材之熱釋放率值，換算並套入 KFX 來進行固體火災如木材堆的模擬，並變化 spray 的幾何排列方式來模擬出最可能逼近撒水幕的水幕的效果之模擬。雖然本研究以 KFX 模擬出的結果與實際試驗之結果比較未臻滿意，但本研究的成果對電腦模擬軟體 KFX 日後針對固態火災與撒水幕的相關模擬研究，可作為重要之參考依據。