臺灣警察專科學校警專學報，民國 109.6
第七卷第三期：105-138 頁

不同撒水模式對建築物地下層機車火災滅火成效之研究

Analysis of The Effect about Different Automatic Sprinkler System Extinguishing The Scooter Fire in Underground Parking Space

李雨修*、陳俊勳**

Yu-Hsiu Li、Chun-Hsun Chen

摘 要

探討建築物地下層機車停車區使用自動撒水設備防護，國內法規及現況以設置泡沫滅火設備為主，但自動撒水設備具穩定、經濟及環保效益，美國及中國大陸法令有得設置自動撒水設備規定；文獻燃燒實驗，機車火災成長係數平均值為 0.19 KW/sec^2，屬於時間平方火災極快速成長模式，自動撒水設備可抑制火焰高度與阻止機車間延燒，另電腦模擬（FDS）與全尺寸燃燒滅火實驗之比較，自動撒水設備撒水頭動作順序相同；本研究使用電腦程式（FDS），模擬自動撒水設備在不同撒水模式（密閉式與開放式）及不同起火源位置下，其滅火成效差異，模擬結果顯示，開放式較密閉式所需滅火時間較少，機車起火源與撒水頭水平距離越近，撒水頭越快動作，可儘速抑制火源熱釋放率成長。

關鍵字：自動撒水設備、地下停車空間、FDS、機車滅火

Abstract

Analysis of automatic sprinkler system protects the scooter in underground parking space, the current of general buildings is mainly equipped with foam fire-extinguishing equipment in Taiwan, the automatic sprinkling system has economic and environmental benefits, even high stability, China and the United States allow the parking space to set the automatic sprinkler system under certain conditions.

The literature about scooter full-scale fire indicates that the average fire growth coefficient is 0.19 KW/sec^2, it represents the scooter fire is classified as ultra-fast time

* 產業安全與防災學程碩士班；國立交通大學；toyuhsiu@gmail.com。
** 教授兼副校長；國立交通大學；chchen@mail.nctu.edu.tw

square fire growth model, automatic sprinkler system can suppress the flame height and prevent extending burning. According to the computer simulation (FDS) literature, no matter computer simulation or full-scale experiments, the active order and trend about sprinkler heads are the same.

This study uses the computer simulation program (FDS), the simulation scenario designed includes using a different system (enclosed wet type and open type), and different configurations. The simulation result demonstrates that the open type requires less time to extinguish the fire than the enclosed wet type if the horizontal distance between the sprinkler and the scooter ignition source is short, the sprinkler can act quickly, the heat release rate of fire can be suppressed in advance.

Key words：Automatic Sprinkler System, Underground Parking Space, FDS, Scooter fire Extinguishing

壹、前言

一、研究動機

國內建築物地下層機車停車空間應設置之滅火設備種類，依據《各類場所消防安全設備設置標準》[1]第 18 條規定，以泡沫滅火設備為主，國內曾針對泡沫液長期儲存品質及滅火效能影響之研究[2]，結果顯示，儲存年份愈久，滅火所需時間愈長，其耐火性、封閉性及抗火焰回燒效能皆變差，且泡沫液儲存環境若暴露在陽光下，將加速泡沫液變質情形，造成品質劣化及滅火效能降低，另泡沫滅火設備可能因構件較為複雜或比例混和失衡等因素，導致滅火失效。

自動撒水設備具經濟、可靠且成功性高[3]，滅火用水比泡沫藥劑更為環保，國外法規對於自動撒水設備應用於停車空間，業已行之有年，本研究針對建築物地下層機車停車空間，以電腦模擬自動撒水設備之滅火成效。

二、研究目的

本研究目的為國內建築物地下層機車停車空間設置自動撒水設備可行性，使消防安全設備更符合效益，提供主管機關列為日後法令修改方向，給予消防安全設備專技人員更多設計選擇。

三、研究範圍與限制

（一）本研究建築物地下層停車空間之防護對象物為使用油類燃料為動力之機車，

以不須依軌道或電纜之車輛為限，亦不包含使用電能為動力之機車。

（二）本研究背景環境，僅針對建築物地下層停車空間，不包含頂樓停車空間、室內具有牆壁直接對外氣開口停車空間及機械式停車。

（三）本研究模擬建築物地下層停車空間車輛停放方式，以同一平面式停車為限，不包含複層式停車。

（四）本研究電腦模擬防護對象為機車，模擬情境不考慮多部機車同時間起火燃燒或發生爆炸情形。

（五）本研究採用火災模擬電腦軟體為美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standard and Technology, NIST）所研發 Fire Dynamic Simulation（簡稱 FDS）第 6 版，輸入介面採用 Thunderhead Engineering PyroSim（簡稱 PyroSim）。

四、研究方法與流程

（一）研究方法：本研究使用文獻探討及電腦軟體（FDS）模擬分析研究方法。

（二）研究流程：

1. 文獻探討：探討項目為機車燃燒實驗、自動撒水設備對機車燃燒滅火實驗、電腦模擬（FDS）自動撒水設備、建築物室內機車停車空間火災特性及國內外法令規範（包含臺灣、中國及美國相關法令）。
2. 規劃電腦模擬情境：參考相關文獻設定模擬場景、機車尺寸、火源條件、延燒條件及自動撒水設備型式，接著設定密閉式撒水及開放式撒水模擬情境，模擬情境規劃完成後，即將相關數據資料輸入電腦軟體運行模擬實驗。
3. 模擬結果與討論：電腦軟體完成模擬情境運行後，針對相關實驗數據進行分析討論。
4. 結論與建議。

貳、文獻探討

一、相關文獻回顧

（一）機車燃燒實驗

張邦立[4]於自由空間下燃燒實體機車，利用 10 MW 燃氣分析儀及相關儀器設備量測熱釋放率、火焰高度與火焰溫度等情形，實驗結果顯示機車成長期之火災成長係數平均值為 0.00019 MW/sec^2，進入高峰期，1 輛、2

輛或 3 輛機車燃燒之最大熱釋放率依序為 1.16 MW、2.51 MW 及 5.44 MW，另機車燃燒之火焰高度或火焰中心軸溫度與熱釋放率呈正相關特性。

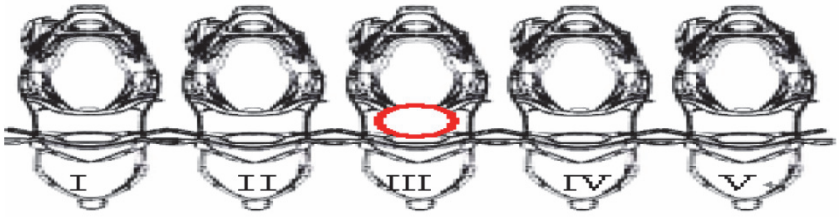
（二）自動撒水設備對機車燃燒滅火實驗

陳建忠等人[5]及張尚文[6]實施自動撒水設備對機車燃燒滅火全尺寸實驗（5 輛臺灣常見 125c.c.以下機車緊密排列），其過程未發現漏油浮在水面上擴大延燒，排除撒水不能應用在車輛火災的疑慮，但由於機車形狀，會造成撒水的防護死角，因此撒水頭宜配置在機車正上方，另由實驗分析求得機車火盛期熱釋放率約為機車數量的 1.16 倍（MW），該實驗在撒水頭種類、數量、配置、撒水量及滅火成效之整理，如表 1 及圖 1。

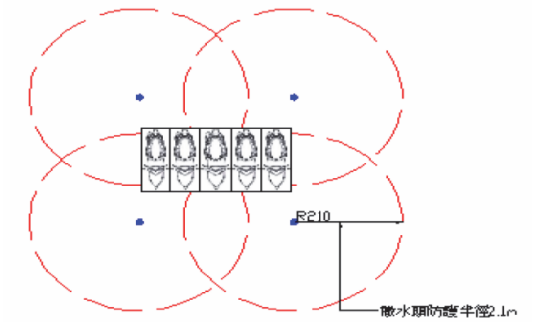
表 1　自動撒水設備對機車燃燒滅火全尺寸實驗情形

撒水頭	配置	撒水量	滅火成效
密閉式 4 顆	標準配置：撒水頭間距 2.97m、正方形排列機車四周	每顆 80 l/min 以上、總量 320 l/min 以上、撒水頭防護半徑 2.1m、標示溫度 68℃、K 值 79、出水口壓力在 1kg/㎝^{2} 以上	對火焰有抑制效果，能阻止向兩側延燒
密閉式 3 顆	集中配置：撒水頭間距 1 公尺、直線設置機車正上方	每顆 100 l/min、總量 300 l/min、平均撒水密度 12 l/min/㎡	能阻止機車火災向上延燒，但無法阻止向兩側延燒
開放式 3 顆	集中配置：撒水頭間距 1 公尺、直線設置機車正上方	每顆 250 l/min、總量 750 l/min、平均撒水密度 30 l/min/㎡	可以有效阻止機車火災向上及兩側延燒
備註：防護死角無法撲滅，如：機車腳踏板、多輛機車間隙等。			

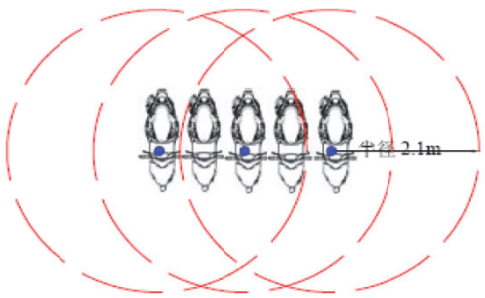
資料來源：文獻[6]及本研究整理。



說明：機車與油盤位置示意圖。



說明：撒水頭標準配置示意圖。



說明：撒水頭集中配置示意圖。

圖 1　機車燃燒滅火實驗配置情形

資料來源：文獻[6]。

（三）電腦模擬（FDS）自動撒水設備

賴翊仁[7]以全尺寸燃燒實驗與電腦模擬（FDS）探討居室中冷氣房或室內吊扇對探測器與撒水頭作動時間之影響，結果顯示，電腦模擬所有探測點之作動時間皆少於全尺寸燃燒實驗作動時間，但趨勢完全一樣，換言之，利用電腦模擬可以模擬出各撒水頭與探測器的作動順序，但無法準確地預估實際燃燒下之作動時間，而誤差主要來源為全尺寸燃燒實驗用來檢測溫度值之熱電偶，熱電偶檢測溫度係需等待熱量通過接點至檢測部位之時間，而電腦模擬程式未有此類產品因素，因該實驗所使用接點直徑較大之熱電偶，故靈敏度較小。

蘇芷瑤[8]針對自動撒水系統對單一居室火場降溫之實例研究，以電腦模擬（FDS）全尺寸實驗屋火災，驗證 FDS 撒水頭模式之準確性與合理性，接著模擬辦公室火災熱釋放率、空氣溫度及對人員安全危害程度之情境，之後再模擬撒水頭數量與配置的不同對住宅廚房火災延燒之降溫效能及對人員安全危害程度；結果顯示，自動撒水設備能降低空氣溫度，延遲及阻止閃燃發生，可爭取更多逃生時間。

二、建築物室內機車停車空間火災特性

地下建築物與密閉式高層建築物之結構，在火災特性上，均有濃煙密布、熱量無法消散、迅速向上延燒及逃生不易等，然而地下建築物除了上述特徵外，尚有火場瞬息萬變、火點發現困難及對火勢發展難以掌控等情形[9]，而室內地下層停車空間建築構造類同於軌道系統地下場站，其火災特性包含：開口有限且具密閉性、採光不足、排煙困難、外氣供給受到限制、易蓄積高溫、火災發生地點及

火勢狀況不易掌握等[10][11]。

建築物地下層停車空間主要的可燃物為停放於停車格內靜止車輛，起火燃燒型態包含可燃性固體及可燃性液體特性，並有因密閉燃料油箱受熱膨脹爆炸可能性，在停車空間之停車格集中設置，車輛併排停放，起火後容易延燒，形成大面積火場[12]，表 2 為國內停放機車處所曾發生起火延燒所造成災例。

表 2　國內機車停車空間火災案例

編號	發生日期	地點	案情簡述	資料來源
1	107 年 6 月 16 日	新北市新莊區五工六路一處鐵皮機車倉庫	現場機車停放於兩層樓倉庫內，總計燒燬 30 輛機車	文獻[13]
2	107 年 6 月 26 日	花蓮火車站前租車行	總計燒燬約 20 輛汽機車與延燒 5 間樓鐵皮平房	文獻[14]
3	107 年 6 月 27 日	桃園市八德區一處機車行	疑似機車行業者修理機車期間，機車漏油且接觸過熱車體，總計燒燬 12 輛機車	文獻[15]
4	107 年 6 月 28 日	新北市新莊區中正路機車行	總計燒燬 30 輛機車，總燃燒面積約 125 坪	文獻[16]
5	107 年 6 月 29 日	澎湖縣馬公鬧區公車總站附近租車行倉庫	總計燒燬 19 輛機車	文獻[17]
6	107 年 7 月 26 日	臺中市南區台中路一處鐵皮搭建的租車公司及工廠	燒燬 11 輛汽機車，財物損失約 600 多萬元	文獻[18]
7	107 年 8 月 14 日	臺南市中西區成功路一棟公寓大樓停車場	機車停車場內機車起火燃燒，大樓牆壁磁磚因高溫爆裂掉落，總計燒燬約有 20 多輛機車	文獻[19]
8	107 年 9 月 11 日	宜蘭縣一棟 7 層高大樓之地下室	起火點在停放汽機車的地下室，現場停放的機車北燒燒燬	文獻[20]

資料來源：本研究整理。

三、國內外法令規範（自動撒水設備）

臺灣、中國大陸及美國法規對於自動撒水設備之規範名稱如表 3 彙整，以下將探討各規範設計流程、場所危險等級分類、應設置場所、放水量、放水壓力、

撒水頭間距及最大防護面積，並比較中國大陸及美國法規自動撒水系統應用於停車空間之重點項目。

表 3　國內外自動撒水設備規範名稱

國內外規範名稱	
臺灣	《各類場所消防安全設備設置標準》
中國大陸	《GB50084 自動噴水滅火系統設計規範》
美國	《NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems》

資料來源：本研究整理。

（一）臺灣

1. 放水量及放水壓力

《各類場所消防安全設備設置標準》第 50 條[1]規定，撒水頭放水量為 80 l/min 以上，設於高架倉庫為 114 l/min，小區劃型撒水頭為 50 l/min，放水型撒水頭為 5 l/min・㎡（儲存可燃物場所為 10 l/min・㎡），另各型式撒水頭放水壓力應在 1 kgf/㎝^{2} 以上。

2. 間距及最大防護面積

臺灣法令未規定撒水頭間距及最大防護面積，而是以撒水頭最大防護水平距離及撒水頭放水個數/區域為規範，如表 4 及表 5 彙整。

表 4　臺灣撒水頭最大水平距離

場所分類	任一點至撒水頭之水平距離（m）	
	防火構造建築物	其他構造建築物
戲院、舞廳、夜總會、歌廳、集會堂等表演場所之舞臺及道具室、電影院之放映室或儲存易燃物品之倉庫	1.7 m 以下	
一般反應型撒水頭（第二種感度）	2.3 m 以下	2.1 m 以下
快速反應型撒水頭（第一種感度）	2.6 m 以下	2.3 m 以下
小區劃型撒水頭（以第一種感度為限）（甲類第三目、甲類第六目、乙類第七目、戊類第一目等場所之住宿居室、病房及其他類似處所）	符合下列所有要件： 1.任一點至撒水頭之水平距離 2.6 m 以下。 2.撒水頭間距 3 m 以上。 3.撒水頭防護面積 13 ㎡以下。	
側壁型撒水頭（以第一種感度為限）（住宿居室等及其走廊、通道與其類似場所）	1.牆面二側至撒水頭之水平距離 1.8 m 以下。 2.牆壁前方至撒水頭之水平距離 3.6 m 以下。	
中央主管機關認定儲存大量可燃物	應採用放水型撒水頭	

之場所天花板高度超過 6 m，或其他場所天花板高度超過 10 m 者	
地下建築物天花板與樓板間之高度，在 50 ㎝以上	1.任一點至撒水頭之水平距離 2.1 m 以下。 2.天花板與樓板均應配置撒水頭。 3.天花板以不燃性材料裝修者，其樓板得免設撒水頭。
高架儲存倉庫設在貨架之撒水頭	1.任一點至撒水頭之水平距離 2.5 m 以下，並以交錯方式設置。 2.儲存易燃物品時，每 4 m 高度至少設置一個；儲存其他物品時，每 6 m 高度至少設置一個。 3.儲存之物品會產生撒水障礙，該物品下方亦應設置撒水頭。 4.設置符合規定防護板，或使用貨架撒水頭。
高架儲存倉庫設在天花板或樓板之撒水頭	2.1 m 以下

資料來源：文獻[3]。

表 5　臺灣撒水頭放水個數/區域

密閉式撒水頭			
各類場所		撒水頭個數（連續放水 20 分鐘）	
		快速反應型	一般反應型
11 樓以上建築物、地下建築物		12	15
10 樓以下建築物	供甲類第四目使用及複合用途建築物中供甲類第四目使用者	12	15
	地下層	12	15
	其他	8	10
高架儲存倉庫	儲存棉花、塑膠、木製品、紡織品等易燃物品	24	30
	儲存其他物品	16	20
開放式撒水頭			
各類場所		放水區域（連續放水 20 分鐘）	
10 層以下建築物之樓層	甲類第一目使用場所及第二目集會堂之舞臺	最大放水區域全部撒水頭	
11 層以上建築物之樓層		最大樓層全部撒水頭	

側壁型或小區劃型撒水頭	
各類場所	撒水頭個數（連續放水 20 分鐘）
10 層以下樓層	8
11 層以下樓層	12
放水型撒水頭	
各類場所	撒水頭個數（連續放水 20 分鐘）
固定式	最大放水區域全部撒水頭
可動式	最大放水量撒水頭
使用乾式或預動式流水檢知裝置：依上述撒水頭數量之規定再追加 50%	

資料來源：本研究整理。

（二）中國大陸《GB50084 自動噴水滅火系統設計規範》[21]

1. 場所危險等級

將場所火災危險等級劃分為「輕危險級」、「中危險級Ⅰ級」、「中危險級Ⅱ級」、「嚴重危險級Ⅰ級」、「嚴重危險級Ⅱ級」、「倉庫危險級Ⅰ級」、「倉庫危險級Ⅱ級」及「倉庫危險級Ⅲ級」等 8 個級距，而場所的火災危險等級係根據場所用途、容納物品火載量及室內空間條件等因素，分析火災特點和熱氣流驅動噴頭開放及噴水到位難易程度歸類，其中停車空間屬「中危險級Ⅱ級」。

2. 放水量及放水壓力

民用建築和廠房設置自動撒水系統時，濕式系統設計基本參數（淨空高度、噴水強度、噴水強度及壓力）不應低於表 6 規定。

表 6　中國大陸民用建築和廠房濕式系統設計基本參數

火災危險等級		淨空高度（m）	噴水強度（l/min・㎡）	作用面積（㎡）
輕危險級		≦8	4	160
中危險級	Ⅰ級		6	
	Ⅱ級		8	
嚴重危險級	Ⅰ級		12	260
	Ⅱ級		16	
備註：系統最不利點處噴頭的工作壓力不應低於 0.05 MPa				

資料來源：文獻[21]。

3. 間距及最大防護面積

標準覆蓋面積噴頭定義為：「流量係數 K≥80，一只噴頭的最大保護面積不超過 20 ㎡的直立型、下垂型撒水噴頭及一只噴頭最大保護面積不

超過 18 ㎡的邊牆型撒水噴頭」，擴大覆蓋面積噴頭定義為：「流量係數 K ≥ 80，一只噴頭的最大保護面積大於標準覆蓋面積噴頭的保護面積，且不超過 36 ㎡的撒水噴頭，包括直立型、下垂型和邊牆型擴大覆蓋面積噴頭」，直立型、下垂型標準及擴大覆蓋面積噴頭配置應根據設置場所火災危險等級、噴頭類型和工作壓力確定，並不應大於表 7 規定，且標準覆蓋面積不應小於 1.8 m、擴大覆蓋面積不應小於 2.4 m，直立型、下垂型擴大覆蓋面積撒水噴頭應採用正方形布置。

表 7　中國大陸直立型、下垂型標準及擴大覆蓋面積噴頭的配置間距

直立型、下垂型標準覆蓋面積噴頭的配置間距					
火災危險等級	正方形配置的邊長（m）	矩形或平行四邊形配置的長邊邊長（m）	一只噴頭的最大保護面積（㎡）	噴頭與端牆的距離（m）	
				最大	最小
輕危險級	4.4	4.5	20.0	2.2	0.1
中危險Ⅰ級	3.6	4.0	12.5	1.8	
中危險Ⅱ級	3.4	3.6	11.5	1.7	
嚴重危險級、倉庫危險級	3.0	3.6	9.0	1.5	
備註： 1.設置單排噴頭的閉式系統，其噴頭間距應按地面不留漏噴空白點確定。 2.嚴重危險級或倉庫危險級場所宜用 K＞80 的噴頭。					
直立型、下垂型擴大覆蓋面積噴頭的配置間距					
火災危險等級	正方形配置的邊長（m）	矩形或平行四邊形配置的長邊邊長（m）	一只噴頭的最大保護面積（㎡）	噴頭與端牆的距離（m）	
				最大	最小
輕危險級	5.4	29.0	2.7	2.7	0.1
中危險Ⅰ級	4.8	23.0	2.4	2.4	
中危險Ⅱ級	4.2	17.5	2.1	2.1	
嚴重危險級	3.6	13.0	1.8	1.8	

資料來源：文獻[21]。

（三）美國《NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems》[22]

1. 場所危險等級

將建築物使用型態所衍生火災行為及衍生危害程度，以定性分類方式，分為「輕度危害使用」、「中度危害使用第一類」、「中度危害使用第

二類」、「高度危害使用第一類」及「高度危害使用第二類」等 5 個級距，分類目的係為系統設計、設備安裝及放水量需求之依據，故該分類方式與一般對人員危害程度分類方式不盡相同，其中停車空間屬「中度危害使用第一類」。

2. 放水量及放水壓力

(1) 管徑規格法

表 8 適用於 5,000 ft^2 （465 ㎡）以下之輕度及中度危險場所，當場所大於 5,000 ft^2，適用表 8 放水流量時，設置在最高處之撒水頭最小放水壓力為 50 psi （3.4 bar）。

表 8　美國撒水系統放水性能（管徑規格法）

分類	最小放水壓力		放水流量		放水時間
	psi	bar	gpm	l/min	（minutes）
輕度危害使用	15	1	500-750	1,900-2,850	30-60
中度危害使用	20	1.4	850-1,500	3,200-5,700	60-90

資料來源：文獻[22]。

(2) 水力計算法

撒水密度單位為每平方英呎每分鐘撒水的加侖水量（$gpm/ft^2 \cdot min$）或每平方公尺每分鐘撒水的公升水量，由於撒水頭設置數量係依據撒水頭防護面積所計算，在正常無阻礙情形下，撒水頭的撒水密度愈高，水量愈大，愈能控制火勢成長，故不需要太多撒水頭動作就能控制火災，但由於可能因撒水頭啟動撒水順序而發生跳漏情形，故《NFPA 13》有「最小設計面積」限制，在低度及中度危害使用場所之最小設計面積為 139 ㎡（1,500 ft^2），在高度危害使用場所之最小設計面積為 232 ㎡（2,500 ft^2），免設自動撒水系統場所之最小設計面積為 279 ㎡（3,000 ft^2）[23]；有關撒水頭之撒水密度與撒水面積之關係如圖 2。

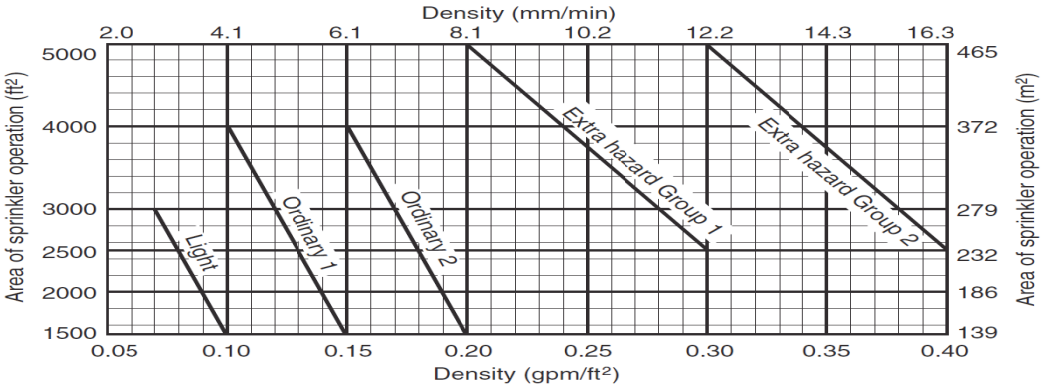


圖 2　美國撒水系統撒水面積/密度曲線

資料來源：文獻[22]。

3. 間距及最大防護面積

撒水頭最大間距及最大防護面積如表 9 所示。

表 9　美國撒水頭最大間距及最大防護面積

分類	建築類型	系統類型	最大防護區域		最大間距	
			ft^2	m^2	ft^2	m^2
輕度危害使用	不燃性無阻礙構造	水力計算法	225	20.9	15	4.6
		管徑規格法	200	18.6	15	4.6
	不燃性有阻礙構造	水力計算法	225	20.9	15	4.6
		管徑規格法	200	18.6	15	4.6
	可燃性無阻礙構造及無暴露構件	水力計算法	225	20.9	15	4.6
		管徑規格法	200	18.6	15	4.6
	構件間距大於 91cm（3ft）可燃性無阻礙構造	水力計算法	225	20.9	15	4.6
		管徑規格法	200	18.6	15	4.6
	構件間距小於 91cm（3ft）可燃性無阻礙構造	皆可	130	12.1	15	4.6
	構件間距大於 91cm（3ft）可燃性有阻礙構造	皆可	168	15.6	15	4.6
	構件間距小於 91cm（3ft）可燃性無阻礙構造	皆可	130	12.1	15	4.6
中度	全	皆可	130	12.1	15	4.6

危害使用						
高度危害使用	全	管徑規格法	90	8.4	12.	3.7
	全	水力計算法（撒水密度≧0.25）	100	9.3	12	3.7
	全	水力計算法（撒水密度＜0.25）	130	12.1	15	4.6

資料來源：文獻[3][22]。

綜合上述臺灣、中國大陸及美國法令規範，於建築物地下層停車空間設置自動撒水設備之比較，如表 10 所彙整。

表 10　臺灣、中國大陸及美國停車空間設置自動撒水設備之比較

國家	中國大陸	美國	臺灣
自動撒水設備規範名稱	GB 50084	NFPA 13	現行法令標準未允許得於停車空間設置自動撒水設備
危險等級分類	中危險級Ⅱ級	中度危害使用第一類	
撒水密度（l/min・㎡）	8	4.1～6.1	
作用面積（㎡）	160	372～139	
每個撒水頭保護面積（㎡）	11.5	12.1	
放水壓力（MPa）	0.05	0.05	
撒水頭間距（m）	3.4	4.6	

資料來源：本研究整理。

參、研究方法與模擬情境

一、電腦模擬程式

本研究使用電腦軟體 Fire Dynamics Simulator，簡稱 FDS，是由美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standard and Technology, NIST）所研發，為計算流體力學的一種火災場模式電腦模擬軟體，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動作，計算撒水後火場的變化[24]。

模擬撒水系統滅火功能，在撒水抑制火源機制上，當水粒子接觸到燃燒物時，

不僅冷卻表面及周圍空氣溫度，而且會改變熱分解速率，如果燃燒物表面為平整，則可將熱分解速率的下降，當作整體燃燒物表面熱量的減少，但是在實務應用上，大多數燃燒物表面由具有複雜幾何形狀及多種物體所組成，因此在電腦模擬系統的網格上，難以百分之百呈現[25]，而在電腦軟體 FDS 撒水作用於燃燒物火勢的抑制運算模式，包含撒水水滴在燃燒物的變化及使燃燒物降低熱分解速率。

二、模擬條件設定

（一）模擬場景

本研究場景為某建築物地下層停車空間（基本資料如表 11、平面圖如圖 3），在原泡沫滅火設備泡沫噴頭及感知撒水頭位置不變下，將泡沫噴頭改以撒水頭替代。

表 11　本研究場景基本資料表

項目	基本資料
用途	室內地下層停車空間
樓層位置	地下 1 層
該層樓室內高度	4.5 公尺
該層樓地板面積	2,519 平方公尺
機車停放區域面積	491 平方公尺（含車道）
機車停放區域面積所佔該層樓地板面積比例	約 19.5%
機車停車格數量	117 個
機車格尺寸	長 2 公尺、寬 1 公尺
原設計滅火設備種類	泡沫滅火設備
滅火設備自動啟動裝置	每個泡沫噴頭位置皆設置感知撒水頭
撒水頭防護半徑	2.1 公尺
撒水頭高度	4.2 公尺（天花板下方 30 公分）

資料來源：本研究整理。

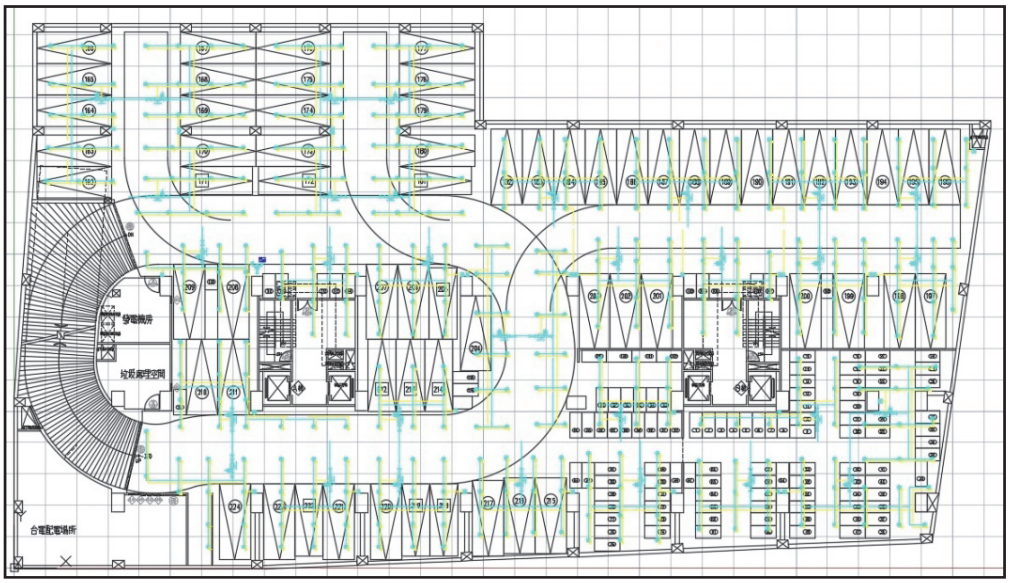


圖 3　本研究場景平面圖

資料來源：本研究取得。

本研究參考文獻燃燒實驗[6]機車併排方式、撒水頭正方形配置設計及衡量本研究場景原配置泡沫滅火設備泡沫噴頭及感知撒水頭位置（正方形配置設計），設定機車為 3 輛併排停放，起火源位置為 3 輛併排停放之中間機車，另為探討在撒水頭正方形配置下，起火源機車與撒水頭水平距離遠近對於滅火成效之差異，本研究規劃 3 處不同撒水頭與機車相對位置進行模擬，分別為最近距離、中等距離及最遠距離，各位置說明彙整詳如表 12 及圖 4。

表 12　機車位置說明

機車位置	起火源機車與撒水頭水平距離說明	機車邊界相鄰最近距離	圖示
位置 A	最近距離：起火源機車在 1 顆撒水頭正下方，與最近的撒水頭水平距離為 0 公尺	0.44 公尺	如下圖
位置 B	中等距離：起火源機車在 2 顆撒水頭直線距離中間，與最近的撒水頭水平距離為 1.485 公尺	0.44 公尺	如下圖
位置 C	最遠距離：起火源機車在 4 顆撒水頭正方形配置中間，與最近的撒水頭水平距離為 2.1 公尺	0.44 公尺	如下圖

資料來源：本研究整理。

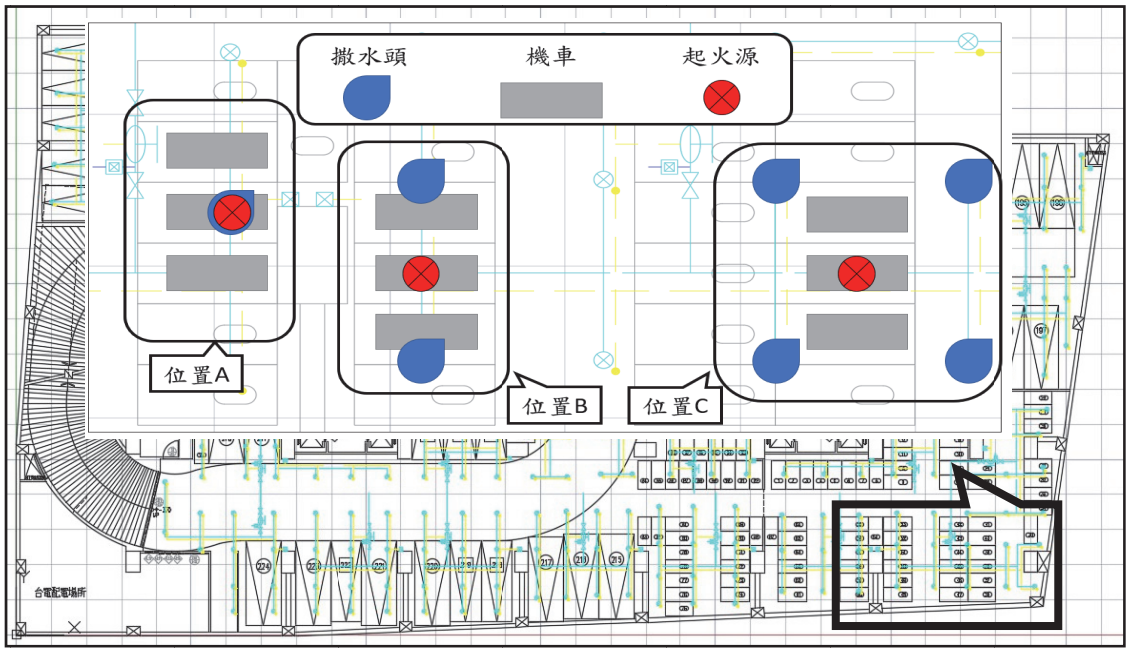


圖 4　本研究設定機車位置示意圖

資料來源：本研究繪製。

（二）模擬機車尺寸

文獻[26]曾統計國內不同類型機車尺寸，本研究以該文獻中機車長度乘以寬度與地面至儀表板高度，機車所佔空間容積最大值為模擬數值（機車長 1.69 m、寬 0.56 m、地面至儀表板高度 1.11 m），次依電腦模擬格點設定尺寸，機車長 1.7 m、寬 0.6 m、地面至儀表板高度 1.1 m。

（三）模擬火源類型

本研究模擬火源成長模式依內政部建築研究所出版《建築物防火避難安全性能驗證技術手冊》[27]內容之 t-squared fires 極快速（Ultra Fast）模式（火源成長係數 α 值大於 0.1876 KW/sec^2），並參照文獻[4]燃燒實驗結果，將火源成長係數 α 值設定為 0.19 KW/sec^2，在最大熱釋放率方面，參考文獻燃燒實驗量測到單輛機車數值及本研究設定機車坐墊燃燒表面積（坐墊尺寸為長 1m、寬 0.6m、高 0.2m 長方體，燃燒表面積為 1.24 ㎡，計算式：1×0.6+1×0.2×2+0.6×0.2×2），將 1 輛機車設定為 1.3 MW（計算式：1.055 MW/m^2×1.24 m^2 = 1.3082 MW），另依據文獻[28]三種機車表面材料中，以機車坐墊表皮 PVC 的著火溫度最低（454 ℃），最容易起火，為使模擬之火源達到集中效果，以機車坐墊作為火源設定。

（四）模擬延燒條件

本研究模擬延燒條件，參考文獻[5] [26]機車燃燒實驗，設定 3 輛機車中間機車起火後，經過 70 秒，左右 2 側併排機車起火燃燒。

（五）模擬自動撒水設備型式

在機車燃燒滅火實驗文獻[6]上，分別針對密閉式不同配置方式及開放式進行滅火能力的探討，故本研究模擬「密閉式」及「開放式」自動撒水設備對機車燃燒滅火情形。

（六）電腦模擬（FDS）格點設定

本研究在格點設定方式，考慮模擬之效率與正確性，在評估最佳的格點尺寸設定上，本研究採用火源特徵直徑的計算方式來計算最大熱釋放率下的最佳格點尺寸。

國外學者 Beum et al.[31]定義火源附近最小長度尺寸（length scale）以火災特徵直徑（characteristic fire diameter） D*表示，如公式 1。

$$D^* = \left[\frac{Q}{\rho_0 \cdot c_P \cdot T_0 \cdot \sqrt{g}}\right]^{2/5} \quad \text{（公式 1）}$$

D*：火災特徵直徑（m）。

Q：熱釋放率（kW）。

ρ_0：空氣密度（kg/m^3）。

Cp：空氣比熱（KJ/Kg·K）。

To：環境溫度（K）。

g：重力加速度（m/s^2）。

若 FDS 格點尺寸為 0.1D*時 LES model 之時間平均軸心速度與溫度會與 MaCaffery[32]的實驗回歸公式吻合，亦即表示若欲正確模擬單一火災煙流燃燒情形，格點尺寸以 0.1D*之尺度最為適合，本研究以 Q 最大火源熱釋放率 3,900 kW、ρ_0 空氣密度 1.204（kg/m^3）、Cp 空氣比熱 1.005（KJ/Kg·K）、To 環境溫度 298（K）、g 重力加速度 9.81（m/s^2），經公式 1 計算，可得 D*火災特徵直徑為 1.59 m，則 0.1D*約為 15.9cm，本研究場景（2,519 平方公尺）以 20x20x20 cm 作為格點之大小，格點數計 1,931,400 個，其中火源區（場景右下方 252 平方公尺）局部加密，以 10x10x10 cm 作為格點之大小，格點數計 1,134,000 個。

三、模擬情境規劃

（一）密閉式撒水情境

1. 密閉式撒水頭

(1) 反應時間指數（Response Time Index，簡稱 RTI）及標示溫度

依據美國核能管理委員會（U.S.NRC）所出版 Fire Dynamics Tools（FDT^s） – Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program（NUREG-1805） [29]所列數值，採用玻璃球為感熱元件型式，設定標準反應型 RTI 值為 235、標示溫度為 68 ℃。

(2) 放水壓力、放水量及流量特性係數（K 值）

比照國內法規一般場所之規定，設定放水壓力為 1 kgf/cm^2，放水量為 80 l/min，流量特性係數（K 值）依據公式 2 計算為 80。

$Q = K\sqrt{P}$　（公式 2）

Q：放水量（l/min）

P：放水壓力（kgf/cm^2）

K：流量特性係數

2. 模擬場景位置選擇及密閉式撒水頭數量

密閉式撒水頭感熱元件達到啟動要件，而使密閉式撒水頭放水滅火，每個密閉式撒水頭獨立運作，彼此之間未有直接影響及連動設定因素，在場景 A、B 及 C 皆設置 6 顆相同型式撒水頭，依模擬情形各自動作。密閉式撒水情境規劃內容彙整如表 13。

表 13　密閉式撒水情境規劃內容

密閉式撒水情境	密閉式撒水頭（各自動作放水）						
	標示溫度	RTI	放射壓力 P	K 值	放水量 Q	區域	動作數量
	68℃	235	1 kgf/cm^2	80	80 l/min	A B C	依模擬情形動作

資料來源：本研究整理。

（二）開放式撒水情境

1. 開放式撒水頭

(1) 啟動要件

啟動模式比照泡沫滅火設備一齊開放模式，當 1 顆撒水頭動作時間點，

即為 6 顆撒水頭同時動作時間點。

(2) 放水壓力、放水量及流量特性係數（K 值）

比照國內法規一般場所之規定，設定放水壓力為 1 kgf/cm^2，放水量為 80 l/min，流量特性係數（K 值）依據公式 2 計算為 80。

2. 模擬場景位置選擇及開放式撒水頭數量

開放式撒水模式在場景 A、B 及 C 皆設置 6 顆相同型式撒水頭，當 1 顆撒水頭動作放水時間點，即為 6 顆撒水頭同時動作放水時間點。

開放式撒水模式情境規劃內容彙整如表 14。

表 14　開放式撒水情境規劃內容

開放式撒水情境	開放式撒水頭（一起動作放水）				
	放水壓力 P	K 值	放水量 Q	區域	動作數量
	1 kgf/cm^2	80	80 l/min	A	6
				B	6
				C	6

資料來源：本研究整理。

肆、模擬結果與討論

本研究電腦模擬場景建立情形如圖 5 及圖 6,燃燒反應所產生熱量速率稱為熱釋放率（HRR），係量化表現建築物火災行為的基本特徵，描述火災危險重要項目，對於研究火災防護議題具有重要意義，包含預測危險情況發生、財物與結構損害、燃燒率變化、可燃物起火及閃燃的發生[30]，本研究電腦模擬結果，以撒水設備動作前後，機車火源熱釋放率-時間之變化情形為討論項目。

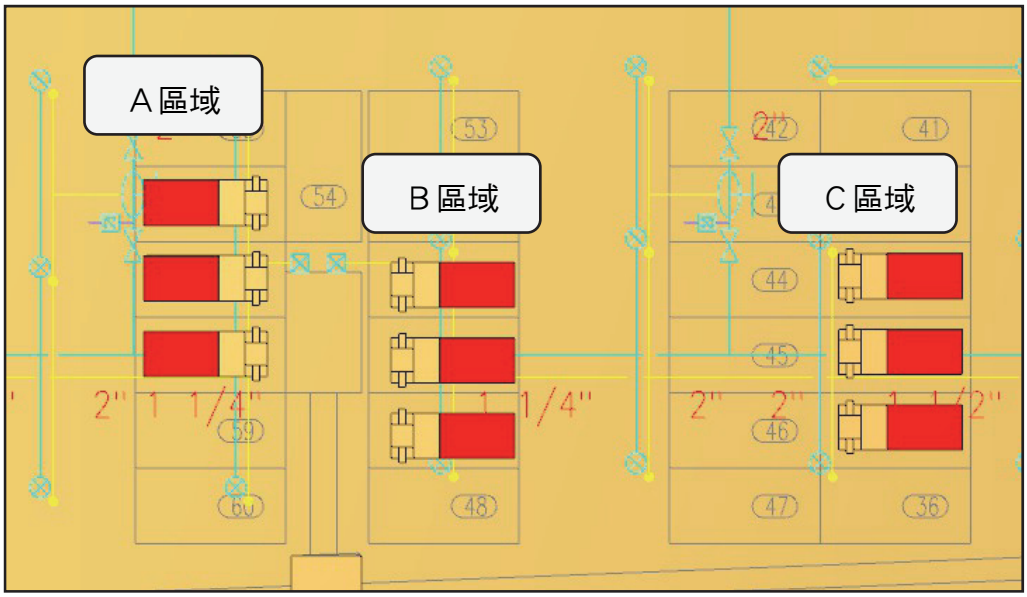


圖 5　模擬區域俯視圖

資料來源：本研究製作。

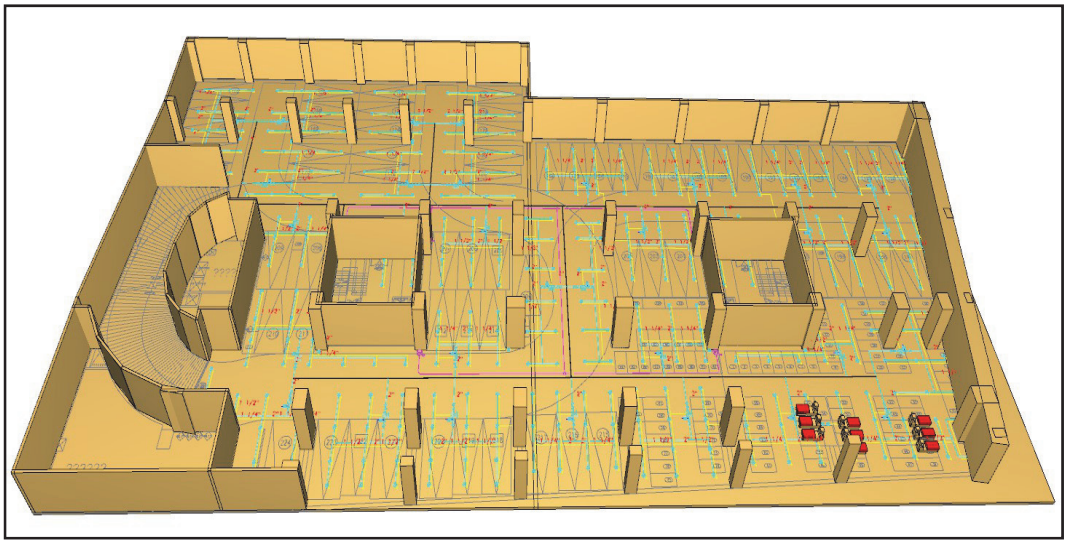


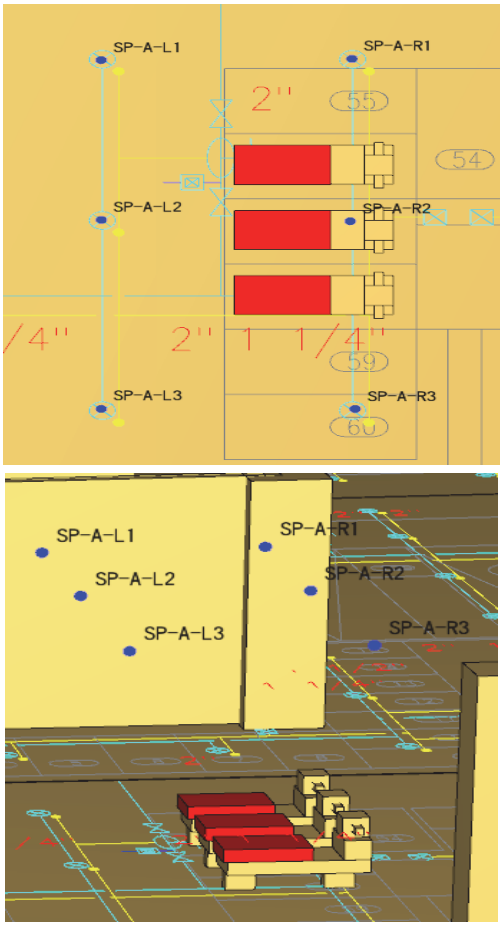
圖 6　模擬區域俯視圖

資料來源：本研究製作。

一、A 區域模擬情形

A 區域（起火源機車位於撒水頭正下方）模擬建置情形如表 15，分別設定密閉式及開放式之撒水模式，探討其抑制機車火源燃燒情形，就撒水頭動作及熱釋放率-時間變化情形分析說明。

表 15　A 區域模擬建置情形

模擬圖示	模擬圖示說明
	1.中間機車（紅色圖形）為起火源機車。 2.上方及下方機車（紅色圖形）為被延燒機車。 3.撒水頭 6 顆（藍色圖形），代號說明如下： (1)右上方：SP-A-R1。 (2)右中間：SP-A-R2。 (3)右下方：SP-A-R3。 (4)左上方：SP-A-L1。 (5)左中間：SP-A-L2。 (6)左下方：SP-A-L3。

資料來源：本研究製作。

（一）撒水頭動作說明

A 區域模擬撒水頭動作順序及時間如表 16 所彙整，相較於開放式 6 顆撒水頭同時動作，密閉式僅動作 1 顆撒水頭。

表 16　A 區域撒水頭動作時間（秒）及順序

撒水頭代號	密閉式		開放式	
	動作時間	動作順序	動作時間	動作順序
SP-A-R1	-	-	135 秒	1
SP-A-R2	135 秒	1	135 秒	1
SP-A-R3	-	-	135 秒	1
SP-A-L1	-	-	135 秒	1
SP-A-L2	-	-	135 秒	1
SP-A-L3	-	-	135 秒	1

資料來源：本研究整理。

（二）熱釋放率與時間

A 區域模擬結果，其熱釋放率-時間曲線如圖 7 所示，撒水頭動作後熱釋放率變化數值如表 17，不論哪一種撒水模式，皆可使熱釋放率下降，而開放式撒水頭動作至熱釋放率下降為 0 所使用時間較少，在相同啟動時間下，開放式撒水模式 6 顆撒水頭於相同時間啟動放水，其放水量大於使用密閉式撒水模式（1 顆撒水頭放水），故其撒水後熱釋放率下降所需時間較少，代表可越早完成滅火。

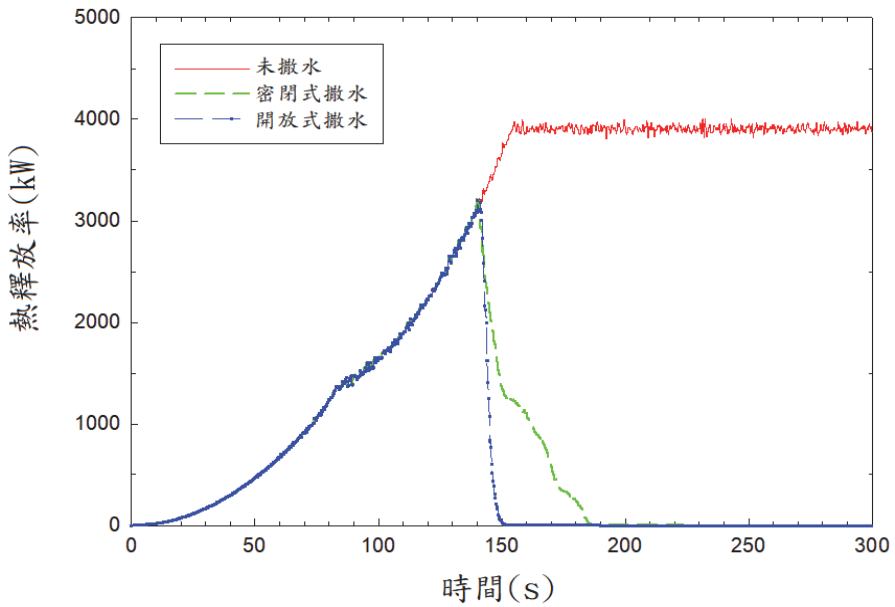


圖 7　A 區域各撒水模式之熱釋放率-時間曲線

資料來源：本研究製作。

表 17　A 區域撒水頭動作後機車火源熱釋放率（KW）

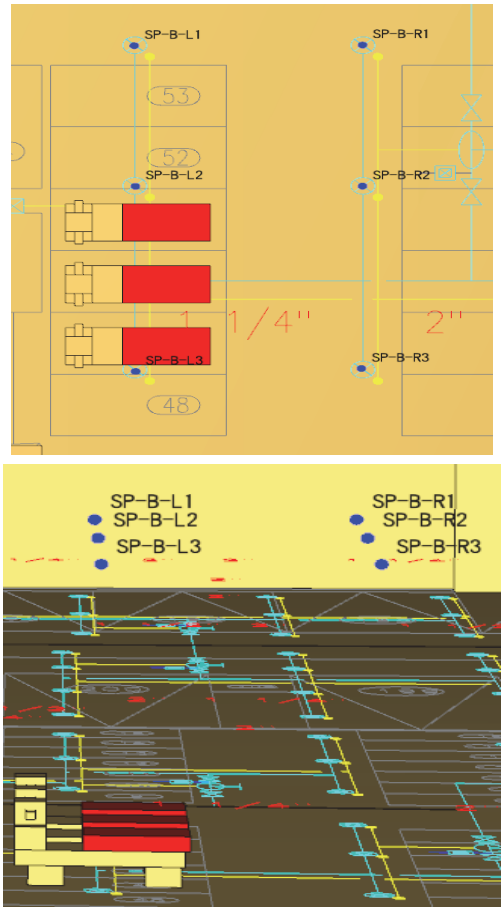
撒水頭型式		密閉式	開放式
撒水頭動作後經過時間	0 秒	2940 KW	2940 KW
	3 秒	3036 KW	3038 KW
	6 秒	3128 KW	3111 KW
	9 秒	2346 KW	1621 KW
	12 秒	1805 KW	304 KW
	15 秒	1360 KW	29 KW
	18 秒	1256 KW	0 KW
	21 秒	1192 KW	-
	24 秒	1112 KW	-
	27 秒	996 KW	-
	30 秒	876 KW	-
	33 秒	750 KW	-
	36 秒	330 KW	-
	39 秒	271 KW	-
	75 秒	0 KW	-

資料來源：本研究整理。

二、B 區域模擬情形

B 區域（起火源機車位於 2 顆撒水頭直線距離中間）模擬建置情形如表 18，分別設定密閉式及開放式之撒水模式，探討其抑制機車火源燃燒情形，就撒水頭動作及熱釋放率-時間變化情形予以分析說明。

表 18　B 區域模擬建置情形

模擬圖示	模擬圖示說明
	1.中間機車（紅色圖形）為起火源機車。 2.上方及下方機車（紅色圖形）為被延燒機車。 3.撒水頭 6 顆（藍色圖形），代號說明如下： (1)右上方：SP-B-R1。 (2)右中間：SP-B-R2。 (3)右下方：SP-B-R3。 (4)左上方：SP-B-L1。 (5)左中間：SP-B-L2。 (6)左下方：SP-B-L3。

資料來源：本研究製作。

（一）撒水頭動作說明

B 區域模擬撒水頭動作順序及時間如表 19 所彙整，相較於開放式 6 顆撒水頭同時動作，密閉式僅動作 3 顆撒水頭，且 3 顆撒水頭動作時間皆不相同。

表 19　B 區域撒水頭動作時間（秒）及順序

撒水頭代號	密閉式		開放式	
	動作時間	動作順序	動作時間	動作順序
SP-B-R1	-	-	185 秒	1
SP-B-R2	-	-	185 秒	1
SP-B-R3	185 秒	1	185 秒	1
SP-B-L1	-	-	185 秒	1
SP-B-L2	213 秒	3	185 秒	1
SP-B-L3	200 秒	2	185 秒	1

資料來源：本研究整理。

（二）熱釋放率與時間

B 區域模擬結果，其熱釋放率-時間曲線如圖 8 所示，撒水頭動作後熱釋放率變化數值如表 20，不論哪一種撒水模式，皆可使熱釋放率下降，而開放式撒水頭動作至熱釋放率下降為 0 所使用時間較少，在相同啟動時間下，開放式撒水模式 6 顆撒水頭於相同時間啟動放水，其放水量大於使用密閉式撒水模式（3 顆撒水頭依序放水），故其撒水後熱釋放率下降所需時間較少，代表可越早完成滅火，相較下，密閉式撒水模式係每顆撒水頭依火源發展狀況各自啟動，撒水頭第 2 顆及第 3 顆啟動時間較晚，其熱釋放率下降幅度較為緩慢。

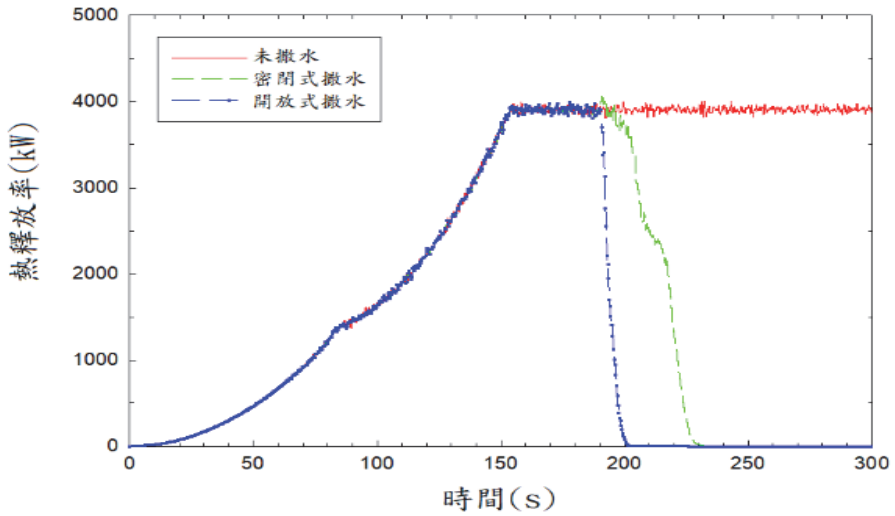


圖 8　B 區域各撒水模式之熱釋放率-時間曲線

資料來源：本研究製作。

表 20　B 區域撒水頭動作後機車火源熱釋放率（KW）

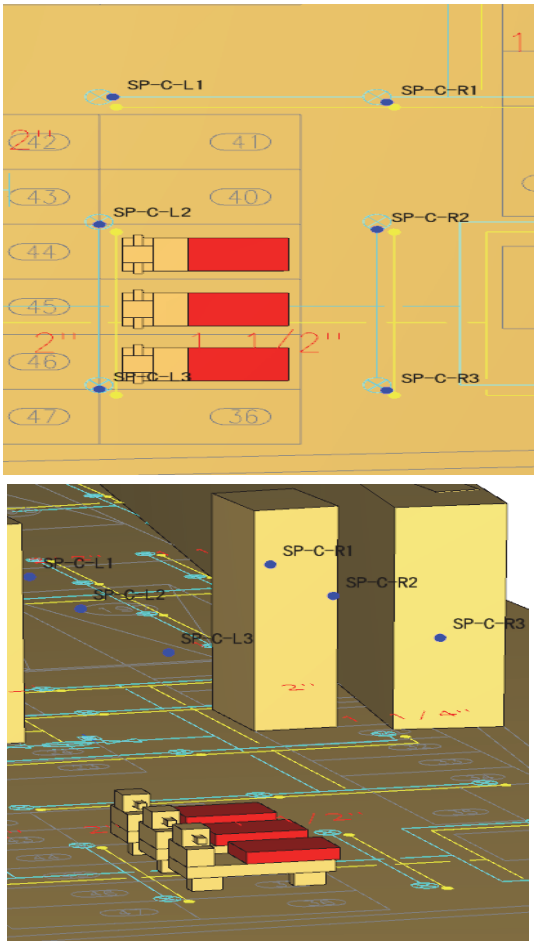
撒水頭型式		密閉式	開放式
撒水頭動作後經過時間	0 秒	3971 KW	3970 KW
	3 秒	3886 KW	3893 KW
	6 秒	4032 KW	3641 KW
	9 秒	3898 KW	1620 KW
	12 秒	3714 KW	588 KW
	15 秒	3759 KW	70 KW
	18 秒	3436 KW	0 KW
	21 秒	2830 KW	-
	24 秒	2582 KW	-
	27 秒	2336 KW	-
	30 秒	2296 KW	-
	33 秒	1836 KW	-
	36 秒	1110 KW	-
	39 秒	446 KW	-
	48 秒	5 KW	-
	51 秒	0 KW	-

資料來源：本研究整理。

三、C 區域模擬情形

C 區域（起火源機車位於 4 顆撒水頭正方形配置正中間）模擬建置情形如表 21，分別設定密閉式及開放式之撒水模式，探討其抑制機車火源燃燒情形，就撒水頭動作及熱釋放率-時間變化情形予以分析說明。

表 21　C 區域模擬建置情形

模擬圖示	模擬圖示說明
	1.中間機車（紅色圖形）為起火源機車。 2.上方及下方機車（紅色圖形）為被延燒機車。 3.撒水頭 6 顆（藍色圖形），代號說明如下： (1)右上方：SP-C-R1。 (2)右中間：SP-C-R2。 (3)右下方：SP-C-R3。 (4)左上方：SP-C-L1。 (5)左中間：SP-C-L2。 (6)左下方：SP-C-L3。

資料來源：本研究製作。

（一）撒水頭動作說明

C 區域模擬撒水頭動作順序及時間如表 22 所彙整，相較於開放式 6 顆撒水頭同時動作，密閉式僅動作 2 顆撒水頭。

表 22　C 區域撒水頭動作時間（秒）及順序

撒水頭代號	密閉式		開放式	
	動作時間	動作順序	動作時間	動作順序
SP-C-R1	-	-	218 秒	1
SP-C-R2	246 秒	2	218 秒	1
SP-C-R3	-	-	218 秒	1
SP-C-L1	-	-	218 秒	1
SP-C-L2	-	-	218 秒	1
SP-C-L3	218 秒	1	218 秒	1

資料來源：本研究整理。

（二）熱釋放率與時間

C 區域模擬結果，其熱釋放率-時間曲線如圖 9 所示，撒水頭動作後熱釋放率變化數值如表 23，不論哪一種撒水模式，皆可使熱釋放率下降，而開放式撒水頭動作至熱釋放率下降為 0 所使用時間較少，在相同啟動時間下，開放式撒水模式 6 顆撒水頭於相同時間啟動放水，其放水量大於使用密閉式撒水模式（2 顆撒水頭依序放水），故其撒水後熱釋放率下降所需時間較少，代表可越早完成滅火，相較下，密閉式撒水模式係每顆撒水頭依火源發展狀況各自啟動，撒水頭第 2 顆啟動時間較晚，故其熱釋放率下降幅度較為緩慢。

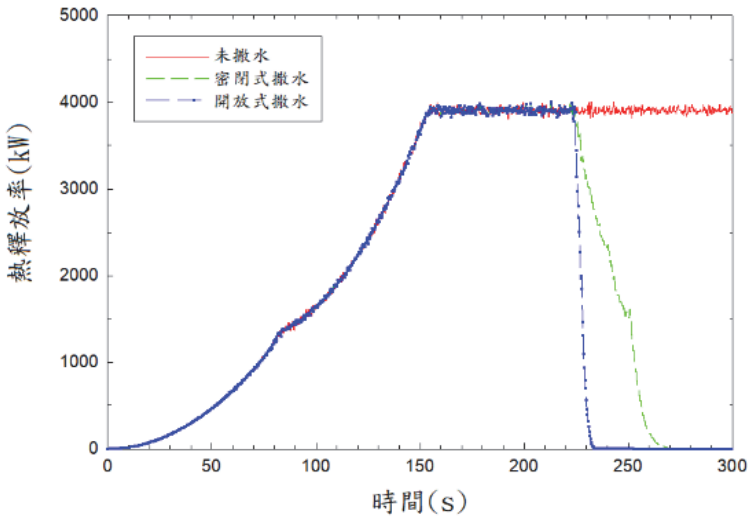


圖 9　C 區域各撒水模式之熱釋放率-時間曲線

資料來源：本研究製作。

表 23　C 區域撒水頭動作後機車火源熱釋放率（KW）

撒水頭型式		密閉式	開放式
撒水頭動作後經過時間	0 秒	3894 KW	3894 KW
	3 秒	3885 KW	3887 KW
	6 秒	3833 KW	3924 KW
	9 秒	3553 KW	1993 KW
	12 秒	3120 KW	458 KW
	15 秒	2839 KW	22 KW
	18 秒	2573 KW	0 KW
	21 秒	2311 KW	-
	24 秒	2118 KW	-
	27 秒	1765 KW	-
	30 秒	1599 KW	-
	33 秒	1525 KW	-
	36 秒	973 KW	-
	39 秒	506 KW	-
	42 秒	224 KW	-
	45 秒	112 KW	-
	48 秒	43 KW	-
	51 秒	17 KW	-
	54 秒	1 KW	-
	57 秒	0 KW	-

資料來源：本研究整理。

四、小結

A、B 及 C 區域模擬結果，本情境延燒時間設定為 70 秒，單輛機車最大熱釋放率 Q 為 1.3MW，火源成長係數 α 值設定為 0.19 KW/sec^2，經以 t-squared fires 極快速（Ultra Fast）模式計算（計算式 $Q=\alpha t^2$），達最大熱釋放率時間 t 約為 153 秒，與熱釋放率-時間曲線圖示（圖 7、8 及 9）相符。

本研究模擬所設定 A、B 及 C 區域，代表起火源機車與撒水頭水平距離遠近，最近距離為 A 區域（起火源機車位於撒水頭正下方），中等距離為 B 區域（起火源機車位於 2 顆撒水頭直線距離中間），最遠距離為 C 區域（起火源機車在 4 顆撒水頭正方形配置中間），比較各區域撒水頭開始動作時間，A 區域最早（起火後 135 秒），B 區域次之（起火後 185 秒），C 區域最晚（起火後 218 秒），顯示起火源機車距離撒水頭越近，撒水頭越早被啟動，其中 A 區域於火勢尚未達到最大熱釋率

前即開始撒水滅火，而 B 及 C 區域不論哪一種撒水模式，撒水頭開始動作時間點皆於火源達最大熱釋放率之後，故可得知起火源機車與撒水頭水平距離越近，撒水頭開始動作時間越早，可較早開始抑制火源熱釋放率成長，阻止火勢擴大。

針對開放式與密閉式撒水模式對於滅火所需時間差異，各區域模擬結果顯示，在撒水頭與起火源機車距離、撒水頭開始動作時間及放水壓力皆相同情形下，開放式對於火源熱釋放率下降所需要時間較少，表示撒水頭同時間動作數量越多，放水量越大，可縮短滅火所需時間，減少火害程度。

對於各區域密閉式撒水情境之比較，由於 A 區域撒水頭較早啟動，火源熱釋放率較早被抑制成長，故僅啟動 1 顆撒水頭，相較於 B、C 區域分別啟動 3 顆及 2 顆撒水頭，A 區域放水量較少，而使其滅火所需時間較長，反觀開放式撒水情境，不論在 A、B 及 C 區域，其滅火所需時間皆相同，顯示不論起火源機車與撒水頭水平距離遠近，開放式撒水模式具有相同滅火穩定。

伍、結論與建議

一、結論

（一）從文獻探討中發現，中國大陸及美國法規有得於停車空間設置自動撒水設備規定，國內針對自動撒水系統防護機車火災的實尺寸燃燒滅火實驗，顯示撒水系統在有效設計下，具有抑制機車火災、防止延燒的能力。

（二）依據本研究電腦模擬結果顯示，評估地下停車空間設置自動撒水系統，在不同撒水模式對滅火效率影響程度，以「開放式」撒水模式為佳，且撒水頭與機車之水平距離，亦對撒水滅火效率產生影響，相關說明如下：

1. 開放式撒水模式相對於密閉式撒水模式，其滅火所需時間較少，可大幅減少火災危害。
2. 機車起火源與撒水頭之水平距離會影響撒水頭開始動作時間，距離越近，撒水頭可以越快動作，儘早抑制火源熱釋放率成長。

二、建議

（一）對於建築物地下層機車停車空間設置自動撒水設備進行火災防護之議題，可再針對撒水頭放射壓力、防護半徑、動作時間點、水源容量、機車停放位置（牆壁、角落及柱邊等）、不同起火原因及機車裝載不同容量油料等參數進行研究分析，優化其防護機車火災效能。

（二）國內可參考國外法規標準、本研究模擬結果及相關研究成果，研擬地下停

車空間具體法規條文，以「開放式」撒水模式為主，且撒水頭與機車水平距離不宜過遠。

（三）針對泡沫滅火設備效能變差情形下，其滅火效能與自動撒水設備差異性，實務上如何將既有建築物地下層機車停車空間裝設之泡沫滅火設備，改裝為自動撒水設備（如：可行性評估、需檢討項目、調整系統設定及組件保留替換等），可進行全尺寸燃燒滅火實驗研究探討，以提升既有場所對於機車火災防護功效。

（四）有關以電能為動力來源之機車及其附設於建築物充電設施，其停車空間所適用消防滅火系統種類，可作為本研究議題之延伸。

陸、參考文獻

1. 內政部消防署，各類場所消防安全設備設置標準，民國 107 年 10 月 17 日修訂。
2. 吳舒凱，「消防泡沫液長期儲存品質檢測與性能評估」，國立交通大學，碩士論文，民國 102 年。
3. 黃文賢，「自動撒水系統水力分析驗證比較之研究—以某一商場及高層集合住宅為例」，國立交通大學，碩士論文，民國 107 年。
4. 張邦立，「自由空間下機車燃燒行為」，國立臺灣科技大學，博士論文，民國 94 年。
5. 陳建忠、張尚文、蘇鴻奇、詹家旺，「自動撒水設備對騎樓空間機車火災防護效果之實驗研究」，內政部建築研究所自行研究報告，民國 95 年。
6. 張尚文，「撒水對騎樓機車燃燒影響實驗研究」，國立臺灣科技大學，博士論文，民國 98 年。
7. 賴翊仁，「居室氣流對火災探測器與撒水頭作動的影響」，國立成功大學，碩士論文，民國 101 年。
8. 蘇芷瑤，「自動撒水系統對單一居室火場降溫之實例研究」，國立成功大學，碩士論文，民國 100 年。
9. 陳弘毅、吳嘵生，火災學，八版，鼎茂圖書出版股份有限公司，臺北市，民國 102 年。
10. 簡賢文、林慶元、沈子勝、許文勝、李婉菁、吳貫遠，「軌道系統地下場站消防安全設計之探討」，隧道建設，z2 期 Sup.:224-228，2007。
11. 楊智欽，「鐵路地下隧道及車站之防火性能設計研究」，國立交通大學，碩士

論文，民國 98 年。
12. 張曉鴿、郭印誠，「地下車庫火災過程及消防措施的研究」，工程熱物理學報 2006 年第 z2 期 vol.27，suppl.2，2006。
13. 趙永博，新北五股機車倉庫起火 30 部新機車燒到剩支架，東森新聞，2018 年 6 月 16 日，取自 https://www.ettoday.net/news/20180616/1192062.htm。
14. 許家寧，花蓮站前整排機車行大火濃煙竄十層樓高，中時電子報，2018 年 6 月 26 日，取自 https://www.chinatimes.com/realtimenews/20180626001589-260402。
15. 周敏鴻，桃園機車行火警燒毀 12 輛機車、3 人嗆傷，自由時報，2018 年 6 月 27 日，取自 http://news.ltn.com.tw/news/society/breakingnews/2471313。
16. 陳豐德，輔大旁機車行驚傳火警 4 戶全面燃燒 8 人受困，東森新聞，2018 年 6 月 28 日，取自 https://www.ettoday.net/news/20180628/1201370.htm。
17. 劉禹慶，馬公租車倉庫火警燒毀 19 輛機車鄰房 40 台冷氣全毀，自由時報，2018 年 6 月 29 日，取自 http://news.ltn.com.tw/news/society/breakingnews/2472849。
18. 華視新聞，租車行暗夜火 4 人嗆傷.11 汽機車燒毀，中華電視公司新聞，2018 年 7 月 26 日，取自 https://news.cts.com.tw/cts/society/201807/201807261932150.html。
19. 劉榮輝，台南大樓停車場火警 20 多部機車燒毀，蘋果日報，2018 年 8 月 14 日，取自 https://tw.appledaily.com/new/realtime/20180814/1410476/。
20. 林昅叡，公寓地下室機車疑自燃警消撤百名住戶，TVBS 新聞，2018 年 9 月 11 日，取自 https://news.tvbs.com.tw/world/990349。
21. 中華人民共和國，GB50084 自動噴水滅火系統設計規範，國家標準，2017 年 5 月 27 日發布，2018 年 1 月 1 日施行。
22. NFPA 13, 2016 Edition , Standard for the Installation of Sprinkler Systems , National Fire Protection Association , Quincy MA.
23. 田蒙潔，趙清德，自動撒水系統，初版，詹氏書局，臺北市，民國 98 年。
24. 邱晨瑋，「夜店火場重建模擬驗證分析之研究」，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，第一輯第 21 篇，民國 104 年。
25. Kevin McGrattan et. al , Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model , NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition Revision: FDS6.7.0-0-g5ccea76 , National Institute of Standards and Technology , 2018.

26. 陳建忠、林慶元，「建築物附設機車停車空間有關防火安全規定之研究」，內政部建築研究所研究成果，民國 93 年。
27. 內政部建築研究所，建築物防火避難安全性能驗證技術手冊，第二版，新北市，民國 105 年。
28. 鍾清松，「建築騎樓機車火災對策之研究」，國立臺灣科技大學，碩士論文，民國 89 年。
29. Unite States Nuclear Regulatory Commission , Fire Dynamics Tools （FDTs） Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program Supplement 1 Appendices , 2013.
30. Philip J. DiNenno et. al , SFPE handbook of fire protection engineering , 3rd Ed. , Society Protection Engineers , Bethesda , Maryland. , NFPA , Quincy , MA , 2002.
31. Baum, H. R., McGrattan, K. B., and Rehm, R. G.,“Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics,”Fire Safety Science, Proceedings of the 5th International Symposium, Melbourne, Australia, pp. 511-522 , 1997.
32. McCaffrey, B. J., Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results, NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, Washington D C, USA ,1979.