臺灣警察專科學校警專學報，民國 104.4
第六卷第一期：141-170 頁

夜店電腦火場重建模擬驗證分析之研究

Analyses of fire reconstruction using 3D animated simulation in a nightclub

邱晨瑋[1]

Chen-Wei Chiu

論文摘要

美國火災事故的調查方法[2]主要有重建事故現場和電腦模擬兩種主要的方式，本研究嘗試以 NFPA 921 對於火災與爆炸火災現場調查的主要目標為確認、鑑識及分析火災燃燒型態，據以判定起火點與起火原因並輔以 FDS 電腦驗證其判定的合理性；並以 2003 年美國羅德島夜店火災為案例並量測其火災參數如溫度、熱釋放率及氧濃度等分別與 FDS4 版及 FDS5 版作參數比對，除企圖以模擬方式重建火災並了解其延燒過程，並與可與火災調查人員現場採證判定的起火點及起火原因據以比對，作為其判定的輔助工具。結果發現 FDS5 版在溫度、熱釋放率及氧濃度模擬數值均與全尺寸實驗之夜店火災量測參數有不錯的近似。

關鍵字：夜店、火場重建、FDS、平行處理

Abstract

3D animation reconstructions of fire scenarios are essential for the development of fire simulation methodologies that can provide the basis for fire reconstructions for CFD researchers. However, 3D animation techniques using various fire parameters underlying fire physical equations are not intuitive enough to be readily mastered. This study adopted PyroSim, an interactive model combining FDS and Smokeview, especially for the purpose of using parallel processing approaches aimed at reducing the difficulty of establishing the model and also at reducing the possible errors in space establishment and border condition definitions.

1 台灣警察專科學校消防安全科副教授

2 National Fire Protection Association, NFPA 921: Guide for fire and explosion investigations, Orlando, Florida, USA (2010)

When comparing 3D animation simulation results with a full-scale nightclub fire construction experiment in USA, this study demonstrated substantial predictive powers for several curves and 3D animations of fire parameters, including temperature, heat release rate, flame height, smoke thickness/length, and oxygen concentration.

Consequently, this article not only provides applications for fire simulation in actual fire scene investigations, but also proposes an approach for interactive applications and real-time requests.

Keywords: Nightclub; Fire reconstructions; FDS; Parallel processing approaches

壹、前言

100 年 3 月 6 日凌晨 1 時 24 分台中市 ALA PUB（又名『傑克丹尼 PUB』）火災，造成 9 人（5 男 4 女）死亡、12 人受傷，突顯出夜店場所的防火安全問題，引起廣泛討論的議題包括違反建築法相關規定、實際營業項目與營利事業登記名目不符、天花板及牆壁使用大量隔音泡棉、逃生出入口不足、收容人數過多、使用明火表演問題、夾層違建、消防設備不足、防火組訓缺乏等；為防範類似事件，內政部隨即於 100 年 5 月 4 日修正發布消防法第十四條之一及第四十一條之一條文；並修正第十四條及第四十一條條文，增訂施放天燈及室內明火表演等易致火災之行為，非經許可不得為之。各縣市因應此重大災例，也相繼全面針對夜店場所展開公共安全稽查，以提早發現並改善相關危險因子，以提昇夜店場所安全。

國外類似火災案例彙整分析後發現造成大量傷亡的原因多為延遲發現火災、沒有緊急逃生計畫或缺乏避難逃生訓練、過度擁擠與單一出入口使逃生困難、建物裝潢易燃…等，下列探討娛樂場所文化帶來的潛在問題，並提出適當的改善建議。

（一）夜店利用燈光變化與音響製造娛樂氛圍，造成可視距離較短以及訊息無法即時傳達，導致初期應變緩慢。另外，逃生路線與逃生出口之標示需有更高的吸引度，當災害發生時，夜店音響應有緊急關閉設計及自動照明設備，提醒人員避難。

（二）夜店多為密閉空間，一旦發生火災，整個空間常被濃煙充斥，因此，整條正確的逃生路線都應設有明顯的發光指示，才能引導人員走向正確的逃生路線。

（三）夜店裝潢布置形成避難節點，使得避難人員滯留而延誤逃生，最終導致人

員踩踏事件發生。娛樂場所應以自身環境思考災害情境，就一切可能做好避難引導措施，或是在裝潢布置上避免產生避難節點。

（四）我國夜店場所的消防安全常見之隱憂包含容留人數管制，避難引導與違規營業等問題。為了解決上述問題，建議容留人數超過百人者，無論新設或既有夜店，都應裝設自動灑水設備，以減緩火災蔓延的速度，爭取逃生的時間。此外，夜店管理者應定時檢查出入口，確保避難疏散動線暢通無阻，應以提供安全的娛樂場所為目的，評估逃生出口之位置、寬度及數量等，作為容留人數之依據(如：主要出入口須能疏散最大收容人數 2/3 流量，其他出入口合計可負擔最大收容人數的一半)。

2003 年位在美國羅德島州西渥威克市的考威塞特大道 211 號[3]所在的 The Station nightclub 發生大火，為了更了解整體夜店火災歷程，美國 NIST(National Institute of Standard and Technology)，以此區域重建一個大小及內裝完全一樣的房間，企圖重現 The Station nightclub 火場過程並提出全尺寸實驗報告，本研究即以此為案例，運用火災模擬工具與該夜店全尺寸火災實驗進行比對分析，進而提出改善策略。

參酌美國火災事故的調查方法主要有重建事故現場和電腦模擬兩種主要的方式，本研究嘗試以 NFPA 921 對於火災與爆炸火災現場調查的主要目標為確認、鑑識及分析火災燃燒型態及痕跡，據以判定起火點與起火原因並輔以 FDS 電腦驗證其判定的合理性；並以美國某知名夜店火災為案例並量測其火災參數如溫度、熱釋放率及氧濃度等分別與 FDS4 版及 FDS5 版作參數比對，除企圖以模擬方式重建火災並了解其延燒過程，並與可與火災調查人員現場採證判定的起火點及起火原因據以比對，作為其判定的輔助工具。結果發現 FDS5 版在溫度、熱釋放率及氧濃度模擬數值均與全尺寸實驗之夜店火災量測參數有不錯的近似。

貳、驗證環境說明

本研究所使用技術，主要為驗證所選用之簡易公式的可行性及符合驗證誤差範圍內的要求，因此公式的邏輯性驗證為本研究主要目標[4]。

本報告所採用之軟硬體環境，包括下列項目：

1.作業系統：Microsoft Windows 7 32Bit

[3] Grosshandler W., Bryner N., Madrzykowski D. and Kuntz K., Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire: Appendices, National Institute of Standards and Technology NCST Act Report (NCSTAR) 2: Vol. I, Gaithersburg, Maryland, USA (2005)

[4] Yang P.Z., Tan X., Sun H.C., Chen D.H. and Li C., Fire accident reconstruction based on LES field model by using orthogonal experimental design method, Adv. Eng. Softw., 42(11), 954–962 (2011)

2.系統整合開發平台：Microsoft Visual Studio 2010 Express
3.平台開發語言：ANSI C/C++
4.平台呈象工具：OpenGL 4.2, DirectX 9 或以上
5.中央處理器 (CPU)：Intel Pentium 4 以上，建議 Core 2 為佳
6.系統記憶體 (RAM)：1GB 以上，建議 2GB 為佳
7.硬碟空間：3GB 剩餘空間，建議 4GB 為佳

一、FDS 介紹

FDS[5]模擬軟體是由美國NIST(National Institute of Standards and Technology)所研發，是一套計算流體力學(CFD Computational Fluid Dynamics)軟體，軟體的核心是Navier-Stokes方程組，用於解析熱驅動的低速流場，著重在煙流及熱傳遞的現象，同時也可模擬撒水頭作動，計算撒水後火場的變化，目前已成為分析火災現象之最主要軟體，也有學者利用FDS進行火場重建，由FDS的模擬重建火場推估火災成長的方式。

（一）FDS 使用上注意事項

1.無論那種軟體，使用上必有其適用場合與使用上特有之限制，使用者使用前應充份了解軟體之使用上限制與功能，因此熟讀軟體之說明書與其技術手冊成為操作前必要之工作。
2.火災是一複雜之燃燒過程，基本上應無法精確地模擬，加上程式本身設計上一些不確定因素因此在操作上及判讀上需要豐富火災燃燒工學上之知識。
3.程式本身無法判定輸入資料之正確與否，因此使用者對輸入之任何邊界條件應有判斷與比對求證之必要，否則輸入一堆不正確之資料，所得結果也必將無法使用。
4.FDS 大都是依小型的火場實驗數據發展完成，因此對於相對大型的火災誤差可能較大。
5.FDS 的一般火場模擬在速度及溫度場準確度約在 80~90%。
6.FDS 的撒水作用大都在冷卻作用，較無能力將火源抑制，因此撒水後火場溫度會降低，但不會改變火源大小。
7.數值網格(Computational Grid)之大小形狀對計算結果會造嚴重之差異性，基本上以正方形之網格最為適當，網格劃分愈細者其結果較大網格者理想，但所花費之計算時間及結果所佔之記憶體也就愈大。

[5] Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's guide, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6784, Gaithersburg, MD, USA (2010).

8.低馬赫數(Low Mach number），忽略聲波音波效應，故無法模擬爆炸現象。

9.FDS 程式關於火災燃燒現象可分為油盤模式及延燒模式，但 NIST 不建議使用延燒模式。

（二）FDS 的架構與功能

FDS為一動態火場氣流體流動計算軟體（CFD；Computational Fluid Dynamic)，使用DNS及LES方程式，將模擬範圍切割成若干正立方體之數值網格(Computational Grid)，所有之計算必須在此諸格點完成，因此格點劃分的愈細計算上也愈煩複所須之時間愈久，但結果會較為合理精確，計算完成後透過Smokeview瀏覽軟體，將空間狀況與模擬結果以實體比例輸出至螢幕上，以方便使用者可以清楚地從螢幕上了解整個火災發展之過程，如圖2-1所示：

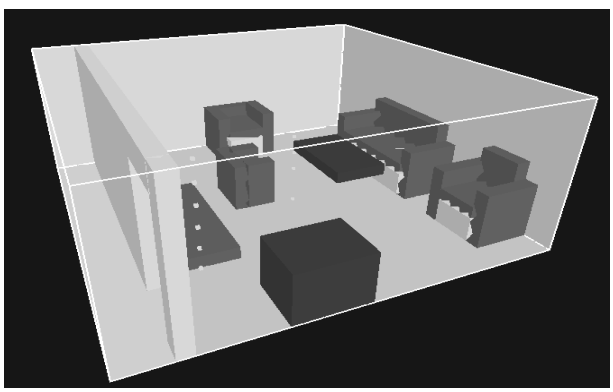


圖 2-1 SmokeView 畫面（資料來源:同註 2）

此軟體可應用於建築物室內火災、室外火災、流體流動及熱力學上熱傳之計算。軟體架構如圖2-2所示：

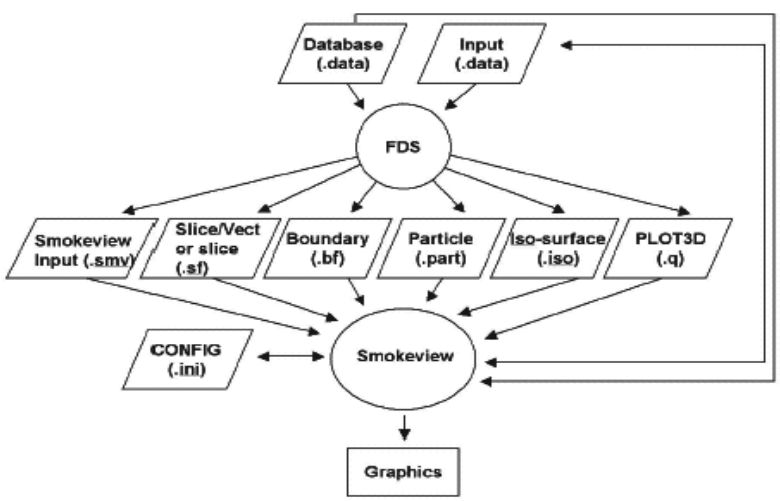


圖 2-2 FDS 運算架構圖(資料來源:同註 4)

（三）FDS 模擬內容設定與一般程序：

一般進行FDS軟體運算上之主要操作內容及設定程序如下(資料來源:同註4)：

1.蒐集相關資料：建築物平面圖、內部空間區劃與開口通道、消防設備使用狀況、可燃物之擺設及其可燃物燃燒特性參數等。

2.決定模擬方式：整棟模擬、樓層模擬、區劃空間模擬、管道模擬、戶外燃燒模擬或其他應用模擬 。

3.設定模擬範圍大小(Computational Domain)

4.決定格點大小(Grid、Multi-block geometry)

5.模擬時間(Time Limits)

6.設定火災境況及決定起火源大小位置(Design Fire & Fire Scenario)

7.設定燃燒反應參數與材料邊界條件(Combustion Parameters & Boundary Condition)

8.實物輸入(Creating Obstructions)

9.VENT & SURFACE

10.輸入撒水設備或探測器(Sprinkler & Detector)

11.決定輸出內容(Output Files：THCP、SCLF、BNDF、ISOF、PL3D)

12.執行電腦運算(fds<*.data)

13.結果分析與判斷(SMOKEVIEW)

（四）3D 火煙結合 FDS 運算

1.輕量化求解法流程：(如圖 2-3)

(1)每一時間的溫度場，是由上一時間的溫度場及流場合併計算求得。

(2)每一時間的流場是由上一時間的流場求得。

(3)每一時間的煙濃度場是由上一時間的煙濃度場及流場合併計算求得。

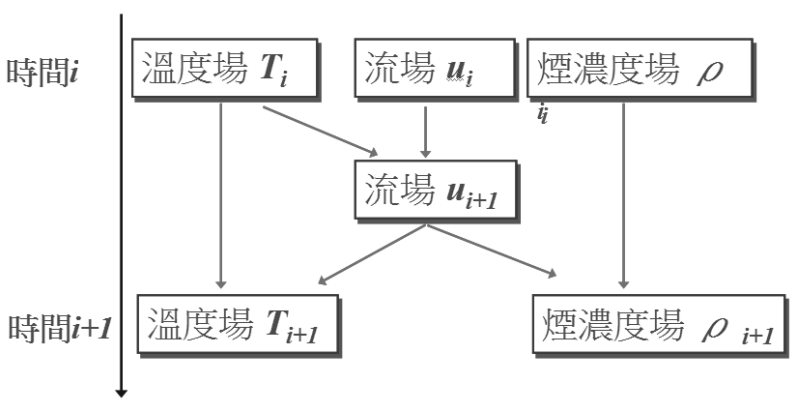


圖 1-3 3D 火煙運算運算架構圖

2.流場方程式求解步驟：

(1)For each time step i+1

(2)計算力場速率 f

(3)計算擴散速率

(4)應用非確定法則積分求解

(5)3 Poisson’s Equation 求解

(6)能量守恆修正調整 Poisson’s Equation

(7)計算平流速率

(8)能量守恆修正調整 Poisson’s Equation

3.溫度場方程式求解步驟：

(1)For each time step i+1

(2)計算熱源 S_T 的溫度

(3)計算溫度的擴散率

(4)計算溫度平流速率，需要求解 Poisson’s Equation

4.煙濃度場方程式求解步驟：

(1)For each time step i+1

(2)計算熱源 S_T 的煙密度

(3)計算溫度的擴散率

(4)計算溫度平流速率，需要求解 Poisson’s Equation

5.空間離散化步驟：

(1)採用規則格網（Regular Mesh）

(2)採用中點格網離散化（Collocated Discretization）

(3)各格點場值位於格點中央

(4)不採用交錯格網（Staggered Grid）

二、PyroSim 介紹

PyroSim是一個互動式模型建立軟體作為火災動力學計算軟體（FDS）之前端設計。此套件模軟體提供即時的回饋並確保輸入FDS之文件格式正確。建模時可以任意切換公制單位模式或英制單位模式[6]。PyroSim提供二維和三維幾何創建功能，並可使用旋轉、複製、移動等等功能簡化空間建立之程序。現代建築外觀的多樣化及量體的大型化增加了分析者建立模型之難度，為了能有效提高分析者運用FDS之效率，使用可視化之建模軟體創建空間之模型並設定空間之邊界條件，除了可

[6] Stam, J. (2000). "Interacting with smoke and fire in real time", Communications of the ACM, 43(7), pp. 76-83.

降低建模之困難度，亦可減少分析者在空間建立及邊界條件設定發生錯誤之可能，或是在第一時間即可進行修正。

以下介紹建模之步驟順序

（一）建立幾何外觀(Obstruction)

在PyroSim繪圖的介面中，可透過直接建立3D模型或是透過2D分別繪製各樓層空間幾何，在2D的建構模式中，可匯入建築平面圖做為考，可支援之檔案格式如bmp, dxf, gif, jpg, png, tga, 及tif，複雜之建築空間以2D方式進行較為快速[7]。

（二）表面性質設定(Surface)

此步驟用於定義固體(solid)以及通風口(vent)之性質，在此，固體表面可定義熱傳導、或是燃燒性質；通風口則可定義風速或溫度等性質。

（三）消防排煙設備設置(Devices)

建模過程中可依建築設計建立撒水設備、火警探測器以及機械排煙設備，前兩項均屬設備(device)之設定，而機械排煙設備則以通風口(vent)進行設定，其中火警探測器目前具有連動其他設備之功能，此功能亦大為提升模擬之真實度。

（四）量測點設置(Devices)

運用FDS計算之前，分析者須先由建築模型判斷模擬空間內何處具有重要之分析結果，如CO、溫度、能見度、熱輻射及速度場等，由事前之規劃，模型建立時即進行量測點設置，量測點對於不同之量測對象可分氣體及固體之量測點(gas phase and solid phase device)，在量測點設置處可獲得對應時間之量化數據。

（五）初始條件設定

模型空間內之初始環境條件亦可在PyroSim平台設定，初始條件一般以設定環境溫度為主。

（六）邊界條件設定

模型之邊界條件設定即為重要，在建築空間開口部以及外氣是否有速度場之存在均應詳細考慮以進行設定，對於與外氣連通或是自然風影響均可透過通風口(vent)進行設定。

（七）網格劃分(Meshes)

透過Meshes可將所建之模型劃分網格，就網格大小可分為單一網格

[7] Min K. and Metaxas D., A combustion–based technique for fire animation and visualization, Visual Comput., 23, 679–687 (2007)

(Uniform Meshes)及非單一網格(Nonuniform Meshes)，在較為龐大之模型內使用單一網格易造成網格數過多導致運算時間過長或是無法分析之情形，當網格數目過多但放大網格大小又會導致計算結果誤差過大之情況下，建議使用非單一網格，將模型切割為多個空間，在各空間以不同大小之網格進行劃分，一般以火源附近區域使用最小之網格，而向外區域則可略為放大。不論是以單一網格或是非單一網格進行網格劃分時，分析者均應進行網格測試，以找尋合理之網格大小[8]。

（八）計算條件設定(Simulation parameter)

在此可設定模型運用FDS計算之時間及求解方法，運算時間以秒為單位，而求解方法可選擇Large Dddy(LDS)或是Direct Numerical(DNS)。

三、火場模擬之平行運算策略

平行運算策略的規劃，必須從硬體、軟體、運算演算法特性等多個層面，考慮各個層面的平行化可行性與各層面之間的配合關係。不同的硬體架構，網路串接方法，軟體工具，與不同的運算問題，所適用的平行運算策略可能完全不同。

在本案中，採用的硬體可說是已經網羅了目前平行運算領域中，所有主要的運算架構形式。本案硬體包括五個層面[9]：

（一）多台運算主機以高速網路連接(如圖 2-1)，

（二）每台運算主機含有兩個 CPU 與兩個 GPGPU 運算卡(如圖 2-2)，

（三）每個 CPU 含有六個可執行不同低階指令的核心，

（四）每個 GPGPU 運算卡含有 16 個核心群(註: 實際上因散熱等硬體因素，同時最多只會使用其中的 14 個)，但它們與 CPU 無法共同記憶空間，

（五）每個 GPGPU 核心群含有 32 個核心，而它們共同一個很小但相當高速的記憶空間，但每個核心必須執行相同的低階指令(一般稱 SIMD 架構)。

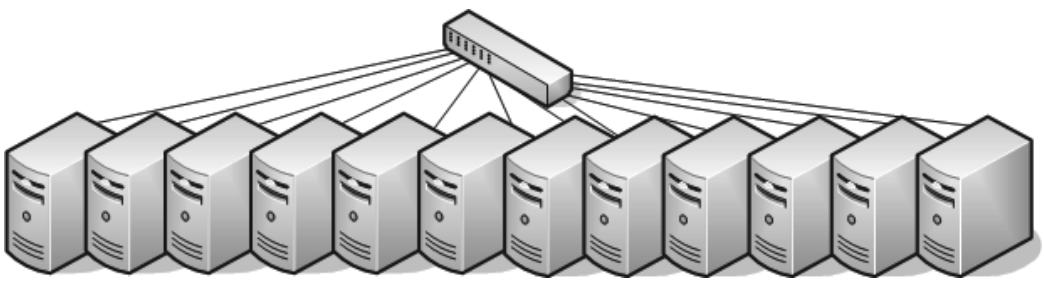


圖 2-2 多台運算主機以高速網路連接之平行架構(資料來源:同註 8)

[8] Lever J. and Komura T., Real–time controllable fire using textured forces, Visual Comput., 28(9), 691–700 (2012)
[9] Hong Y., Zhu D.M., Qiu X. and Wang Z., Geometry–based control of fire simulation, Visual Comput., 26(9), 1217–1228 (2010)

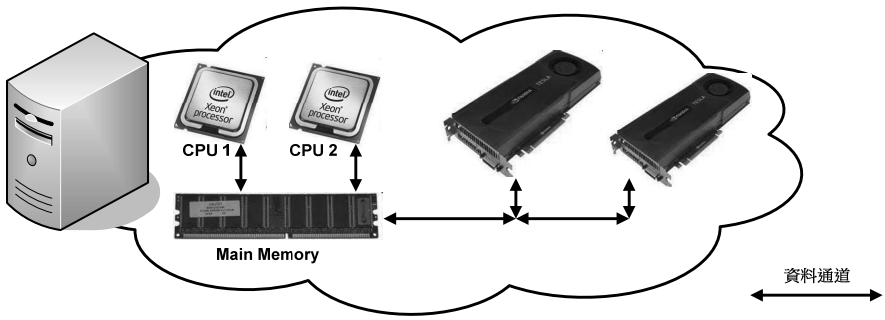


圖 2-2 運算主機含有兩個 CPU 與兩個 GPGPU 運算卡之平行架構(資料來源:同註 8)

本案平行運算架構與演算法將從八個層面分別設計和探討。這八個層面分別是：(1)硬體層，(2)軟體層，(3)物理空間層，(4)數值網格層，(5)方程組求解層，(6)程式迴圈層，(7)程式迴圈核心群組層，與(8) 程式迴圈核心層。

在平行化過程，本案將維持第一階段火煙驗證運算程式之「核心程式碼」。「核心程式碼」為本案最基本的運算數理邏輯。平行化過程將產生兩個主要版本，暫稱為「平行化慢版」與「平行化快版」。「平行化慢版」完整保留所有「核心程式碼」，唯將這些「核心程式碼」作必要的平行化外框。例如依據 CUDA 語法[10]，基本迴圈的頭與尾將會被刪除，取代以 CUDA 的執行緒指令，並將迴圈內的「核心程式碼」包裝為 CUDA 核心模擬。本案「平行化慢版」仍會維持「圈內的核心程式碼不會被改變」的原則。此外，本案除了採用 CUDA 語法之外，還會採用 OpenMP(共享記憶體平行運算語法)與 MPI(分散式平行運算語法)，而「核心程式碼不會被改變」的原則仍將維持，並維持第一階段火煙驗證運算程式的運算分析結果[11]。「平行化快版」則是依據「平行化慢版」，再針對本案硬體環境(主機數量、核心數量、網路特性等環境因素)進行效能優化。以目前採購設備的規格計算，火煙運算物理引擎 (FireSim) 經平行化後可以同步計算的最大面積範圍為 240,000 × (100 / 800) = 30,000 (m^3)。

參、火災調查與重建事故

一、火災調查程序

NFPA921 為美國防火協會(NFPA,National Fire Protection Association)訂定的標準，稱為火災及爆炸調查指引(Guide for Fire and Explosion Investigations)，其主要目的為協助負責調查火災或爆炸現場的人，調查起火

10 Shen T.S., Hsiang H.Y. and Wen C.S., Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene, Build Environ., 43(6), 1036–1045 (2008)
11 Yang P.Z., Tan X. and Xin W., Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident, Build Environ., 46(7), 1445–1459 (2011)

點、起火原因、責任歸屬或預防此類災害再度發生。建立指導方針和建議、系統化的調查和分析，調查結果與 NFPA 921 指引不符合不一定錯，但必須經由現場之證據證明其調查結果(同註 1)。NFPA921 初版於 1992 年 1 月 17 日發行，1995 發行第 2 版，平均每 3 年發行最新修訂版本，第 6 版於 2007 年 12 月 31 日提出，並於 2008 年印行，NFPA 於每一版本中增加新的資料，並修正有疑慮的內容。其內容除應用於火災調查領域外，並可做為 NFPA 1033 的要求的標準，自 2000 年以後更是出庭做證時必備的聖經，由此可見 NFPA 921 對於火災與爆炸簡稱為 ILA，ILA 主要設計之目的為加強火災調查人員於有促燃劑之火災現場中，正確發現促燃劑殘跡位置之能力。NFPA 921 對於火災與爆炸火災現場調查的主要目標為確認、鑑識及分析火災燃燒型態及痕跡，要能成功的辨識是否為縱火必須從能辨認可能為縱火之燃燒型態開始，正確研判起火點、正確的採證步驟、妥適的前處理方法、才能獲得正確的鑑定結果做為縱火案件之有力證據調查工作的重要性。

二、重建事故現場和電腦模擬

目前，美國火災事故的調查方法主要有重建事故現場和電腦模擬兩種主要的方式。使用事故現場重建的方法能提供最可靠的火災數據，火災現場調查人員扮演兩個基本的角色：

（一）決定起火點在哪裡；

（二）詳細檢視起火點或其周遭，並推測及判斷火災發生的原因。

然而，這類方法受到經濟,環境等各方面的限制。由於火災的不可控性，有時需要重複多次試驗才可能得到可靠的結果。尤其對重大火災，比如化工廠火災或者高層建築火災，考慮到經濟損失和對環境的影響，重建事故現場就變得不可行。相較予事故重建的方法，使用電腦模擬有花費小，可控性強，環境影響小等優勢。但是，使用電腦模擬確受到火災模型可靠性的制約。因此，改善和提高火災模型的準確性對電腦模擬在火災事故調查中的使用有著相當重要的意義。計算流體力學程式軟體FDS(Fire Dynamics Simulator)，現已由美國國家標準與科技研究所(National Institute of Standards and Technology；NIST)，至今已發表至第五版。FDS予美國除予一般防火設計會要求需檢附性能式設計(Fire Performance-Based Design NIST)的驗證外，主要成功的運用FDS輔助火災原因的調查分析，例如對美國911世貿大廈火災(2001)，美國羅得島車站夜總會火災(Rhode Island，2003)，美國芝加哥政府辦公大樓火災(2003)等重大事故進行研究。

針對假設各種可能性的火災起火源，運用FDS探討

（一）火災分析模式
（二）起火擴大因素分析
（三）延燒擴大因素分析。

『火災分析模式』[12]針對建築火災發生時，人與火的關係分別以:
（一）火災成長模式(Fire Growth Model)；
（二）火災防禦模式(Fire Protection Model)；
（三）煙之擴散模式(Smoke Spread Model)等加以描述。

並擬針對火場，選取代表性的火災事故，使用FDS對其進行模擬研究，最終目標在於建立FDS模擬火災事故原因的標準作業流程(SOP)草案(同註8)，包含下列內容：
（一）現場調查內容：建築物結構尺寸，內部裝修材料，消防設施情況
（二）分析可能事故原因：可能的著火源以及周邊的可燃性物品的位置。
（三）根據調研結果建立數值模型；確定模擬的場景。
（四）對數值模擬結果進行分析，對比實際火災的損失情況或者小尺度實驗結果來確定火災的真實原因。
（五）優化建築設計方案，重新運新數值模擬來驗證新方案的效果

本驗證報告所選擇的火災場所為 2003 年大火所在的 The Station nightclub，當時位在美國羅德島州西渥威克市的考威塞特大道 211 號。夜總會建築物的前方為可容納 100 台以上車輛的停車場，停車場主要入口在考威塞特大道上，停車場及建築物的側方緊貼著庫勒斯路。夜總會建物本身為一層樓高的木造建築物，內部面積約 412 平方公尺，在主吧台下方有一個小空間的地下室。圖 3.1 為該夜店之實際前視圖。



圖 3.1 夜店之實際前視圖(同註 2)

12 Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design, Review Draft, SFPE(Society of Protection Engineers), p10-11, October, 2007.

三、空間場景描述

主要模擬的空間場景包括舞台區、跳舞區、廚房、吧檯，以及四個出入口，另外還有起火點的位置等，相關位置如圖3.2所示。 火災的起火點是因舞台區在表演過程中施放煙火(如圖3.3)，不慎引燃鋪設在舞台兩側的隔音泡棉，不到一分鐘的時間，火勢延燒迅速，進而造成不可挽回的大火。隨著火勢的成長延燒以及人員的逃生避難，各出口會依不同時間而開啟，而各開口即為火場的補氣口位置。

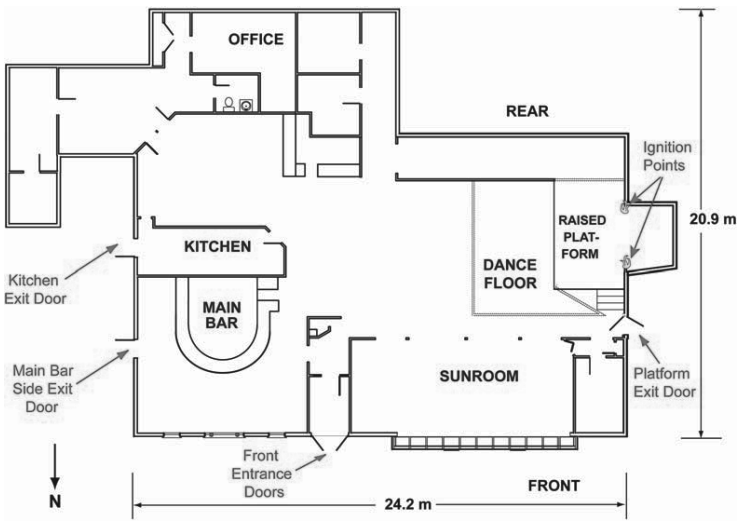


圖 3.2 空間場景示意圖(同註 2)

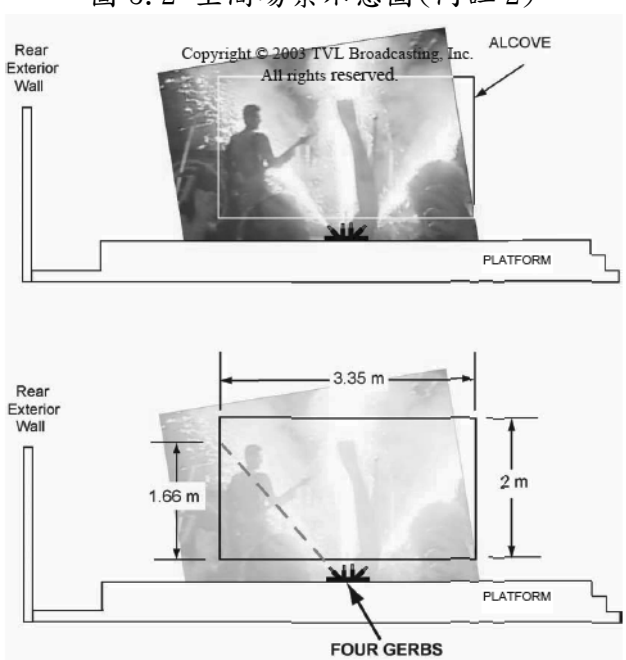


圖 3.3 煙火引燃的高度點(同註 2)

四、室內裝修材質描述

室內的裝修材質主要有泡棉、板材和地毯，其相關分佈如下列所敘：在舞台區和跳舞區的牆壁裝潢，採用的材質為泡棉；另外在室內空間中用來隔間等壁面，則使用板材的部份來做為相關壁面的材質，如圖3.4所示；而舞台區的地面上則是使用地毯。

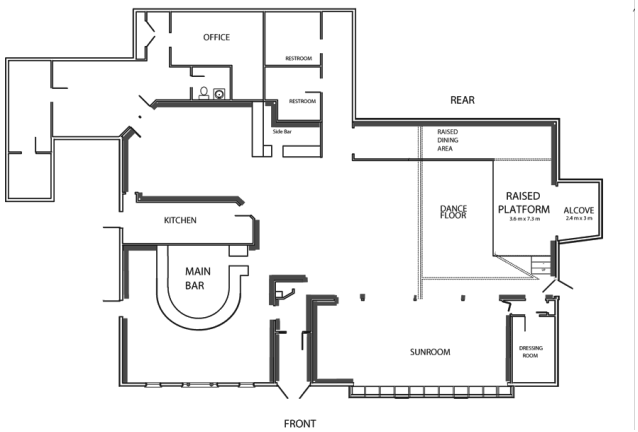


圖 3.4 板材分佈圖(同註 2)

五、驗證環境介紹

本研究主要驗證的環境為夜店模擬結果之比對，內部舞台區以及各材質設定的位置如圖3.5所示;另外，隨著火災的成長以及人員的逃生避難，火場會產生開口來做為補氣口，其中表一為各開口在火災過程中分別開啟的時間，其相關位置圖如圖3.6所示[13]。

表3.1 各開口開啟時間表(同註12)

開啟門的位置	開啟時間(秒)
舞台側門	29
正門	30
吧檯側門	45
廚房側門	60
前側隔間窗戶(低)	78
前側窗戶	80
左邊前側隔間窗戶	100
三個隔間窗戶	110、120、130

13 Grosshandler W., Bryner N., Madrzykowski D. and Kuntz K., Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire, National Institute of Standards and Technology NCST Act Report (NCSTAR) 2: Vol. II, Gaithersburg, Maryland, USA (2005)

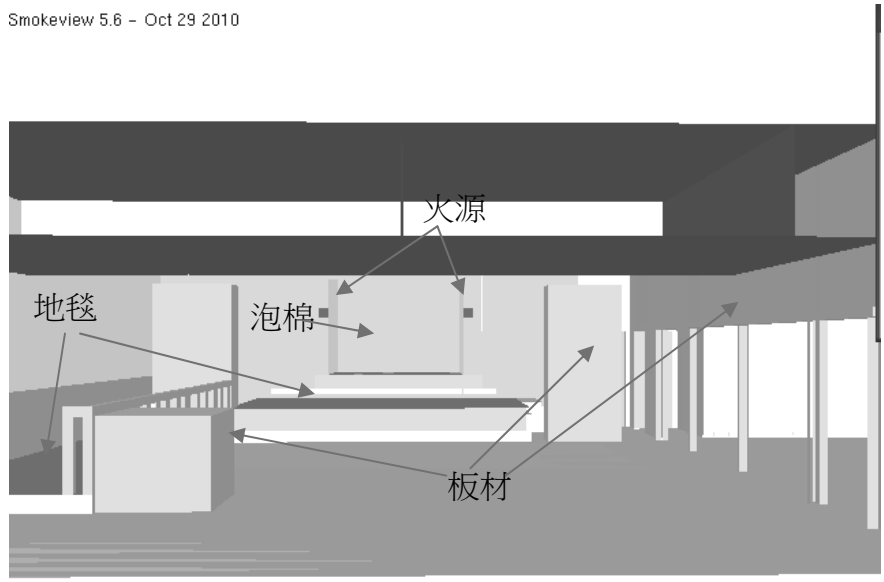


圖 3.5 模擬空間之舞台區(同註 12)

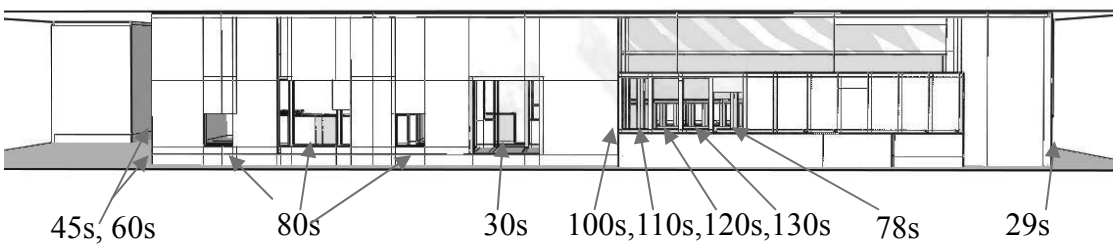


圖 3.6 各開口開啟時間示意圖(同註 12)

肆、夜店火場之模擬驗證結果分析

一、FDS 火場驗證比對

本研究所採用FDS5.5.3模擬成果來進行與實際火場及FDS 4.0[14]模擬進行三方面的比對。

（一）驗證基準

以文獻夜店之模擬結果作為驗證基準，主要是以熱釋放率曲線以及高度1.5m的溫度和氧濃度圖來做為本模擬情境之驗證基準。

（二）熱釋放率

圖4.1為FDS5.5.3與FDS4.0所跑出來的熱釋放率曲線的比較圖，可以發現到在初期的成長曲線呈現一致性，約75秒以後FDS5.5.3的熱釋放率曲線快速成

14 Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's guide, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6784, Gaithersburg, MD, USA (2007)

長，主要是因為5版的延燒較為快速，因此在75秒後較快速的延燒使得延燒面積較大所產生出來的熱釋放率也就較大。

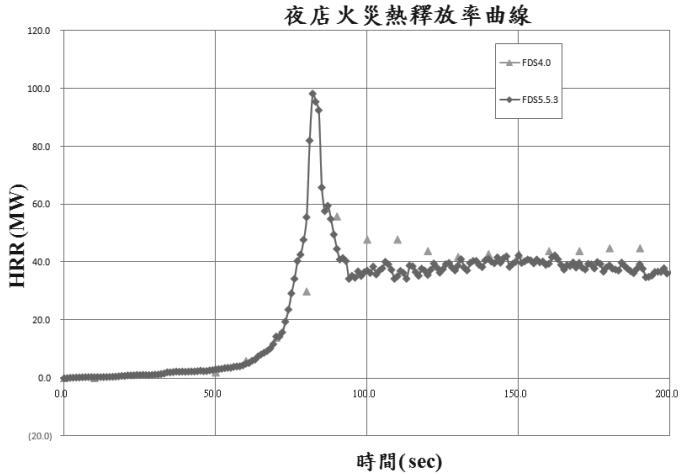


圖 4.1 熱釋放率比較圖(本研究自製)

（三）溫度

1.溫度動畫圖

圖4.2為高度1.5m的溫度圖，從溫度圖上可發現85秒以前主要的燃燒區域為舞台區，在85秒過後火勢已經逐漸往外移，之後由於舞台區已經燒毀，該區域的溫度就從1000度慢慢降至900度，其熱釋放率曲線也開始往下降，主要是因為舞台區泡棉和地毯是產生高燃燒熱物值。

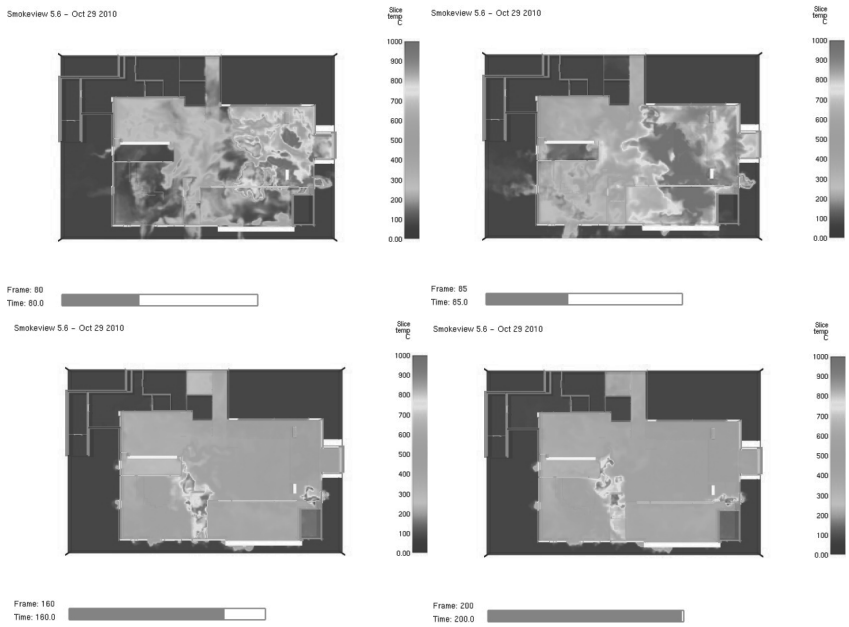


圖 4.2 距地板上方 1.5m 溫度圖(80 秒~200 秒)(本研究自製)

通過比對FDS模型及程式運算兩者的差異，以The Station Nightclub場景的Location C及Location D兩偵測點的溫度來作比對，偵測點離地高度皆為1.4公尺，得到以下兩種溫度曲線(如圖4-3,4-4)。

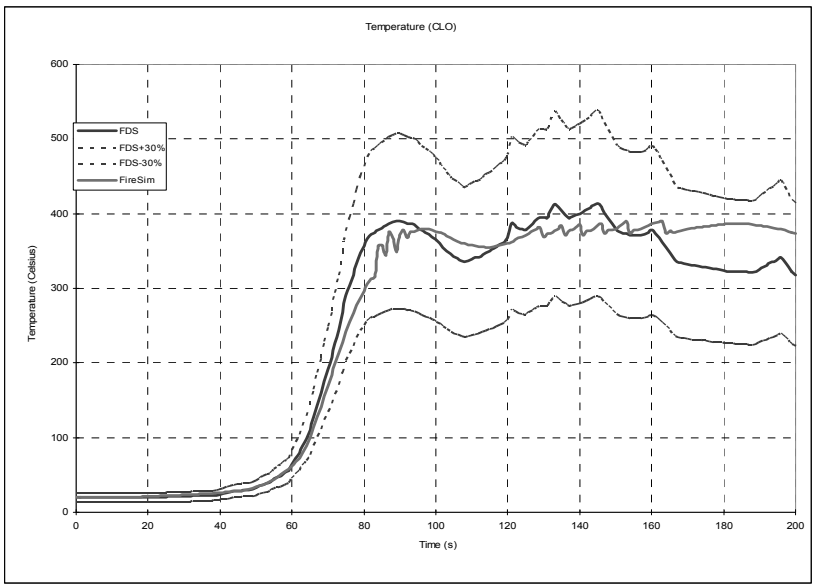


圖 4-3 點位 Station C 的溫度曲線比較圖(本研究自製)

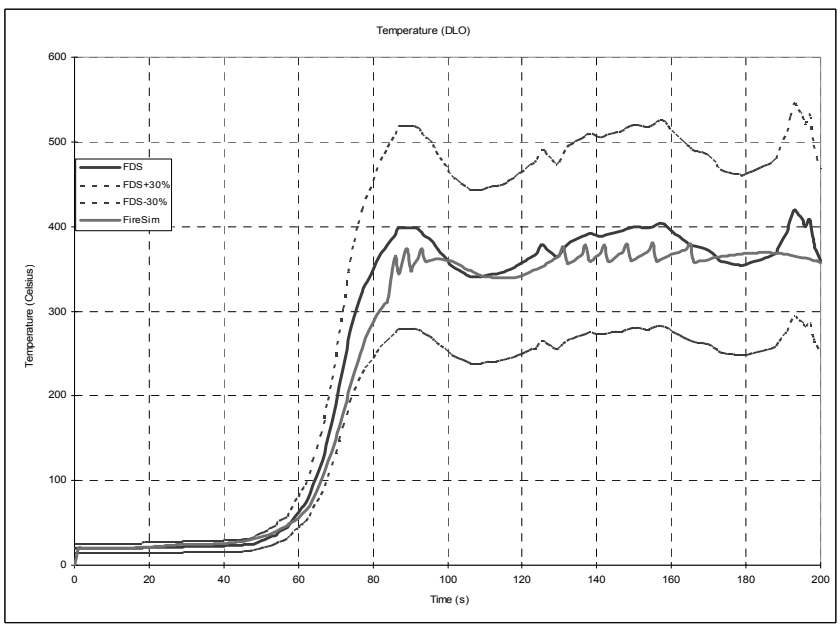


圖 4-4 點位 Station D 的溫度曲線比較圖(本研究自製)

（四）氧濃度圖

圖4.5為氧濃度圖，氧濃度會隨著延燒的範圍變大，則低濃度的範圍也就愈大，主要是燃燒的時候會耗氧，從溫度圖來做比對，當最高溫度往外擴散的同

時，低氧區亦跟著往外擴散，而由於舞台區因為快速延燒，亦可發現火勢降低時，該區域氧濃度也稍為向上提升。

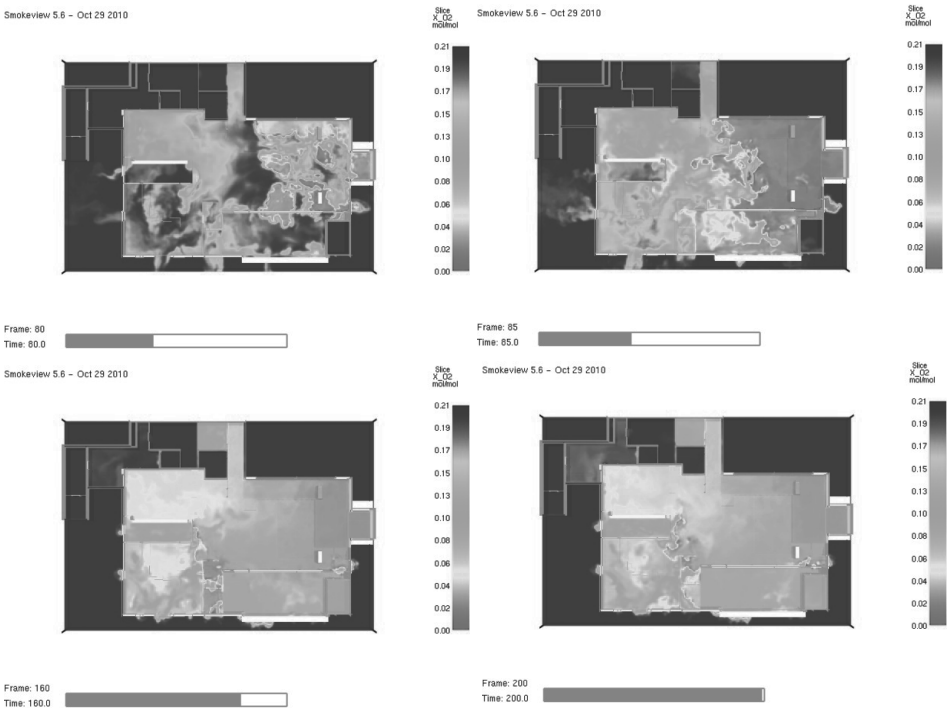
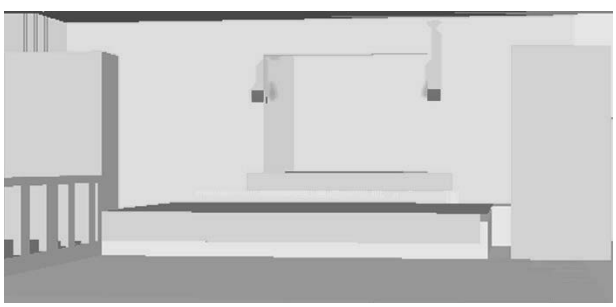


圖 4.5 距地板上方 1.5m 氧濃度圖(80 秒~200 秒)（本研究自製）

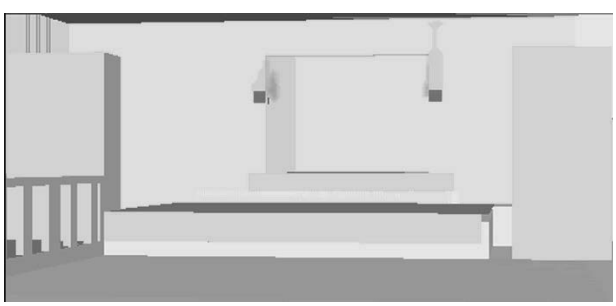
（五）其他相關比對圖

1.FDS 3D 火煙模型示意圖(如圖 4.6A-I)

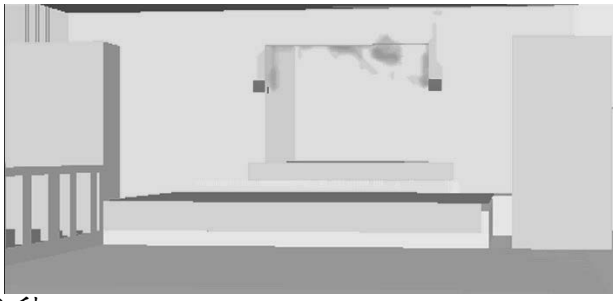
(1)燃燒後 10 秒



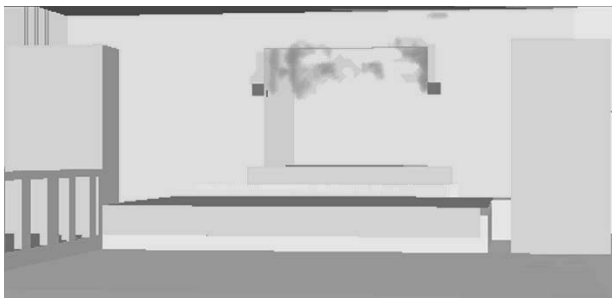
(2)燃燒後 20 秒



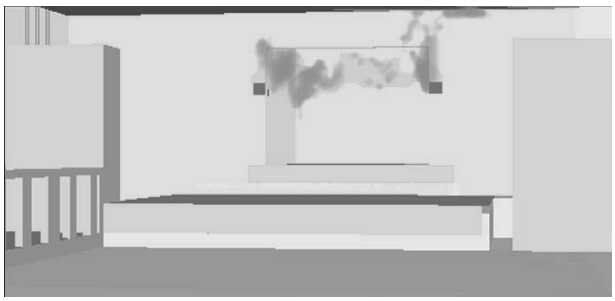
(3)燃燒後 30 秒



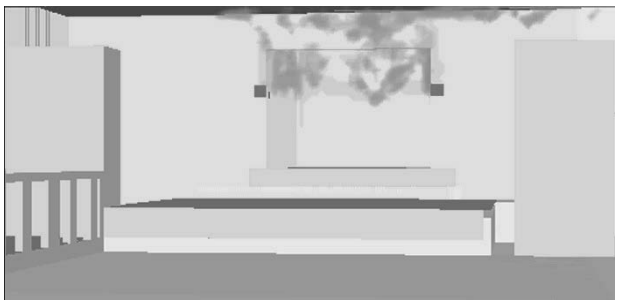
(4)燃燒後 40 秒



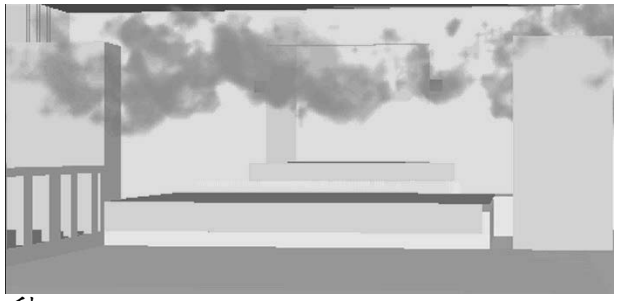
(5)燃燒後 50 秒



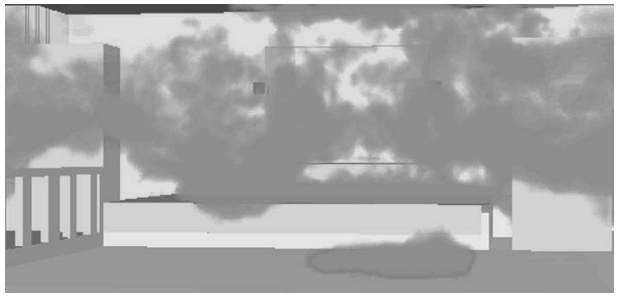
(6)燃燒後 60 秒



(7)燃燒後 70 秒



(8)燃燒後 80 秒



(9)燃燒後 90 秒

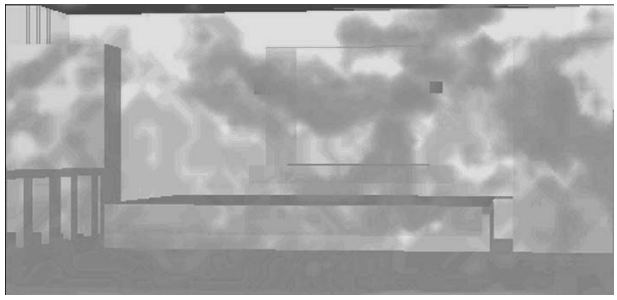


圖4.6 A-I FDS 3D火煙模型

2.FDS 4 與 FDS 5 動畫圖比較

圖4.7--圖4.9為其它時間不同區域的對照圖，可發現到FDS5板產生的火和煙都較為快速，與實際照片也較吻合。

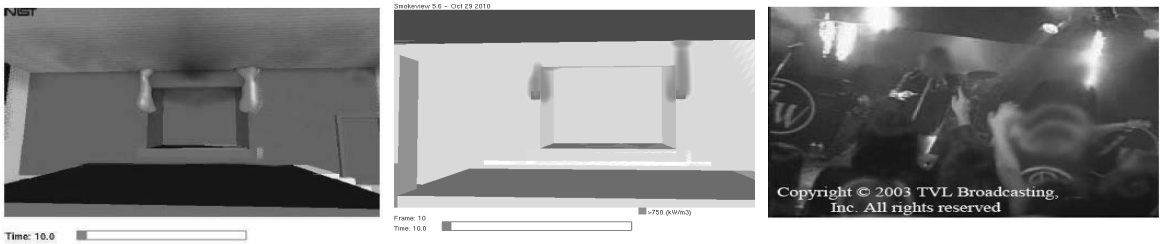


圖 4.7 火災發生 10 秒比對圖



圖 4.8 火災發生 60 秒比對圖

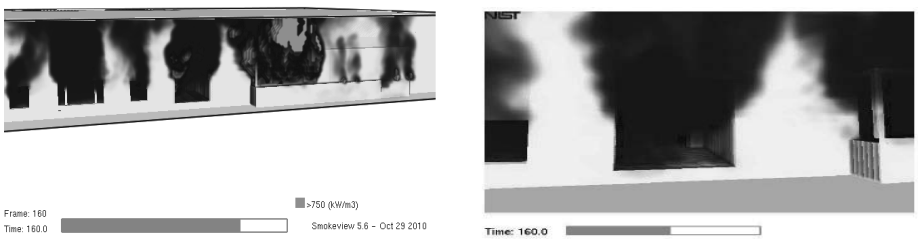


圖 4.9 火災發生 160 秒比對圖(本研究自製)

二、FireSim 驗證比對

（一）溫度計算式

1.曲線整體趨勢與基準相符，代表程式撰寫方向未偏離實際值。

2.Station C 與 Station D 偵測點於 80~90 秒間，因地板瞬間燃燒的關係，造成溫度跌宕之情形。

3.溫度曲線的驗證數據誤差值皆落在 30%內。

4.溫度曲線比對比照表(4-1)：

表 4-1 溫度曲線比對比照表[15]

比對項目	FDS	FireSim
使用公式	$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot\rho u=0$ $\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{2}\nabla\lvert u\rvert^2-u\times\omega\right)+\nabla p-\rho g=\nabla\cdot\sigma$ $\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\cdot\nabla T\right)-\frac{dp_0}{dt}=q+\nabla\cdot k\nabla T$ $p_0(t)=\rho RT$	$\frac{\partial u}{\partial t}=-(u\cdot\nabla)u+\nu\nabla^2u+f$ $u=u_{sol}+u_{irrot}=u_{sol}+\nabla\phi$
產出方式	NIST 公告數值	產出為文字檔

（二）溫度曲線

通過比對FDS模型及程式運算兩者的差異，以The Station Nightclub場景

15 Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 403 Poyntz Ave, Suite B, Manhattan, Kansas, USA, http://www.thunderheadeng.com/Pyrosim (2012)

的Location C及Location D兩偵測點的溫度來作比對，偵測點離地高度皆為1.4公尺，得到以下兩種溫度曲線(如圖4-9至圖 4-10)。

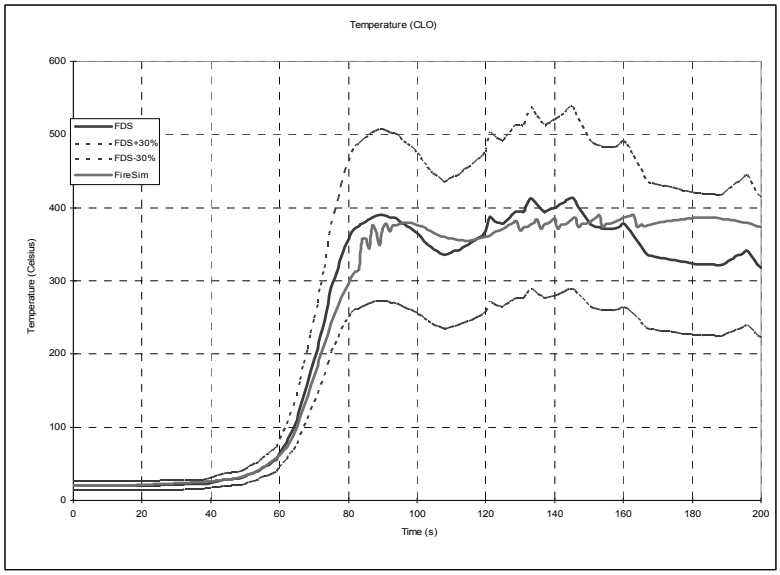


圖 4-9 點位 Station C 的溫度曲線比較圖

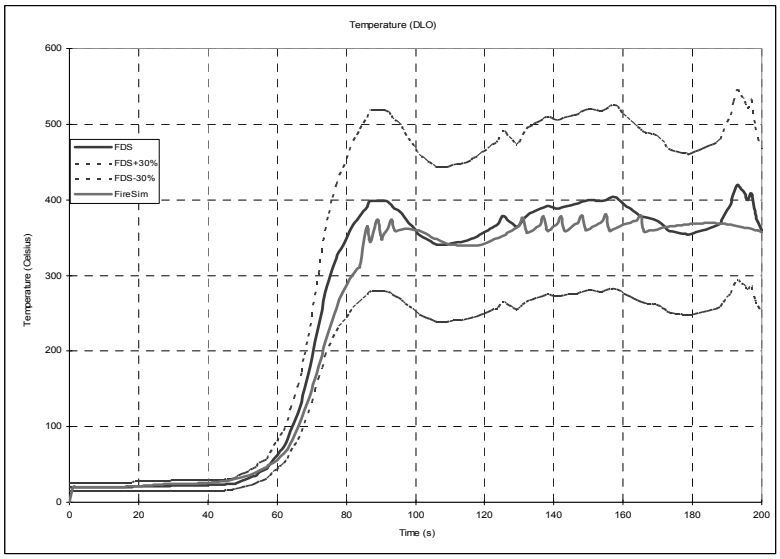


圖 4-10 點位 Station D 的溫度曲線比較圖

（三）火焰高度比對

火焰高度的數值如表(4-2)，所採用之簡易公式為Zf = 0.235 * Q2/5 － 1.02 * D， Zf為平均火焰高度，Q為熱釋放率，D為火焰直徑。

但由於無法由實驗中取得火焰直徑，因此火焰基準採用McCaffrey的修正公式Zfc = 0.08 * Q2/5 / Zfi = 0.20 * Q2/5 ，而火焰基準高度為Zfc + Zfi。

表 4-2 火焰高度比對

時間點(秒)	熱釋放率(kW)	FDS 基準(m)	調整後直徑(m)	3D 模型結果(m)	誤差比率
10	105	1.80	0.2	1.31	-27.40%
20	146	2.06	0.2	1.52	-26.00%
30	169	2.18	0.3	1.52	-30.11%
40	257	2.58	0.3	1.86	-27.95%
50	1054	4.53	0.5	3.29	-27.32%
60	3698	7.49	0.5	5.77	-22.88%
70	5715	8.91	0.7	6.77	-24.08%
80	5125	8.53	0.7	6.45	-24.44%
90	3308	7.16	0.9	5.09	-28.89%

1.火焰高度的趨勢在 50 秒至 60 秒內稍微降低後再昇高。

2.火焰高度的驗證數據誤差值皆落在 30%內。

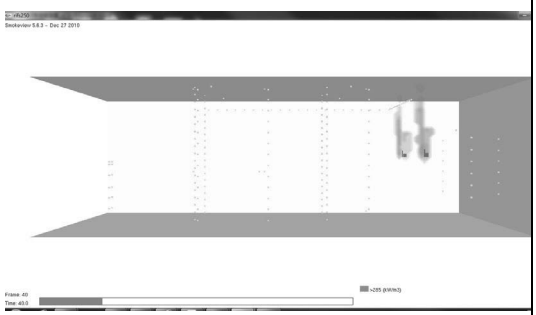
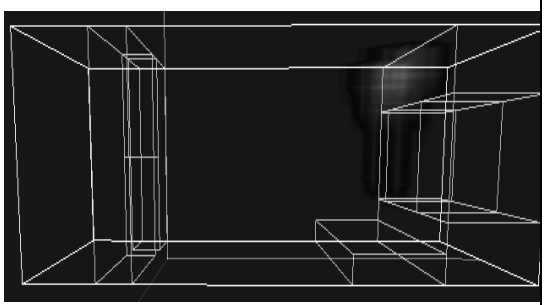
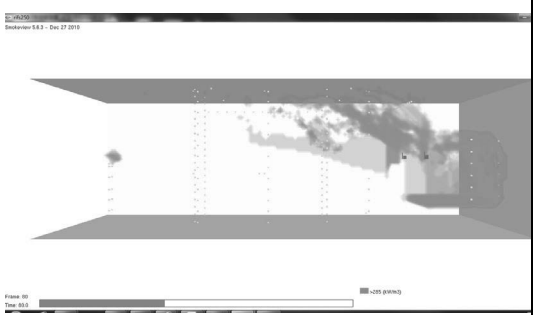
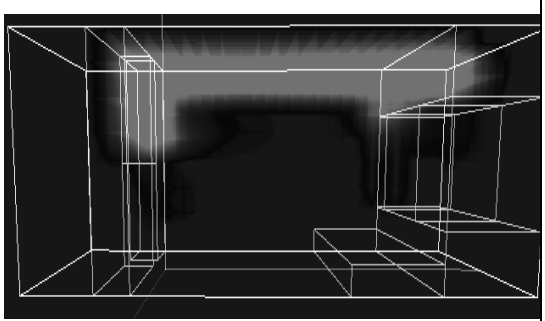
3.火焰高度比對比較表(4-3)：

表 4-3 火焰高度比對比照表

比對項目	FDS	FireSim
使用公式	FDS 之中的火焰高度，是以 600oC 火源中心點位置來計算。	$Z_f = 0.235 * Q^{2/5}$
產出方式	以 SmokeView 產出的動畫來量測起火源兩點的火焰高度。	系統計算出數值，產出為文字檔。

比對基準分為舞台左右兩邊起火點之火焰高度，火焰高度的計算方式以火焰下端至火焰尖端最高點的位置，以FDS的SmokeView產出之畫面直接量測，再與FireSim所產出之火焰高度數值作比較(表4-4)。

表 4-4 火焰高度畫面比對表

時間	FDS SmokeView	FireSim OpenGL View
40秒		
80秒		

（四）煙層高度/厚度比對

煙層之判定方面，可採用NFPA 92B採用N百分比法則（N-Percentage Rule）來判斷煙層的高度。煙層高度判斷之依據NFPA 92B 採用 N 值為80~90 做為煙層高度判斷之依據；煙層高度及厚度量測，採溫度場80°C為基準。以地板至煙層底部來計算煙層高度，以天花板至煙層底部來計算煙層厚度，比對煙層高度及厚度，火煙引擎所產生之數值與FDS模型比對，誤差值皆落在30%內，計算結果比對如表4-5。

表 4-5 煙層高度/厚度比對

時間點(秒)	FDS 基準（cm）		3D 模型結果（cm）		誤差比率
	高度	厚度	高度	厚度	
10	380	0	380	0	0.00%
20	380	0	380	0	0.00%
30	380	0	380	0	0.00%

40	376	4	377	3	-25.00%
50	299	81	296	84	4.69%
60	152	228	149	231	1.26%
70	49	331	50	330	-0.35%
80	25	355	27	353	-0.51%
90	23	357	22	358	0.13%
時間點(秒)	FDS 基準（cm）		3D 模型結果（cm）		誤差比率
	高度	厚度	高度	厚度	
10	380	0	380	0	0.00%
20	380	0	380	0	0.00%
30	380	0	380	0	0.00%
40	380	0	380	0	0.00%
50	272	108	288	92	-15.03%
60	155	225	150	230	1.95%
70	49	331	50	330	-0.18%
80	26	354	27	353	-0.34%
90	22	358	22	358	-0.02%

1.煙層高度/厚度比對比較(表 4-6)：

表 4-6 煙層高度/厚度比對比照表[16]（及同註 4）

比對項目	FDS	FireSim
使用公式	$T = T_{amb} + \frac{\Delta TN}{100}$	$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u\cdot\nabla)T + k\nabla^2 T + S_T$ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(u\cdot\nabla)\rho + \lambda\nabla^2\rho + S_\rho$ $u = u_{sol} + u_{irrot} = u_{sol} + \nabla\phi$
產出方式	以空間均等分的 4 點取樣，設定 OD 值 0.5 以上為煙層，FDS 計算產出煙層高度及厚度。	系統計算出數值，產出為文字檔。

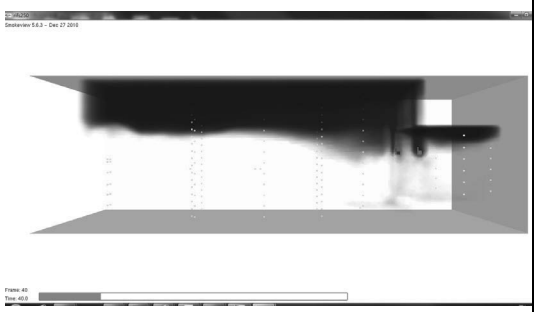
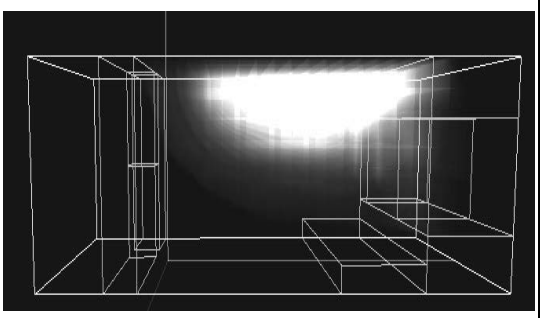
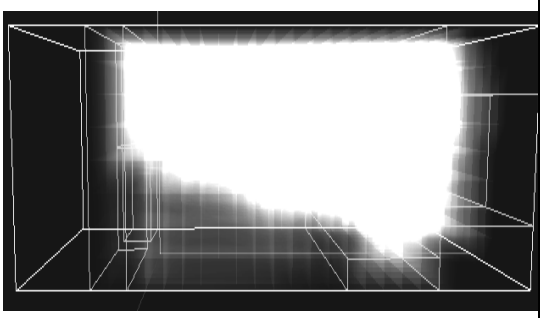
比對基準分為A、B、C、D四條垂直縱線，XY座標值為A (5.6, 4.6)、B (5.6, 2.3)、C (2.8, 2.3)、D (2.8, 4.6)。為夜總會縱切三等分及橫切三等分的四條交接

16 National Fire Protection Association, NFPA 92B: Guide for Smoke Management System in Malls, Atria, and Large Areas, Quincy, Massachusetts, USA (2010).

垂直線。

2.煙層圖面比對(表 4-7)

表 4-7 煙層高度/厚度畫面比對表(本研究自製)

時間	FDS SmokeView	FireSim OpenGL View
40秒		
80秒		

伍、結論與建議

一、夜店之模擬結果分析

（一）熱釋放率

從熱釋放率的結果圖來看，在初期成長的時間點相近，且熱釋放率成長曲線上升率一致，但FDS5.5.3的最大熱釋放率比起FDS4.0較大，主要是FDS5.5.3的延燒情況較為快速，在同時間內已經使附近其它材質產生延燒的現象；

（二）溫度

從溫度圖來看，可發現在85秒的時候最高溫度的區域已經漸漸從舞台區向外面移動，與FDS4.0的溫度圖來做對照，發現其最高溫度亦有向外移動的現象，但約在160秒以後其現象才較為明顯；

（三）氧濃度

而在氧濃度圖中，由於FDS5.5.3的延燒現象較為快速，初期舞台區發生火災，其附近氧濃度隨著延燒現象的擴大而迅速降低，當延燒的範圍愈來愈大時，低氧濃度的範圍也愈來愈大。

二、火場驗證軟體之應用

國際上的火場模擬軟體如前所述相當的多，各有各的功能及應用領域，也各有各的使用方程式及模式，雖然都是火場模擬軟體，但骨子裡可能完全不一樣，因此進行火場模擬時應特別注意：

（一）仔細讀使用說明，確認軟體的應用範圍及不可應用範圍。

（二）若可以的話，檢視軟體所使用的方程式及模式，更能確認軟體的模擬能力。

（三）做幾個測試案例，確認軟體的可靠性及準確度。

（四）模擬出來的火場畢竟還是模擬，與真實請況多少會有差異，不可完全以模擬的結果為結果，仍需搭配事後的資料分析，確認模擬結果的合理性。

（五）模擬結束後要多方檢視模擬資料，分析資料的合理與否，及模擬場景是否正確。

三、FDS4 與 FDS5 程式差異

（一）FDS5 版的模擬比 FDS4 版的模擬還要來的危險，主要是因為在延燒模式下，FDS5 版的延燒速度較為快速，且所產生的煙也比 FDS4 版還要來的多，因此 FDS5 版的模擬結果較為嚴格。

（二）FDS5 版的程式碼與 FDS4 版的程式碼在輸入指令已經有所不同，而在材質和表面的參數設定會有所出入，會造成結果的不同。

（三）FDS5 的相關材質參數需求比起 FDS4 版還要來的多，且需輸入相關材質性質的參數下，FDS 才能開始跑；而比對 FDS4 版可發現其版本相關參數輸入不全，其結果會有落差。

四、模擬誤差分析

以溫度曲線比對數值觀之，火煙驗證運算之數值經過能量守恆方程式處理後，已符合 FDS 基準 30%內的誤差值，唯一比較無法控制部分在於 84 秒至 90 秒處，因為天花板及地板溫差太大，造成該時段溫度動盪較大，無明顯的溫度走勢。

以火焰高度數值觀之，火煙引擎所計算火焰高度之公式，原採用簡易公式 $Z_f = 0.08 * Q^{2/5}$，，經修改為簡易公式 $Z_f = 0.23 * Q^{2/5} - 1.02 * D$，加入火焰直徑的考量，修正偏差，已達到 30%內的誤差值。

以火焰高度數值觀之，火煙引擎所計算火焰高度之呈象，經修正偏差後，已達到 30%內的誤差值。

以煙層高度及厚度數值觀之，火煙驗證運算之數值曲線與溫度曲線相符，且以溫度場 80˚C 為煙層分野，與 FDS 模型所產出之曲線亦相近，已能達到 30%內的誤差。

文獻

National Fire Protection Association, NFPA 921: Guide for fire and explosion investigations, Orlando, Florida, USA (2010)

Grosshandler W., Bryner N., Madrzykowski D. and Kuntz K., Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire: Appendices, National Institute of Standards and Technology NCST Act Report (NCSTAR) 2: Vol. I, Gaithersburg, Maryland, USA (2005)

Yang P.Z., Tan X., Sun H.C., Chen D.H. and Li C., Fire accident reconstruction based on LES field model by using orthogonal experimental design method, Adv. Eng. Softw., 42(11), 954–962 (2011)

Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's guide, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6784, Gaithersburg, MD, USA (2010).

Stam, J. (2000). "Interacting with smoke and fire in real time", Communications of the ACM, 43(7), pp. 76-83.

Min K. and Metaxas D., A combustion–based technique for fire animation and visualization, Visual Comput., 23, 679–687 (2007)

Lever J. and Komura T., Real–time controllable fire using textured forces, Visual Comput., 28(9), 691–700 (2012)

Hong Y., Zhu D.M., Qiu X. and Wang Z., Geometry–based control of fire simulation, Visual Comput., 26(9), 1217–1228 (2010)

Shen T.S., Hsiang H.Y. and Wen C.S., Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene, Build Environ., 43(6), 1036–1045 (2008).

Yang P.Z., Tan X. and Xin W., Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident, Build Environ., 46(7), 1445–1459 (2011)

Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design, Review Draft, SFPE(Society of Protection Engineers), p10-11, October, 2007.

Grosshandler W., Bryner N., Madrzykowski D. and Kuntz K., Report of the Technical

Investigation of The Station Nightclub Fire, National Institute of Standards and Technology NCST Act Report (NCSTAR) 2: Vol. II, Gaithersburg, Maryland, USA (2005)

Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's guide, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6784, Gaithersburg, MD, USA (2007)

Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 403 Poyntz Ave, Suite B, Manhattan, Kansas, USA, http://www.thunderheadeng. com/Pyrosim (2012)

National Fire Protection Association, NFPA 92B: Guide for Smoke Management System in Malls, Atria, and Large Areas, Quincy, Massachusetts, USA (2010).