

建築物水系統對火災熱輻射 危害控制與驗證

研究主持人：何明錦 所長
協同主持人：鍾基強 教授
研究員：吳友烈
研究助理：陳又嘉

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 96 年 12 月

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景.....	1
第二節 研究目的.....	1
第三節 研究內容.....	2
第四節 研究方法與進行步驟.....	3
第二章 熱輻射危害.....	5
第一節 熱輻射基本論述.....	5
第二節 熱輻射對人體的危害.....	6
第三節 熱輻射的引燃.....	8
第四節 熱輻射量化分析.....	10
第三章 火災特性與水霧滅火效能.....	13
第一節 火災的成長特性.....	13
第二節 火災的能量及成長速度.....	14
第三節 水滴粒子大小之滅火效能.....	17
第四節 水霧滅火系統之定義.....	19
第五節 水霧撒水系統滅火機制.....	22
第六節 水霧滅火系統相關理論.....	24
第七節 水霧液滴產生方式.....	29
第四章 實驗規劃.....	33
第一節 實驗設備概述.....	33

第二節 實驗規劃.....	38
第五章 實驗與模擬結果	45
第一節 實驗結果.....	45
第二節 FDS 模擬結果與實驗結果比較	56
第六章 結論與建議	59
第一節 結論.....	59
第二節 後續研究建議.....	61
附錄一 期初審查會議記錄回覆情形	63
附錄二 期中審查會議記錄回覆情形	67
附錄三 期末審查會議記錄回覆情形	73
附錄四 專家學者座談會會議記錄回覆情形	79
附錄五 FDS Input Data	83
附錄六 實驗規劃表	85
參考書目	91

表次

表 2.1	物質的放射率	6
表 2.2	熱輻射值所對應的安全時間 (安全係數 $S=3$)	7
表 2.3	常見木材之引火點及發火點	8
表 2.4	木材著火所需之熱輻射量(KW/m^2)	9
表 2.5	易燃液體的閃火點溫度	9
表 2.6	木造建築之間防止熱輻射延燒之安全距離	10
表 3.1	常見的燃燒物質之燃燒率及完全燃燒熱	15
表 3.2	大尺寸油池($D>0.2m$)燃燒率估計表	15
表 3.3	火災成長係數與著火時間參考表	17
表 3.4	相同水量下水霧與標準水滴性質比較	19
表 3.5	各類滅火系統適用各種不同使用場所對照表	21
表 3.6	不同粒徑大小水霧液滴蒸發所需時間	26
表 3.7	雷射繞射粒徑分析儀詳細規格表	31
表 4.1	實驗規劃表	43
表 5.1	實驗數據整合表	50
表 5.2	3L 甲醇在同高度、不同粒徑之熱輻射值比較 (KW/m^2) ..	51
表 5.3	3L 甲醇在同粒徑、不同高度之熱輻射值比較 (KW/m^2) ..	51
表 5.4	不同粒徑的熱輻射遮蔽率比較	53
表 5.5	不同粒徑的溫度吸收率比較	54

圖次

圖 1.1	研究流程圖	4
圖 2.1	熱輻射的鏡射、反射、漫射	10
圖 2.2	輻射面與受害物距離示意圖	11
圖 3.1	火災成長曲線圖	13
圖 3.2	熱釋放率對火源成長率的差異	16
圖 3.3	水的加熱和相變化所需之熱能與溫度變化關係圖	18
圖 3.4	水霧系統吸收熱輻射示意圖	24
圖 3.5	不同粒徑大小水霧液滴蒸發所需時間圖	27
圖 3.6	雷射繞射粒徑分析儀組成圖	30
圖 3.7	雷射繞射粒徑分析儀原理示意圖	31
圖 4.1	防火工程實驗室平面圖	33
圖 4.2	防火工程實驗室前視圖	34
圖 4.3	防火工程實驗室相關儀器配置平面圖	34
圖 4.4	實驗室熱電偶與熱輻射計安裝設置示意圖	36
圖 4.5	熱輻射計	37
圖 4.6	FDS 模擬防火工程實驗室前視圖	40
圖 4.7	FDS 模擬防火工程實驗室右轉 15 度角視圖	40
圖 4.8	FDS 模擬防火工程實驗室左轉 15 度角視圖	41
圖 4.9	FDS 模擬防火工程實驗室透視圖	41
圖 5.1	不同數量燃料的熱輻射值比較	45
圖 5.2	甲醇 3 公升、粒徑 800 μ m、不同高度熱輻射值比較	46
圖 5.3	甲醇 3 公升、粒徑 200 μ m、不同高度熱輻射值比較	46
圖 5.4	甲醇 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射測量值	47

圖 5.5	甲醇 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射值遮蔽率	47
圖 5.6	正庚烷 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射測量值	48
圖 5.7	正庚烷 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射值遮蔽率	48
圖 5.8	甲醇 5 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射測量值	49
圖 5.9	甲醇 5 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射值遮蔽率	49
圖 5.10	3L 甲醇在相同粒徑但不同高度之熱輻射值比較圖	52
圖 5.11	甲醇 3 公升、撒水頭高度 2.7m 溫度圖	55
圖 5.12	正庚烷 3 公升、撒水頭高度 2.7m 溫度圖	55
圖 5.13	甲醇 5 公升、撒水頭高度 2.7m 溫度圖	56
圖 5.14	模擬與實驗所量測之熱輻射值比較	57
圖 5.15	模擬與實驗所量測之溫度值比較	58

摘要

關鍵詞：水霧系統、熱輻射、水粒粒徑。

一、 研究緣起：

在初期將火勢控制下來為減少火災擴大的最佳方法，如果無法於火災初期以有效、經濟、可行的滅火系統將火勢控制，火場會因高溫火焰所產生的熱輻射常常造成延燒及火勢擴大的情形，使火災災害擴大。目前國內外的研究顯示已漸漸注意到建築物火災所產熱輻射之危害對防火區劃影響。從國內外許多文獻可知，採用粒徑較小的水霧系統對初期火災的降溫與熱輻射控制是非常有效。不過對於建築物發生火災時採用水霧系統控制初期火災之設計參數並沒有完整本土化數據及量化指標。

二、 研究方法與過程：

我們均知「水」是目前建築物用來抑制與撲滅火災最經濟且最有效的設備。因此本研究除採取理論分析同時也進行實驗以瞭解對於不同火載量設計參數下與不同水霧系統設計參數對於火場內煙溫與熱輻射之影響。本計畫針對水霧系統所欲探討之設計參數有粒徑大小、水頭與火源距離及不同水頭數量等重要設計項目，研究成果對於未來建築物採用水霧系統做為初期火災控制設備之規定將可提出具體方案。

探討水霧系統於建築物發生火災時，欲達成初期滅火功能之有效設計參數及各參數之影響範圍。研究內容有：

1. 探討區劃內水霧撒水頭高度對火源熱輻射及滅火時間之影響。

2. 探討區劃內水霧系統之噴撒粒徑對建築物火源熱輻射及滅火時間之影響。

三、重要發現：

本研究結果顯示，使用 200 μm 到 800 μm 粒徑大小的水霧撒水系統，在火場中的確能有效吸收與阻隔熱輻射值與溫度，且在相關文獻中也證實水霧系統對滅火也有相當卓越的成效，所以水霧撒水系統的裝設對於人員避難及防止延燒確實有相當大的幫助。

由實驗證明，在相同裝設高度，粒徑 200 μm 的水霧比粒徑 800 μm 的水霧更能吸收與阻擋熱輻射。如：撒水頭裝設在 2.7m 時，使用粒徑 200 μm 的水霧比粒徑 800 μm 的水霧約增加 35% 的吸收與遮蔽的效果。若裝設在不同高度，裝設的高度升高，其吸收與遮蔽的效果反而會降低。如：使用粒徑 200 μm 的水霧裝設在 2.1m 升高到 2.7m 時，降低約 14% 吸收與遮蔽的效果。由此可知水霧撒水系統中，「粒徑」的選擇會造成最大的影響。

比較水霧撒水系統與傳統撒水頭對熱輻射的遮蔽率，由實驗結果發現，在火災初期使用粒徑 200 μm 到 800 μm 的水霧撒水系統約有 50~65% 的遮蔽率，而傳統撒水頭只有 10% 左右的遮蔽率，水霧撒水系統對熱輻射的遮蔽率大約是傳統撒水系統的五~六倍。

四、主要建議事項：

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、內政部消防署

為討論粒徑之效應對水霧效能之影響，因此利用自行開發製

作之撒水頭以便產生不同粒徑大小，然而相對在噴撒條件上也受到限制，未來可以針對市售撒水頭且一次以多個為一組進行實驗，所得到的數據將更為實用。

在本研究中採用甲醇與正庚烷為燃料之池火源，建議可針對日常生活中容易引發火災的電器設備及其他液態燃料進行比較研究，可了解對於不同類型火源，水霧撒水系統效能與抑火機制之差異與限制。

火災現場若有人員逃生之情況，則水滴粒徑及汽化量須考量大量熱蒸汽對人員傷害及視線之遮蔽。撒水頭與火源的相對位置，並未在本實驗中考量，可增加此參數以作為未來區劃規劃之參考。

FDS 撒水的模擬結果可能無法直接和水霧的實驗結果作比較，英國有一套軟體 FIREDASS 是模擬水霧滅火效能，建議後續研究可使用並納入探討。

長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、內政部消防署

實際的火場中，除了水霧放水量大小外，水霧滴在蒸發前能吸收和遮蔽多少熱輻射值與溫度，此將會影響水霧滅火之效能，尤其是靠火焰及燃料表面吸熱冷卻作為主要滅火機制之情況，建議後續研究可納入探討。

從工程實務的觀點上來看，本研究可延伸探討熱輻射對建材強度的影響，了解在火場中建築物受熱輻射所造成的損害，分析

是否可以藉由水霧撒水系統減少熱輻射對建材的傷害以減少對人員逃生時有可能發生之危害，進而提出實際建築案例之水霧系統應用最佳設計。

細水霧所實驗過的尺寸可容許使用在比初始實驗環境更小的環境之中，所以 scale factor 需要考慮。若有考慮中介變數的量測，如：氧的濃度被稀釋了多少、水的密度...等等，會使實驗更加準確。不同的燃料會產生不同的煙霧，例如正庚烷比甲醇的煙更大，是否會影響實驗結果，建議可列入未來實驗規劃中。

建議未來實驗中能探討接近閃燃狀態之火災，撒水頭標準放水量下，放水壓力 1kgf/cm^2 時，滅火控制過程之熱輻射效應，以及在區劃中無灑水狀況，開口部或區劃交界處撒水作用下熱輻射之差異性。

粒徑小受 fire plume 影響應會較大，但在火災成長期隨時間變化輻射熱也隨之變大，應有以溫度或熱輻射值為固定值，觀察 fire plume 現象，是否粒徑大小受火焰或 fire plume 影響較大，此時再來探討高度對粒徑之影響。水壓力大小會對空間熱煙壓力產生變化，而後續吸熱效果才會明顯有滅火跡象，而壓力大才能侷限火災延燒，建議後續對堆積可燃物進行探討。

ABSTRACT

Keywords : water mist system 、 thermal radiation 、 droplet size

The best way for controlling fire is to suppress fire at the beginning of fire. Without appropriate control fire development, the fire radiation may cause the fire growing fast and vast disaster. Now, how to prevent the fire radiation is a popular topic for the fire researchers.

Using the water to control the fire temperature and radiation is a very effective method. However, no quantity and domestic design parameters for the building designers can adopt for water system design. Therefore, this project uses both theoretical and experimental methods to understand the application of water system in controlling fire temperature and radiation.

The examine parameters have water droplet size, distance between nozzle and fire source, and number of nozzles. The results are useful for applying the water system to control the beginning fire in buildings.

The fields of studying parameters for water systems are:

1. Study the effect of nozzle heights on radiation and time of fire extinguishment.
2. Study the effect of water droplet sizes on radiation and time of fire extinguishment.

第一章 緒論

第一節 研究背景

目前國內積極推動性能式防火工程技術與性能式防火法規，在因應國內複合用途的建築物增加與為了確保建築物防火避難安全為前提之下，個別採用「建築物防火避難安全性能驗證技術」。而在建築物火災人員的避難逃生過程中，無時無刻不受到煙與熱的威脅，若僅以完成居室避難所需的時間會不會超過煙層下降的時間來作為評斷避難逃生的成功與否，似乎不夠周延。

在避難逃生的路徑上，人員受到火災燃燒產生的熱能量影響，可能會造成身體或呼吸道損傷，而造成避難行動的失敗。其中火災燃燒產生的熱能量傳遞方式不外乎熱傳導、熱對流、熱輻射三種。當中的熱輻射不需要傳播媒介，即能將熱量傳播出去。當熱輻射造成皮膚溫度超過 44°C 或熱輻射值超過 $1.7\text{KW}/\text{m}^2$ 時會立即產生身體上的傷害¹。所以當火災發生時，避難者經過避難逃生路徑的熱煙層區或受火害的防火鐵捲門周遭時，可能會因熱輻射影響而造成避難者受傷因而無法安全離開火場。

第二節 研究目的

水霧系統具有無環境污染、滅火迅速、耗水量低及對防護對象損害率小等優點，已被廣為研究並逐漸應用在各種場所作為滅火系統使用。然而迄今為止，水霧系統對於熱輻射之控制並沒有相關之標準或規範可供依循，造成在設計、施工或驗收上，沒有統一的規範可以確認系統之性能與可靠度。主要原因是由於水霧系統滅火機制之相關影

響參數較多且複雜，有些參數並具有交互影響作用，尤其是水霧粒徑大小、裝設高度之限制等效應，需透過進一步之研究分析及實驗測試來找出水霧系統之最佳設計參數。

為瞭解水霧系統應用在室內建築物火災熱輻射控制之可行性，本研究即是針對水霧系統之基本特性及其火場控制應用技術進行研究，主要研究範圍包含水霧粒徑及撒水頭裝設位置距火源高度等對水霧系統抑火效應之影響，透過理論探討與實際全尺寸實驗研究，找出不同水霧粒徑滅火機制及差異、在不同粒徑大小之水霧系統滅火效應影響及不同水霧粒徑大小在不同撒水頭裝設高度對滅火機制和效應之影響。希望藉由此研究之進行能找出最佳水霧滅火粒徑及在相關粒徑大小下最佳裝設撒水頭高度位置，開發出可應用於室內建築物之水霧系統以創造國內消防系統之商機，同時提供更為安全的防火安全保障。

第三節 研究內容

在國內外研究中，提到將防火鐵捲門塗佈防火漆以隔絕熱輻射的方法，但經實驗證明，塗佈防火漆雖能將非曝火面背溫降至 400°C 左右，但未考量防火鐵捲門一般使用情形為收捲式，一旦收捲壓縮，塗佈在之上的防火漆非常容易掉落，隔熱效果當然成效不佳。而從國內外許多文獻可知，採用粒徑較小的水霧系統對於火災的降溫與熱輻射控制非常有效。我們均知水霧系統是目前建築物用來抑制與撲滅火災最經濟且最有效的設備。因此本研究除採取理論分析同時也進行實驗以瞭解對於不同火載量設計參數下與不同水霧系統設計參數對於火場內煙溫與熱輻射之影響。

第四節 研究方法與進行步驟

本研究實驗之部分將在實驗區裝設一水霧撒水頭，並在其周圍架設熱電偶樹，用來量測火場溫度的變化，同時為產生不同粒徑大小之水霧滴，透過變頻式加壓泵浦壓力的改變及不同撒水頭來控制水的流量及粒徑大小，並利用雷射繞射粒徑分析儀量測水霧粒徑大小。

實驗中將使用自行開發之水霧撒水頭，為了產生不同之水霧噴撒粒徑，透過變頻式壓力泵浦來調整實驗過程中水的壓力，以得到不同之水霧粒滴直徑，來進行不同水霧粒徑大小對於滅火效能之影響及其他影響參數之交互作用，配合不同工作壓力以產生粒徑範圍 $D_{v0.9}$ 分別為 800 和 200 μm ，並紀錄相關的水霧放射條件（所需工作壓力、流量），以便進行不同水霧滴粒徑大小與放射壓力及工作流量對水霧系統滅火效能之影響研究。

水霧系統之滅火效能將從實際火源撲滅時間與火場空間溫度變化情形進行比較探討。滅火時間是指從水霧開始撒水一直到火源被完全撲滅為止之間的時間，配合影像處理系統觀察實驗過程中火源燃燒狀況與最後火源撲滅之時間，所有實驗完成後再進行性能比較分析。承上所述，本研究流程可如圖 1.1 所示：

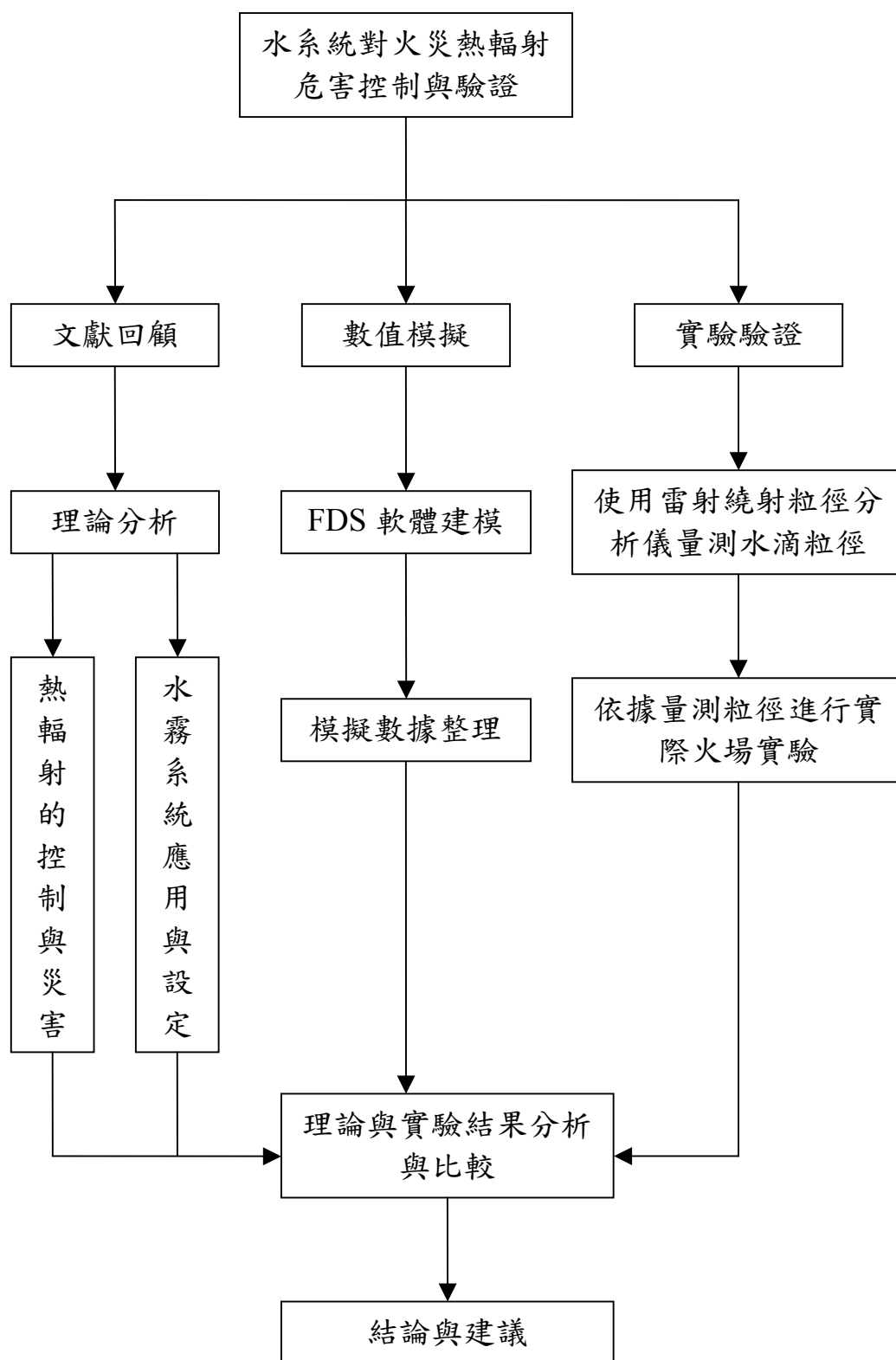


圖 1.1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 熱輻射危害

第一節 熱輻射基本論述

熱輻射是有限溫度的物體放射出能量，雖然主要是針對固體表面的輻射，但液體及氣體仍會有輻射熱產生。熱輻射是靠電磁波傳遞能量。在熱傳導或熱對流中，能量的傳遞需經由介質做為媒介，但熱輻射卻不需要，而事實上熱輻射在真空區域的效率較高。

由表面放射出的熱輻射是起源於具熱能的物體表面，可由史蒂芬-波茲曼定律² (*Stefan-Boltzmann Law*) 表示：

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.1)$$

E ：每單位面積的熱輻射值 (W/m^2)

T_s ：表面的絕對溫度 (K)

σ ：史蒂芬-波茲曼常數 ($5.6696 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

ε ：表面的放射性質，稱為放射率，其值介於 0 與 1.0 之間

表 2.1 為常用的 ε 值³，與表面材質、加工情況有很大的關係。以此公式計算火場中的熱輻射值時，如果與火源之間並沒有存在任何的遮蔽物，則可視為黑體 (*blackbody*)， ε 值為 1.0。若當中存在著如：防火鐵捲門或玻璃等物質，則依其材質的不同可查出合適的 ε 值代入公式之中求得較正確的熱輻射值。

表 2.1 物質的放射率

<i>Metals</i>			<i>Nonmetals</i>		
<i>Surface</i>	<i>Temp. (°C)</i>	ϵ	<i>Surface</i>	<i>Temp. (°C)</i>	ϵ
Aluminum			Asbestos	40	0.93-0.97
Polished, 98% pure	200-600	0.04-0.06	Brick		
Commercial sheet	90	0.09	Red, rough	40	0.93
Heavily oxidized	90-540	0.20-0.33	Silica	980	0.80-0.85
Brass			Fireclay	980	0.75
Highly polished	260	0.03	Ordinary refractory	1090	0.59
Dull plate	40-260	0.22	Magnesite refractory	980	0.38
Oxidized	40-260	0.46-0.56	White refractory	1090	0.29
Copper			Carbon		
Highly polished electrolytic	90	0.02	Filament	1040-1430	0.53
Slightly polished to dull	40	0.12-0.15	Lampsoot	40	0.95
Black oxidized	40	0.76	Concrete, rough	40	0.94
Gold: pure, polished	90-600	0.02-0.035	Glass		
Iron and steel			Smooth	40	0.94
Mild steel, polished	150-480	0.14-0.32	Quartz glass (2 mm)	260-540	0.96-0.66
Steel, polished	40-260	0.07-0.10	Pyrex	260-540	0.94-0.74
Sheet steel, rolled	40	0.66	Gypsum	40	0.80-0.90
Sheet steel, strong rough oxide	40	0.80	Ice	0	0.97-0.98
Cast iron, oxidized	40-260	0.57-0.66	Limestone	400-260	0.95-0.83
Iron, rusted	40	0.61-0.85	Marble	40	0.93-0.95
Wrought iron, smooth	40	0.35	Mica	40	0.75
Wrought iron, dull oxidized	20-360	0.94	Paints		
Stainless, polished	40	0.07-0.17	Black gloss	40	0.90
Stainless, after repeated heating	230-900	0.50-0.70	White paint	40	0.89-0.97
Lead			Lacquer	40	0.80-0.95
Polished	40-260	0.05-0.08	Various oil paints	40	0.92-0.96
Oxidized	40-200	0.63	Red lead	90	0.93
Mercury: pure, clean	40-90	0.10-0.12	Paper		
Platinum			White	40	0.95-0.98
Pure, polished plate	200-590	0.05-0.10	Other colors	40	0.92-0.94
Oxidized at 590°C	260-590	0.07-0.11	Roofing	40	0.91
Drawn wire and strips	40-1370	0.04-0.19	Plaster, rough lime	40-260	0.92
Silver	200	0.01-0.04	Quartz	100-1000	0.89-0.58
Tin	40-90	0.05	Rubber	40	0.86-0.94
Tungsten			Snow	10-20	0.82
Filament	540-1090	0.11-0.16	Water, thickness ≥ 0.1 mm	40	0.96
Filament	2760	0.39	Wood	40	0.80-0.90
			Oak, planed	20	0.90

(資料來源：參考文獻 3)

第二節 熱輻射對人體的危害

由文獻可知，當人類的皮膚在超過 44°C、1.7 KW/m² 的環境下便會受到傷害，依受害程度不同而造成輕度、重度灼傷，甚至於死亡。可由公式 2.2¹ 得知在有限熱輻射值下皮膚的容許安全時間，此公式可使用在 1.7 到 20 KW/m² 範圍之間。

$$t_p = \frac{250}{S} q_R^{-1.9} \quad (2.2)$$

t_p ：皮膚未受到傷害的安全時間(sec)

q_R ：熱輻射值(KW/m²)

S：安全係數，一般取 2 或 3 為安全值。

表 2.2 熱輻射值所對應的安全時間（安全係數 S=3）

熱輻射值(KW/m ²)	安全時間(sec)
2.0	22.33
3.0	10.33
4.0	5.98
5.0	3.92
6.0	2.77
7.0	2.07
8.0	1.60
9.0	1.28
10.0	1.05

（資料來源：本研究整理）

由表 2.2 可知，當熱輻射值達 3.0 KW/m² 時，皮膚暴露超過 10 秒就會造成傷害，而達 7.0 KW/m² 時，暴露超過 2 秒即會燒傷。本研究的目的即在於降低熱輻射，使人員能夠在較低的溫度以及有更多的時間可以從火場中逃生。

第三節 熱輻射的引燃

火場中，傢俱是造成火勢加遽的原因之一。而引燃這些大多為木質材料的傢俱的原因，除了火焰直接燃燒以外，就是火場中的熱輻射造成溫度增加且高於物質的燃點而被點燃的。以木材的引火點平均約 260°C 來考慮⁴，熱輻射值大約在 4.0~5.0KW/m²，所以在此熱輻射值之下便可認為尚未引燃傢俱等木質物品。一般來說溫度越高，引火所需時間越短。不過依條件不同，在 157°C~195°C 的低溫之下，也有可能引火，稱為「低溫著火」⁴。由以前的經驗可知，容易造成木材低溫著火的地方如下所列：

1. 煙囪等貫穿之屋頂
2. 爐灶等接近之壁體，底面之木台等
3. 乾燥室內蒸氣管接觸之部分
4. 三溫暖室暖爐等熱源之周圍

表 2.3 常見木材之引火點及發火點

種 類	引火點(°C)	發火點(°C)
杉	240	435
檜木	253	446
針松	262	437
桂樹	270	455
櫟	264	426
七葉樹	264	406
白樺	263	438
桐樹	269	435

(資料來源：參考文獻 4)

表 2.4 木材著火所需之熱輻射量(KW/m²)

受熱時間	新木材	舊木材
持續 8 分鐘	7.0	4.0
持續 20 分鐘	4.0	2.5

(資料來源：參考文獻 4)

另外，在加油站、化學工廠、爆竹工廠等存放大量易燃物品的特殊場所，尤其應該注意熱輻射的影響。其中以化學工廠更要特別注意，因為化學工廠與加油站雖然都是存放有機化學易燃物，但是一般而言，加油站均處於開放式的空間，而化學工廠大多都是較封閉的，所以工廠內的氣體濃度較高，當受到熱輻射的影響使溫度產生變化時，容易因溫度高於易燃物的閃火點而引燃造成災害、損失。由表 2.5⁵可明顯看出汽油、酒精的閃火點都很低，所以相對的熱輻射值過高很容易將其引燃。

表 2.5 易燃液體的閃火點溫度

Automotive Fluid	Flash Point(°C)
Gasoline	-38
Diesel fuel	52
Brake fluid	115
Motor oil	210
Power steering fluid	177
Ethylene glycol(100%)*	111
Methanol(100%)*	11
Ethanol(100%)*	12

*These fluid are mixed with water and the mixture flash point depends on the mixture ratio.

(資料來源：參考文獻 5)

本研究考慮熱輻射對人體危害的同時，也一併將熱輻射對於物質的引燃加以考慮，希望藉由熱輻射的控制可以同時達到保護人員逃生安全及減少火場延燒與財物損失。

第四節 熱輻射量化分析

熱輻射的大小與輻射熱源的面積大小、溫度高低、時間長短有關，當熱源面積越大、時間越長，所產生的熱輻射值越大。再加上熱輻射並不是只對單一方向有所影響，而是以放射狀對周圍的環境造成溫度的升高，如圖 2.1 所示。

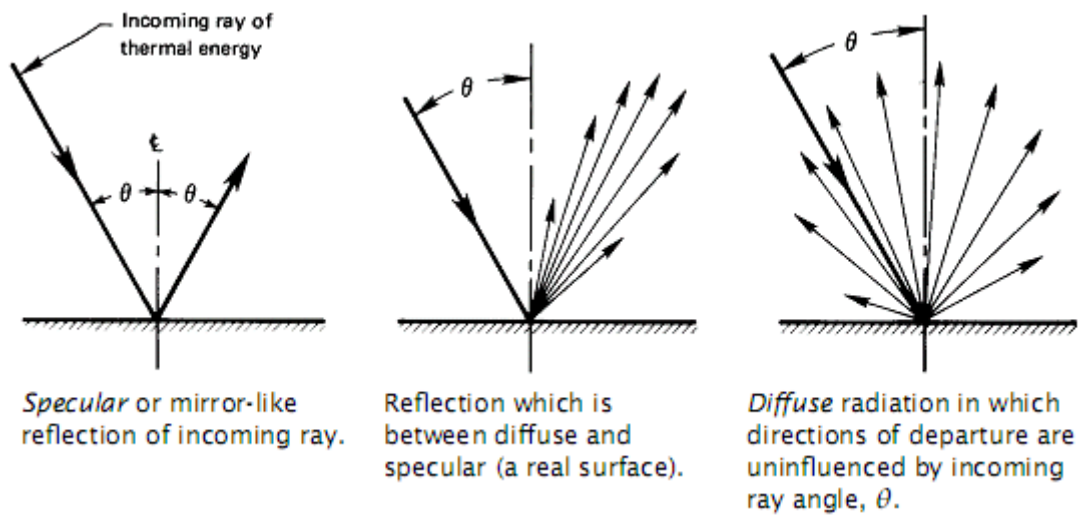


圖 2.1 熱輻射的鏡射、反射、漫射

(資料來源：參考文獻 3)

依前節所言，一般木造物表面溫度超過 260°C 即有發生延燒的可能。而兩建築物若外壁皆為木材時，防止熱輻射延燒的安全距離如下表 2.6。

表 2.6 木造建築之間防止熱輻射延燒之安全距離

火焰寬度(m)	火災房屋	
	平房(高 5m)	二層建築(高 10m)
16	15	21
8	11	16
4	8	10.5

(資料來源：參考文獻 4)

所以當熱輻射所到達的距離越遠，危害範圍也就越大。但是相對的，離輻射熱源越遠，其熱輻射值越低。由文獻可知實際的熱輻射值是熱源的熱輻射值乘上一個形狀係數(*configuration factor*)，而形狀係數與火焰高度、火盆大小、距受害物或儀器的距離有關。

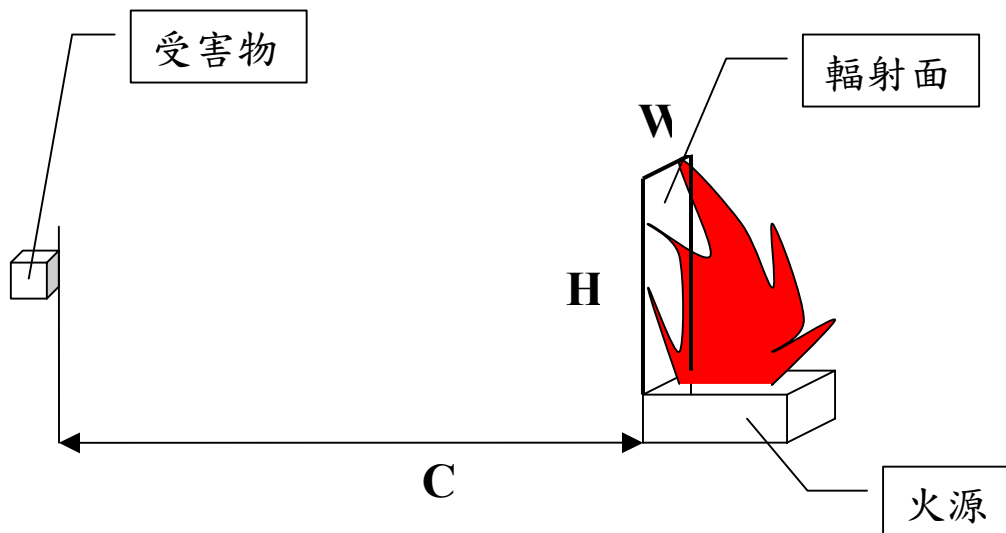


圖 2.2 輻射面與受害物距離示意圖

(資料來源：本研究整理、參考文獻 6)

如圖 2.2⁶ 所示，其中的 W 是火源的寬度，亦等於火盆的寬度； C 是指火源與受害物的距離；而 H 是指火焰的高度，可由經驗公式 2.3⁷ 求得：

$$H = 0.235\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2.3)$$

H ：火焰高度(m)

\dot{Q} ：熱釋放率(KW)

D ：火源直徑(m)

W 、 H 、 C 為已知後，便可由公式 2.4⁸ 得到形狀係數(F)

$$F = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right] \quad (2.4)$$

其中

$$X = \frac{H}{C} \quad Y = \frac{W}{C}$$

求得係數 F 後，可由公式 2.1 計算火源的熱輻射值，將係數 F 乘上其值，便可得到熱輻射的估計值。

熱輻射的量化分析是由燃料的熱釋放率與其受害的距離來推算的，如：甲醇的熱釋放率約為 500KW，由公式 2.5⁷ 可計算出距離火源 2m 處的熱輻射值約為 1.49 KW/m²，若距離 1m 則熱輻射值增加至 5.97 KW/m²。而正庚烷的熱釋放率約 3345KW，由公式 2.5 可計算出距離火源 2m 處的熱輻射值約為 9.98 KW/m²，若距離 1m 則熱輻射值增加至 39.9 KW/m²。

$$\mathcal{Q} = \frac{\chi_r \mathcal{Q}}{4\pi R_0^2} \quad (2.5)$$

\mathcal{Q} : 熱輻射值(KW/m²)

χ_r : 常數，依燃料產生的煙多寡而定，約 0.15~0.6

\mathcal{Q} : 熱釋放率(KW)

R_0 : 以火源為中心的熱輻射放射圓的半徑距離(m)

第三章 火災特性與水霧滅火效能

第一節 火災的成長特性

火災是一種物理及化學變化構成的反應，所經歷的時間與火場溫度變化可以用圖 3.1 來表示，其成長共分成五個時期：

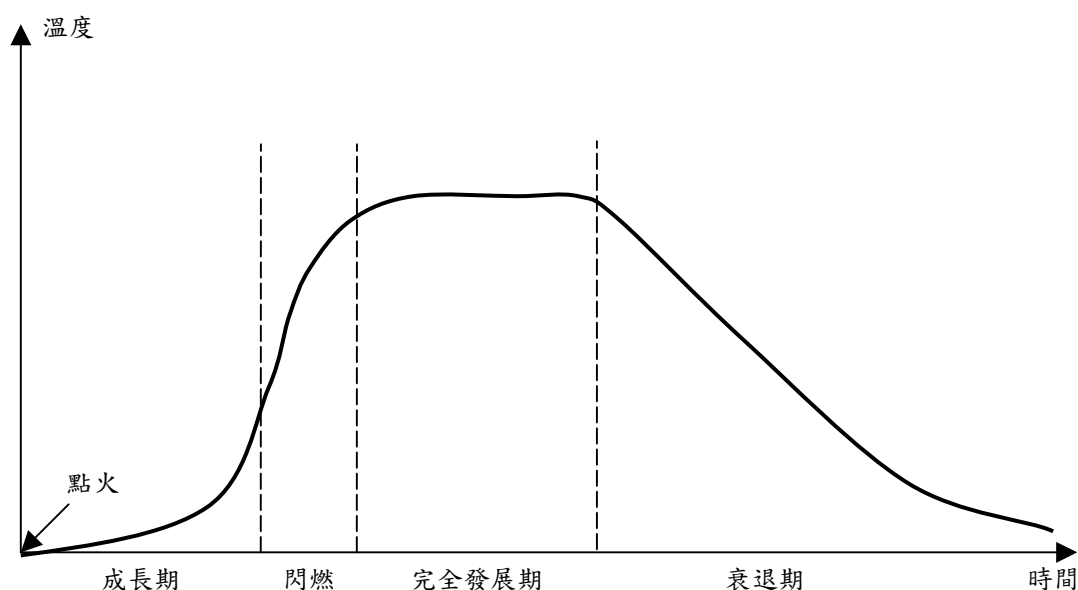


圖 3.1 火災成長曲線圖

(資料來源：本研究整理、參考文獻 7)

1. **點火(Ignition)**：以火焰造成環境溫度提升或使物質燃燒。
2. **成長期(Growth)**：因為燃燒的型態、燃燒的種類、供氧的程度不同，所以火焰的成長速度不一致。一般來說，在此時期因為火源範圍尚未擴大，因此溫度較低。若發生在建築物內部則由於不完全燃燒而產生大量濃煙。

3. **閃燃期(Flashover)**：由於不完全燃燒之可燃性蒸汽散佈於空氣中達一定量，遇燃燒所生成之熱量，則瞬間引燃空氣中的可燃物蒸汽，形成一片火海，此即為閃燃現象。
4. **完全發展期(Fully developed fire)**：火災於閃燃現象發生後，高溫促使燃燒反應速度加快，並釋放出大量的熱。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，並且呈現小幅度變化現象。
5. **衰退期(Decay)**：當燃料逐漸耗盡，其能量釋出減少，導致空間內氣體平均溫度下降。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。

第二節 火災的能量及成長速度

不同的燃燒物質會有不同的熱釋放率，其大小可由公式 3.1 求得

$$\dot{Q} = A_f \dot{m}'' X \Delta H_c \quad (3.1)$$

\dot{Q} ：熱釋放率(MW)

A_f ：燃料燃燒表面積(m²)

\dot{m}'' ：燃燒質量損失率(kg/m²s)

X ：燃燒效率

ΔH_c ：完全燃燒熱(MJ/kg)

其中 \dot{m}'' 可由經驗公式(3.2)或查表求得

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k\beta D}) \quad (3.2)$$

表 3.1 常見的燃燒物質之燃燒率及完全燃燒熱

材質--()內的數值為實驗的油池直徑	$m\%$ (kg/m ² s)	ΔH_c (MJ/kg)
Polyethylene 聚乙烯	0.026	43.6
Polypropylene 聚丙烯	0.024	43.4
Kerosene (30-80m) 煤油	0.065	44.1
n-Hexane (0.75-10m) 正己烷	0.077	44.8
n-Heptane (1.2-10m) 正庚烷	0.075	44.6
Polystyrene (0.93m) 聚苯乙烯	0.034	39.2
Xylene (1.22m) 二甲苯	0.067	39.4
Benzene (0.75-6.0m) 苯	0.081	40.1
Methanol (1.2-2.4m) 甲醇	0.025	20
Acetone (1.52m) 丙酮	0.038	29.7

(資料來源：參考文獻 7、8)

表 3.2 大尺寸油池(D>0.2m)燃燒率估計表

材料	密度(kg/m ³)	$m\%$ (kg/m ² s)	ΔH_c (MJ/kg)	$k\beta$ (m ⁻¹)
Liquid H ₂	70	0.017	120.0	6.1
Methanol	796	0.017	20.0	a
Ethanol	794	0.015	26.8	b
Butane	573	0.078	45.7	2.7
Benzene	874	0.085	40.1	2.7
Hexane	650	0.074	44.7	1.9
Heptane	675	0.101	44.6	1.1
Xylene	870	0.09	40.8	1.4
Acetone	791	0.041	25.8	1.9
Dioxane	1035	0.018	26.2	5.4 ^b
Gasoline	740	0.055	43.7	2.1
Kerosine	820	0.039	43.2	3.5

a Value independent of diameter in turbulent regime.

b Estimate uncertain, since only two points available.

(資料來源：參考文獻 7、8)

在前一章有提到一個概念：「對於火場與熱輻射的控制主要要求在儘速撲滅火源或不讓其達到閃燃，同時也為了知道何時應該啟動滅火設備。」而閃燃的物理現象是在一個很短暫的時間使得火場內溫度迅速升高，為了知道所產生的熱釋放率，可以用“*T-squared fire*”的公式(3.3)⁷，代入火災成長時間以及成長係數求得熱釋放率。

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (3.3)$$

\dot{Q} ：火源熱釋放率(KW)

α ：火源成長係數(KW/s²)

t ：著火時間(sec)

T-squared fire 依火源成長速率可區分成 *Ultra fast*、*Fast*、*Medium*、*Slow* 四種成長曲線，如圖 3.2 所示。

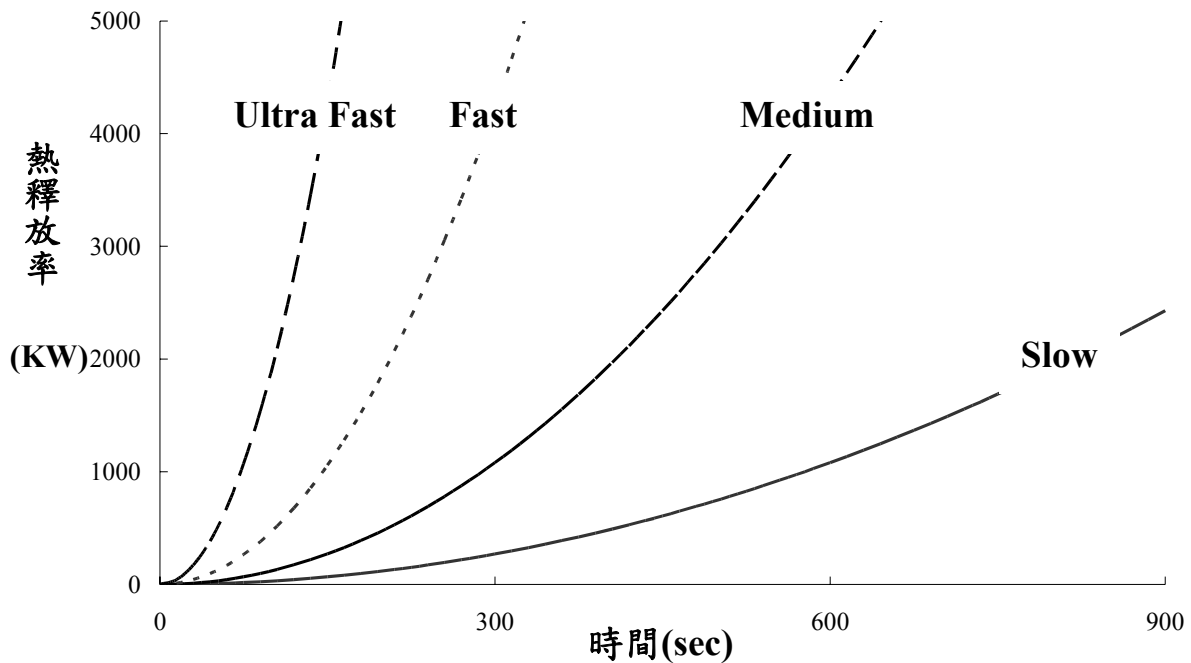


圖 3.2 熱釋放率對火源成長率的差異

(資料來源：參考文獻 7)

表 3.3 火災成長係數與著火時間參考表

種類	$\alpha(\text{kW/s}^2)$	$t_0(\text{s})$
Metal wardrobe 41.4 kg (total)	0.422	10
Chair F24 , 28.3 kg	0.0086	400
Chair F29 , 14.0 kg	0.1055	70
1/2 inch plywood wardrobe w/ fabrics 68.8kg	0.8612	20
Loveseat metal frame w/foam cushions , 54.6 kg	0.0086	500
Easychair , 23.02 kg	0.1876	3700

(資料來源：參考文獻 7、8)

第三節 水滴粒子大小之滅火效能

從前一章可知熱輻射對於火場或人員都會造成很大的影響。在火勢尚未達到閃燃期(*Flashover*)之前，對於火場與熱輻射的控制主要要求儘速撲滅火源或不讓其達到閃燃，同時也為了知道何時應該啟動滅火設備。但是對於已經達到閃燃或是完全發展(*Fully developed fire*)的火勢，則是要求能控制熱輻射的範圍以及防止熱輻射對人員逃生或消防人員所造成的危害。

長久以來「水」一直是最重要的滅火工具，且其優越的滅火性很難被取代，這主要是水的熱力特性使水成為大多數型態火源很理想的滅火劑，特別是在侷限空間的火源上，它可以直接吸收熱量無論是火焰本身、燃燒所產生或是燃料表面等熱量。由液態水到水蒸氣的相變化過程在吸收熱能上特別有效，同時所產生的大量水蒸氣可以減少周遭空氣的含氧量並進一步幫助滅火。

水具有相當高的蒸發潛熱，使一公升的水由 0°C 升高至 100°C 需

要提供 418KJ 的熱量，另外將其變成水蒸氣則需要提供 2257KJ 的熱量。而蒸發只會在液體的表面發生，所以在理論上每單位體積的水有較大的表面積將會有較好的滅火效能。然而在實際上在一般的火災中撒水，相對較大的水滴只有小比例能夠透過蒸發帶走最大的潛熱，大部分會保持在液態，但大水滴較容易穿越火焰到達燃料表面；相反的假如水滴非常的細小則會被迅速的蒸發，然水滴卻沒有足夠的動量穿越火焰，滅火效率將會減少。不過較小的水滴粒子也由於其重量較小，停留在起火空間中的時間較長，相對吸收熱量的時間也較長。

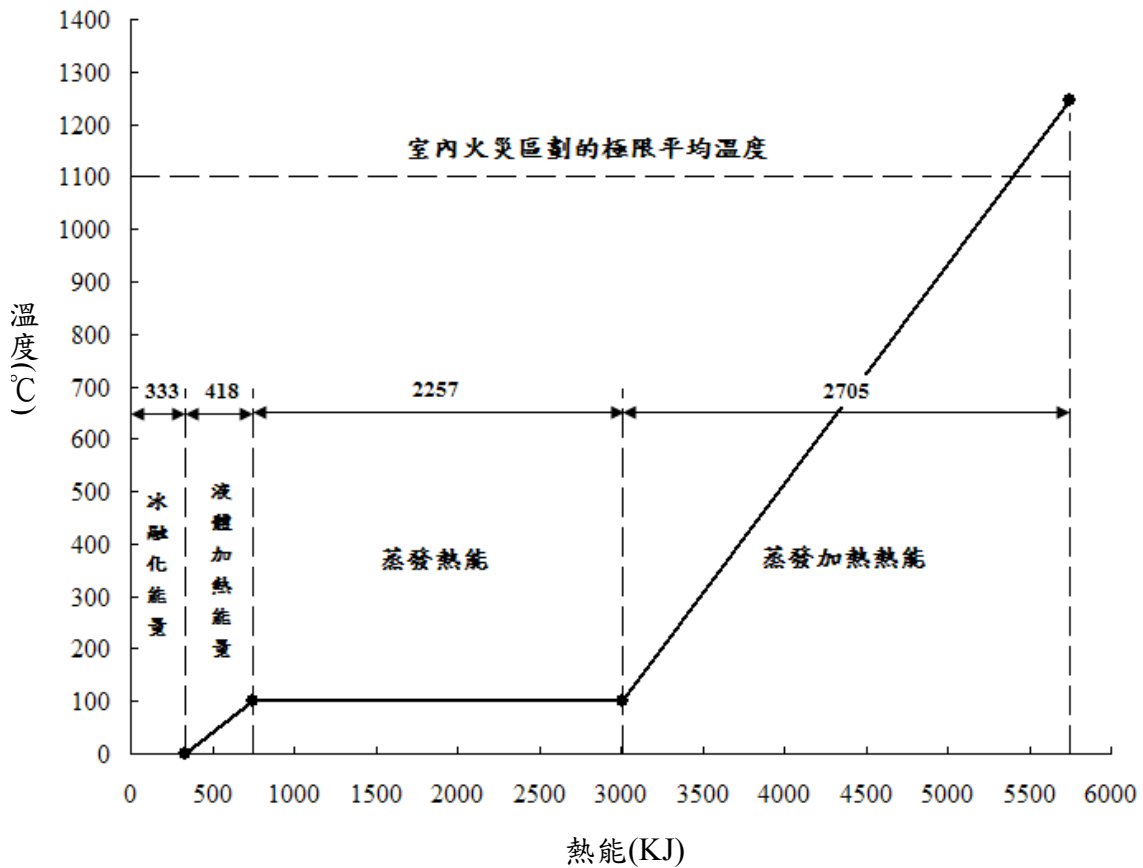


圖 3.3 水的加熱和相變化所需之熱能與溫度變化關係圖

(資料來源：參考文獻 9)

第四節 水霧滅火系統之定義

水霧(Water Mist)滅火系統自 1940 年代開始發展，主要是利用水霧撒水頭在一定壓力下將水分解為細小霧滴，進而發揮火場及火源冷卻、氧氣置換及輻射阻絕等滅火機制。

依照美國防火協會 NFPA 750¹⁵ 對於水霧系統之定義為：水霧系統是距撒水頭下方 1m，在最小操作壓力下能產生水氣霧滴累積體積分佈 99% 之粒滴直徑小於 1000 微米，但是並沒有進一步規範最佳使用粒徑或是相關使用條件限制，而且現行水霧系統滅火對熱釋放率影響之考量及相關消防法規規範都只針對水量大小的部分，並無探討粒徑大小之效應，因此在考量水霧滅火系統其抑火效能及應用範圍時，有必要將粒徑大小之效應參數加以考量。

由前面的描述可以發現，水霧滅火系統對於抑火效能及其特性會受相關參數條件的影響而相當複雜，其中受水滴粒徑的尺寸大小、火源燃燒情況的影響最為顯著。

表 3.4 相同水量下水霧與標準水滴性質比較

	細 水 霧	標 準 水 滴
水滴數量	水滴粒子較多	水滴粒子較少
水滴面積	水滴總表面積較大	水滴總表面積較少
蒸發程度	大部分水滴蒸發為水蒸氣	大部分水滴未蒸發
滅火方式	蒸氣吸收熱量並降低其溫度	水滴佈滿可燃物表面來吸收熱量

(資料來源：參考文獻 10)

美國國家防火協會(NFPA)所制定之 NFPA 750¹⁵ 中，列出 5 項水霧滅火系統設計之功能目標如下：

1. 撲滅火勢：水霧可抑制火勢並進一步有效撲滅火勢，使火場中無燃燒狀況。
2. 抑制火勢：水霧可有效降低火場熱釋放率，使可燃物不再復燃。
3. 控制火勢：噴撒火場鄰近未燃物，預先冷卻防護，控制火勢成長。
4. 控制溫度：可降低室內溫度維持出入口安全性，減低高溫對逃生者的危害。
5. 防止延燒：噴撒火場鄰近未燃物，延遲其引燃之時間。

水霧滅火系統適合用於 A、B 類火災，依據中華民國國家標準 CNS 3658，水霧應用於各類火災之特性說明如下：

A 類：指建築物、家具等的木材、紙張、棉織物、纖維物、裝飾物品、塑膠、橡膠等之固體可燃物質火災

B 類：指石油類、油漆類、植（動）物油類、有機溶劑類等可燃液體、及液化石油氣、天然氣、乙炔氣等易燃性氣體火災。

依水霧系統相關技術報告及國外適用案例而言，水霧滅火系統可適用於我國消防法規¹⁶中之『各類場所消防安全設備設置標準』第十八條所列之場所，其具體內容如下表所示。

表 3.5 各類滅火系統適用各種不同使用場所對照表

應 設 場 所		水 霧	泡 沫	二 氧 化 碳	乾 粉
一	屋頂直昇機停機場（坪）		○		○
二	飛機修理廠、飛機庫樓地板面積在二百平方公尺以上者		○		○
三	汽車修理廠、室內停車空間在第一層樓地板面積五百平方公尺以上者；在地下層或第二層以上樓地板面積在二百平方公尺以上者；在屋頂設有停車場樓地板面積在三百平方公尺以上者	○	○	○	○
四	昇降機械式停車場可容納十輛以上者	○	○	○	○
五	發電機室、變壓器室及其他類似之電器設備場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者	○		○	○
六	鍋爐房、廚房等大量使用火源之場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者			○	○
七	電信機械室、電腦室或總機室及其他類似場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者			○	○
八	引擎試驗室、石油試驗室、印刷機房及其他類似危險工作場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。	○	○	○	○
<p>註：</p> <p>一、大量使用火源場所係指最大消費熱量合計在每小時三十萬千卡以上者。</p> <p>二、廚房如設有自動撒水設備，且排油煙管及煙罩設簡易自動滅火裝置時，得不受本表限制。</p> <p>三、停車空間內車輛採一列停放，並能同時通往室外者，得不受本表限制。</p> <p>四、本表第七項所列應設場所得使用預動式自動撒水設備。</p> <p>五、平時有特定或不特定人員使用之中央管理室、防災中心等類似處所，不得設置二氧化碳滅火設備。</p>					

（資料來源：參考文獻 16）

第五節 水霧撒水系統滅火機制

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。

而水霧系統的滅火機制有以下幾點⁹：

一、熱吸收(*Heat Extraction*)

水霧冷卻火焰之滅火機制主要來自於當大量的細小水滴進入火焰區時會吸熱並快速蒸發，將水蒸發成水蒸氣而進一步冷卻火焰。當火焰之溫度被冷卻、降低至維持燃燒所需之極限溫度時，油氣混合之燃燒反應將終止，火源將被抑制、撲滅。研究指出粒滴的蒸發率與週遭溫度、粒滴表面積、熱傳係數及粒滴與週遭氣體的相對速度有關。對於水霧粒徑範圍在 $100\mu\text{m} < d < 1000\mu\text{m}$ 之間其熱傳係數與粒徑大

小之關係可表示成¹³：

$$H = \frac{0.6}{d} K P_r^{1.5} R_e^{0.5} \quad (3.4)$$

H ：熱傳係數($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

d ：水霧粒徑(μm)

K ：空氣之熱傳導率($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)

P_r ：Prandtl Number

R_e ：Reynolds Number

二、氧氣置換(Displacement of Oxygen)

水霧滴蒸發所形成之水蒸氣會排擠火場空間中原先具有之空氣，當水滴吸熱蒸發成水蒸氣取代火源週遭的氧氣，使火場中之氧氣降低至維持燃燒所需之臨界氧氣濃度以下，將可阻止火勢燃燒。

三、降低熱輻射效應(Radiant Heat attenuation)

當水霧噴撒至燃燒物表面時，細小之水霧滴形成熱屏障可阻止火源燃燒之輻射熱，降低燃燒物表面被揮發之速度，對於防止火勢擴及未燃燒之可燃物，可進一步防止火勢之延燒擴大。NRCC(加拿大國家研究協會)實驗結果顯示，利用水霧進行滅火，將可減少 70%之輻射傳遞至火場區劃牆面。

影響阻隔火源輻射熱之效應主要和水霧之水霧滴粒徑大小及其分佈密度有關。更小的粒滴與更密集的水霧滴將更有效阻隔輻射熱。根據研究顯示，在 $100 \text{ g}/\text{m}^3$ 之噴撒密度，1m 之噴撒分佈範圍下，噴撒粒徑大小在 $100\mu\text{m}$ 至 $200\mu\text{m}$ 之間能阻絕 800°C 之黑體 60%之輻射熱傳量。

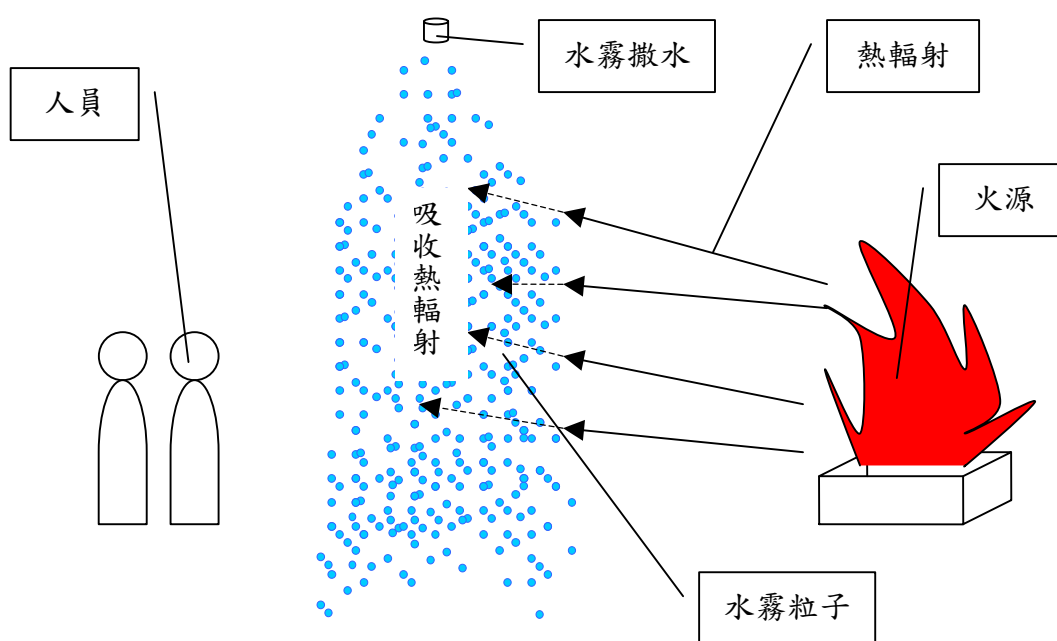


圖 3.4 水霧系統吸收熱輻射示意圖

(資料來源：本研究整理)

四、稀釋燃氣(Dilution of fuel vapor)

研究指出，藉由滅火過程水滴吸熱所形成之水蒸氣進行火源抑制，可視為間接滅火機制。水蒸汽與週遭可燃氣體混合，當可燃氣體濃度稀釋 35%即可進一步抑制火源燃燒。

第六節 水霧滅火系統相關理論

一、水霧滴完全蒸發所需時間估算：

為了發揮水霧滴吸熱冷卻之滅火效應，水霧滴需在火場中有足夠的時間能對火焰進行蒸發冷卻。假使水霧滴完成蒸發時間比水霧滴在火焰區停留間短，則液滴在到達燃料表面前將可完全蒸發。相反的，

若水霧滴蒸發所需時間較其在火場空間殘留時間長，則水液滴之質量受蒸發影響而降低之效應將不顯著。在此情形下，火源無法藉由火焰冷卻之滅火機制來加以撲滅。水霧滴完全蒸發時間包括加熱時間與蒸發時間，水霧滴在穩態蒸發過程中，任何時刻下之粒滴直徑與其初始粒徑可以寫成下面關係式：

$$D_0^2 - D^2 = \lambda t \quad (3.5)$$

D_0 : 初始水霧滴粒徑大小 (μm)

D : 任何時刻下水霧滴粒徑大小 (μm)

t : 時間 (sec)

λ : 蒸發係數 (m^2/sec)

蒸發係數 (λ) 可以透過下列公式計算¹²：

$$\lambda = \frac{8k \ln(1+B)}{C_p \rho_F} \quad (3.6)$$

k : 水蒸汽之熱傳導係數 ($2.48 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$)

C_p : 水蒸汽之比熱 ($2 \text{ KJ/kg} \cdot \text{K}$)

ρ_F : 水的密度 (958.4 kg/m^3)

B : *Jakob number*

熱傳無因次常數 *Jakob number* 主要是定義水霧滴由液相相變化至汽相過程中顯熱與潛熱吸收能量比，可進一步定義為：

$$B = \frac{C_p (T_\infty - T_b)}{L} \quad (3.7)$$

T_b : 水霧滴表面溫度 (K)

T_∞ : 水霧滴週遭氣體溫度 (K)

L : 水的潛熱 (2257.1 kJ/kg)

本研究之設計火源在自由燃燒下火場溫度之變化情形，火場最高溫度約 200°C，水霧噴頭作動時（點火後 60 秒）火場最高溫度約為 140°C，再加上考量熱電偶之反應時間延遲，因此分別取水霧液滴所受周遭火場溫度 $T_\infty=523\text{K}$ (250°C)、 $T_\infty=473\text{K}$ (200°C) 與 $T_\infty=423\text{K}$ (150°C) 進行蒸發所需時間計算，其它條件為：

水霧滴表面溫度 $T_b=373\text{K}$ ；

水的潛熱 $L=2257.1\text{kJ/kg}$ ；

水蒸汽的比熱 $C_p=2\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ；

水蒸汽之熱傳導係數 $k=2.48\times 10^{-2}\text{W/m}\cdot\text{K}$ ；

水的密度 $\rho_F=958.4\text{kg/m}^3$

將上述性質條件代入公式 3.5~3.7，分別計算水霧滴粒徑 200 μm ~800 μm 在本研究實驗條件下水霧滴蒸發所需時間。計算結果如表 3.6 所示。

表 3.6 不同粒徑大小水霧液滴蒸發所需時間

水霧滴粒徑	週遭氣體溫度 $T_\infty=523\text{K}$	週遭氣體溫度 $T_\infty=473\text{K}$	週遭氣體溫度 $T_\infty=423\text{K}$
	蒸發所需時間	蒸發所需時間	蒸發所需時間
200 μm	3.09 sec	4.55 sec	8.91 sec
400 μm	12.39 sec	18.21 sec	35.66 sec
600 μm	27.87 sec	40.97 sec	80.23 sec
800 μm	49.55 sec	72.83 sec	142.63 sec

(資料來源：本研究整理)

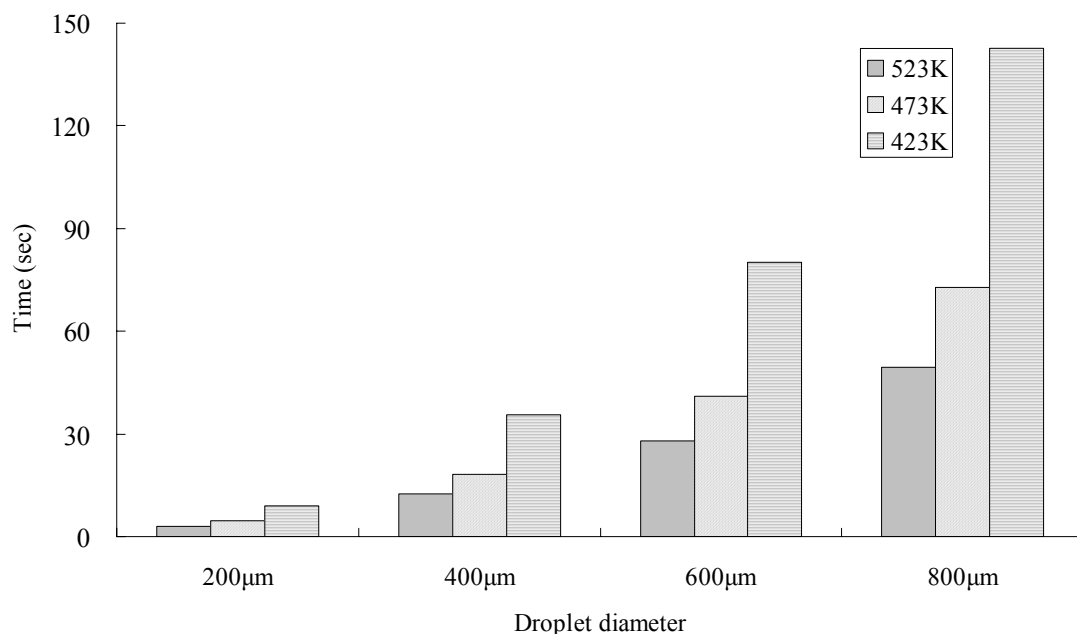


圖 3.5 不同粒徑大小水霧液滴蒸發所需時間圖

(資料來源：本研究整理)

表 3.5 計算結果僅是水霧滴在 100°C 下蒸發所需時間，還不包括水霧滴在液態吸熱至 100°C 所需時間。由 Kim¹⁴ 的研究對於放射壓力在 0.67MPa，水霧滴離開噴頭之速度在 5m/s 的情況下，在一高度 3m 的空間，水霧滴停留在火場中的時間約為 0.2 秒。

因此總蒸發所需時間遠遠大於水霧滴能在火場中停留時間，由此結果可知在本研究中水霧要發揮吸熱蒸發，造成氧氣窒息的抑火效果似乎無法達成，即便粒徑在定義上是採用平均粒徑，實際狀況會有比平均粒徑更小的水滴存在會有蒸發的可能，但是數量相當有限。因此由此可知本研究水霧之滅火機制主要將是火場吸熱降溫及火源根部吸熱冷卻為主。

二、水霧粒滴尺寸定義：

一般對於水霧粒徑的定義，大多採用單一統計的平均直徑，常見的平均粒徑定義可分為：體積平均直徑（*Volumetric Mean Diameter*，VMD）及 Sauter 平均直徑（*Sauter Mean Diameter*，SMD）。

體積平均直徑 VMD（也稱為 *Mass Mean Diameter*，MMD），如標記成 $D_{v0.5}$ ，即表示有 50% 的全部液體體積在小直徑水滴內；而 SMD 其定義是噴撒體積除以水霧滴之表面積所計算出的平均直徑，亦即是表示水霧滴之總表面積與噴撒水量之比值，此直徑大小可反映出水霧滴在火場中蒸汽化之比例。

另外，為提供一較佳的方法來描述噴撒分布的特性，採用累積分佈函數圖來表示，將粒徑量測結果以累積百分體積（*Cumulative % Volume*）對水滴直徑作圖型來表示。而其呈 S 形狀的曲線顯示出分布全貌，包括水滴的最大尺寸以及水滴尺寸的範圍。同時可配合體積平均粒徑之定義，例如 $D_{v0.1}$ 、 $D_{v0.5}$ 與 $D_{v0.9}$ 等參數（在小水滴內液體體積分別為 10%，50%，90% 之對應直徑）來描述水滴尺寸的分布。

在粒徑分佈有另一種表示方法為 D_{Nf} 、 D_{Lf} 、 D_{Af} 及 D_{Vf} ，f 為分數在粒滴總數、直徑及水滴表面積、體積分別整除水滴之較小的粒徑，例如：

$D_{N0.5}$ = 數量中位數之粒徑

$D_{L0.5}$ = 長度中位數之粒徑

$D_{A0.5}$ = 表面積中位數之粒徑

$D_{V0.5}$ = 容積中位數之粒徑

$D_{v0.9}$ = 由小粒徑至全部水滴體積之 90%

第七節 水霧液滴產生方式

將液體霧化的方式有許多種，但主要的關鍵乃是被霧化的介質與周遭環境間需要有一較高的相對速度（Relative Velocity），而達到使介質破裂霧化的效果。為了滿足各種不同霧化效果的需求，進而衍生出許多不同設計理念的霧化器。若是依照霧化的動力源不同而將霧化器予以分類，大致上可以分成下列三種的型式：

1. 壓力式霧化器（Pressure Atomizer）利用高壓使液體經由霧化器噴出而破裂霧化於周圍較低速或靜止的空氣中。
2. 雙流體型霧化器（Twin-fluid Atomizer）是將待霧化液體曝露於相對高速的氣相流中，藉液氣兩相間的動能傳遞，達到霧化的目的，例如有較小氣/液質量比的氣助式（Air-Assist）霧化器及較大氣/液質量比的氣衝式（Air-Blast）霧化器即是屬於這一類型。
3. 旋轉式霧化器（Rotary Atomizer）是利用機械旋轉裝置將液體甩拋而霧化。

除此之外，尚有其它運用不同原理的霧化器，如利用超聲波震盪使液體霧化的霧化器，或是利用靜電使液體帶電霧化的霧化器等。

本研究為探討不同水霧粒徑大小對水霧系統滅火效能之影響，水霧撒水頭利用自行設計之渦頭與渦道組合，透過泵浦加壓水使水通過此渦頭與渦道時會產生旋轉撕裂，進而形成破裂霧化之小水滴，為產生水霧粒徑範圍由 200 μm 、800 μm ，將結合 2 個渦頭與 2 個渦道並配合不同壓力來產生。

目前霧滴粒徑的量測可以利用機械式、電子式和光學式，目前大

部份採用光學式或影像技術來進行，常見的方式有包括利用高速攝影機、雷射都普勒速度儀、雷射繞射粒徑分析儀等。本研究水霧粒徑大小與分部範圍之量測主要是利用雷射繞射粒徑分析儀來進行。

雷射繞射儀的組成包含雷射光源、偵測器、樣品分散裝置和數據收集及分析系統四部分，如圖 3.6 所示。

主要量測原理是利用 Fraunhofer 及完整 Mie 理論，Fraunhofer 理論是指透過一平行光束照過粒子後，會依不同粒子的大小產生不同的繞射角，藉由收集各角度的光強度計算初期粒徑大小及分布百分比；Mie 理論主要是補足 Fraunhofer 的假設，將光的折射、穿透、反射、吸收等現象考慮進去，使得繞射理論更加完善。而由 Mie 理論的計算可以推導出任何已知折射率的球型粒子被一固定波長及偏極性的光源照射後偵測器位置的光譜，因此任何粒子都可以適用且更可推導到 Submicron 的粒子量測、其原理如圖 3.7 所示。詳細規格可見表 3.7。

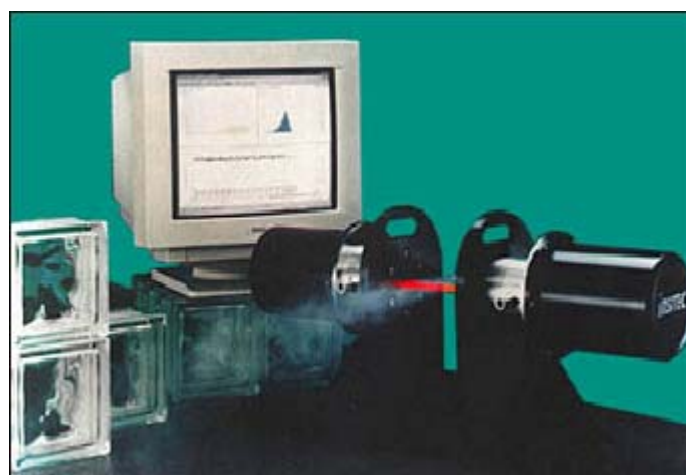


圖 3.6 雷射繞射粒徑分析儀組成圖

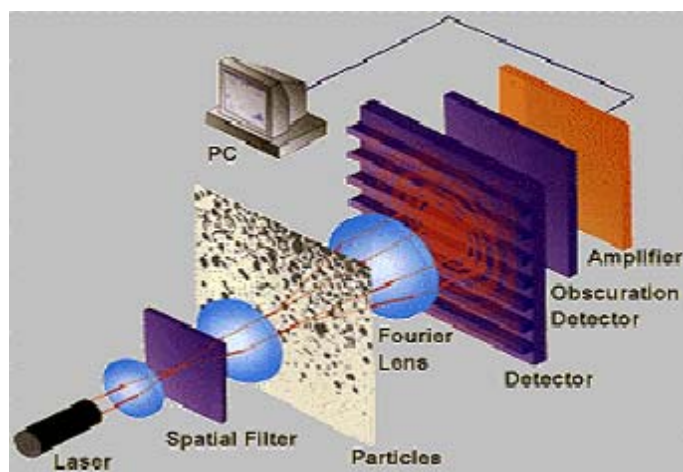


圖 3.7 雷射繞射粒徑分析儀原理示意圖

(圖 3.6、3.7 資料來源：參考文獻 9)

表 3.7 雷射繞射粒徑分析儀詳細規格表

	規 格
量測原理	Mie Scattering
量測範圍	2.25~850 μ m 微半圓形或不規則形狀粒子
光源	固態雷射，波長 670nm，功率 1MW
光束直徑	10nm
量測濃度	1ppm~10,000ppm，相對雷射(Obscurations)2%~95%
準確度	3%
精確度	0.5%
量測速度	靜止至超音速流，每秒可量 2,000 個粒徑分佈
量測時間	0.5 秒以上
偵測器	32 個光二極體
擁有氣幕裝置，避免量測時，鏡頭受待測物質不正常遮蔽。	

(資料來源：參考文獻 9)

第四章 實驗規劃

第一節 實驗設備概述

本研究實驗部分使用雲林科技大學防火工程實驗室，實驗室平面圖如圖 4.1 所示。實驗以工業酒精（甲醇）與正庚烷作為測試火源進行水霧滅火系統在不同粒徑下對於熱輻射的阻隔與吸收實驗測試。之所以選擇使用甲醇與正庚烷是由於其擁有 1.燃燒不冒黑煙，較易觀察實驗過程且不會造成儀器污染；2.實驗燃料的選擇是以一般常見之燃料的熱釋放率為基準（如：汽油，1.95MW），再選擇熱釋放率較低於它及較高於它的兩種燃料（如：甲醇，0.5MW；正庚烷，3.35MW），而本實驗主要是希望得到水霧對於熱輻射的遮蔽率相關參數，故甲醇與正庚烷所囊括的熱釋放率應具有代表性。

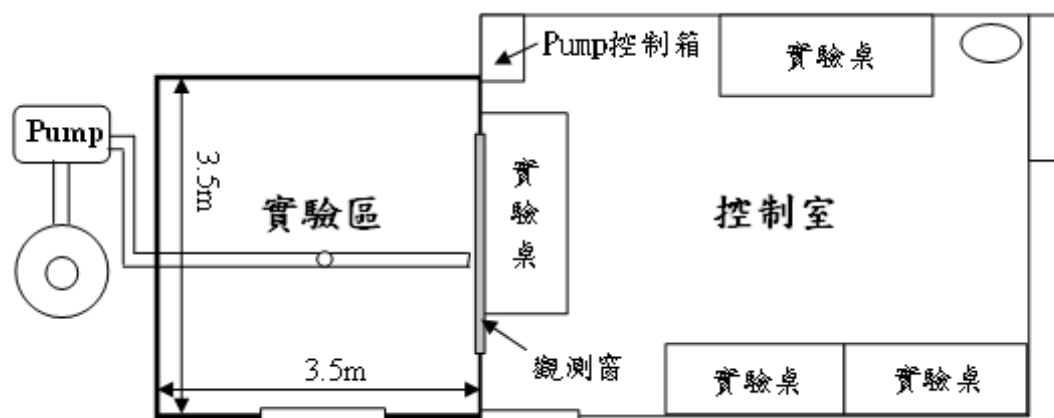


圖 4.1 防火工程實驗室平面圖

（資料來源：本研究整理）

一、實驗空間

實驗區的長寬高尺寸為 3.5m×3.5m×3.2m（壁約厚 0.1m），實驗空間使用水泥磚塊隔間，實驗區與控制室之牆面設置防火玻璃作為觀

測窗以便觀測實驗過程火場之變化狀況，牆面與觀測窗的縫隙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。

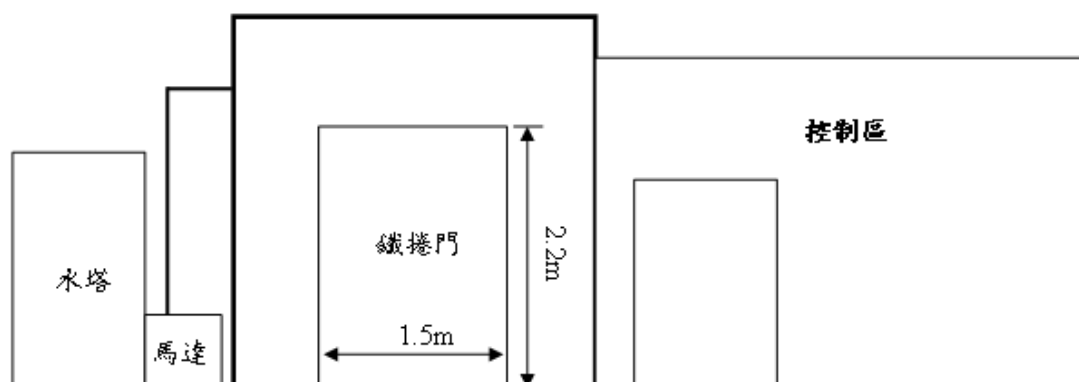


圖 4.2 防火工程實驗室前視圖

(資料來源：本研究整理)

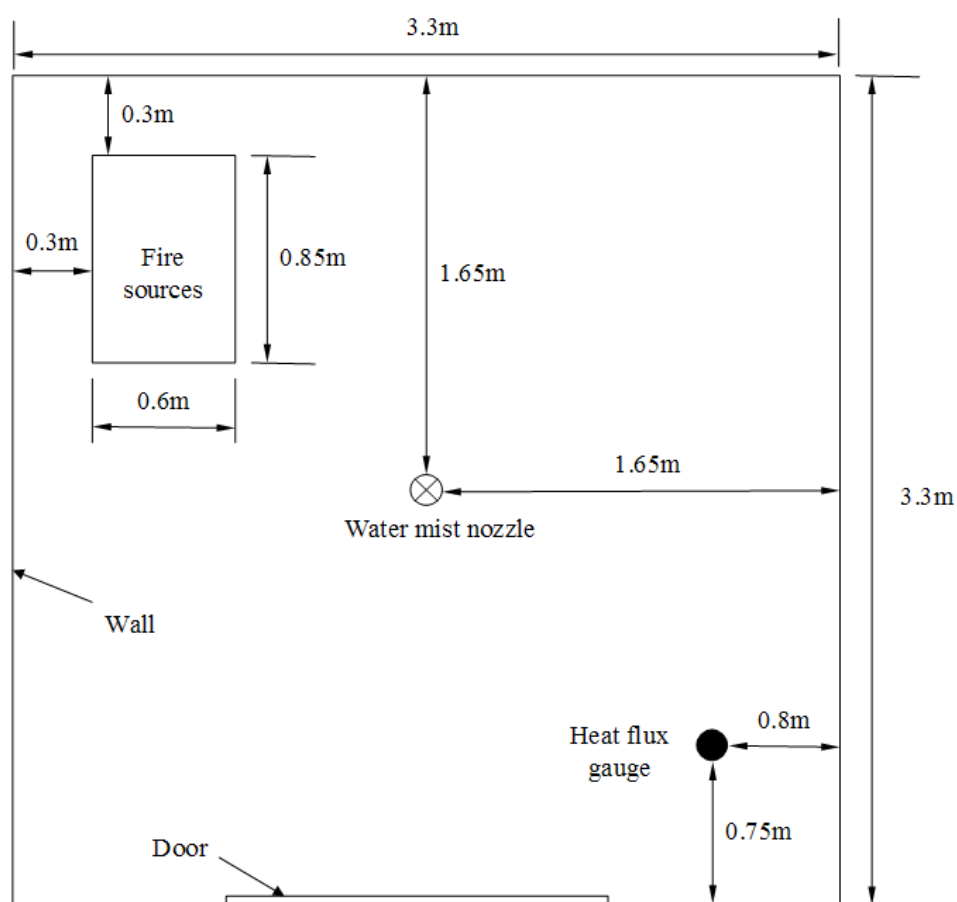


圖 4.3 防火工程實驗室相關儀器配置平面圖

(資料來源：本研究整理)

二、水系統

由於水系統的流量與壓力對於水霧噴撒之密度、水霧滴粒徑尺寸大小及滅火效果等都有很大的影響，因此在撒水管路上必須裝設一個變頻式壓力泵浦（壓力範圍在 $0\sim 25\text{kgf/cm}^2$ ），用來調整實驗過程中水流量與壓力。另外為了確保水量能在實驗過程中能穩定且持續的供給，因此設置一大型 5ton 的儲水槽。

三、現場實驗量測設備

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，因此可將數個熱電偶共同綁在一條垂直的細鐵鍊上。實驗室內架設三點熱電偶，分別在距離地面 1.4m、1.6m、1.8m 等三個不同高度架設熱電偶，示意圖如圖 4.4 所示。

熱電偶使用 K-type，最高溫度可以量測到 400°C 。熱電偶各點量測溫度訊號透過數據擷取裝置(Data Log)將數溫度據輸入至電腦中。

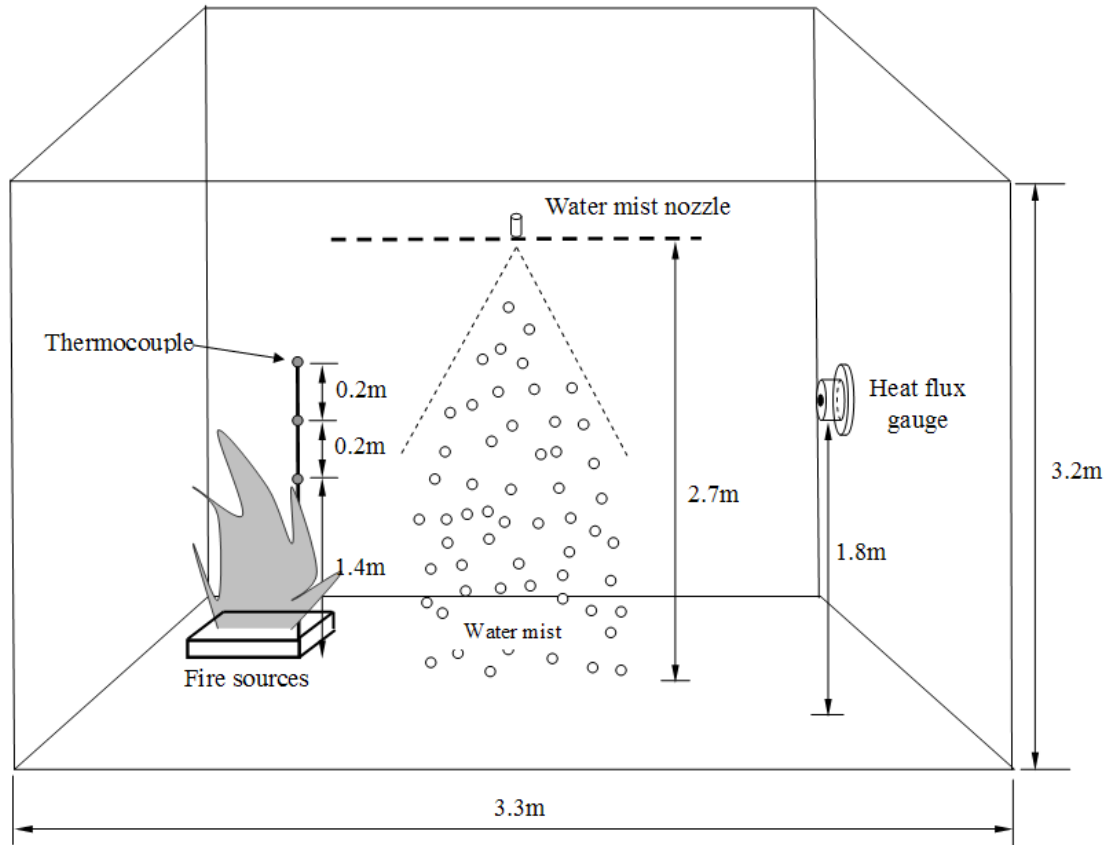


圖 4.4 實驗室熱電偶與熱輻射計安裝設置示意圖

(資料來源：本研究整理)

B. 流量計與壓力計：

為產生不同粒徑之水霧粒滴，利用變頻式之加壓水泵改變壓力來進行粒徑之變化，改變壓力亦會改變流量，同時水霧噴撒之流量對於細水物之滅火效應也會有影響。因此在加壓水泵出口端裝設數位式流量計，用來量測撒水頭所噴撒出的水量，可透過訊號傳輸線連接至控制室，利用數位顯示器顯示瞬間流量與累積流量之變化。

壓力計裝設在加壓泵浦的出口處與支管的入口處用來量測水霧之噴撒壓力。另外為方便監控，將撒水管路延伸至控制室內並在管路末端裝設一個壓力錶頭。

C. 熱輻射計：

為了量測水霧系統對於熱輻射的阻隔與吸收，本研究採用 *METTHERM CORPORATION* 所製造的熱輻射計，其吸收率為 0.92，外觀如圖 4.5 所示。本研究備有 $0.9980\text{W}/\text{cm}^2$ per mV 和 $0.6061\text{W}/\text{cm}^2$ per mV 兩種熱輻射計，以求實驗能有較高的準確度。



圖 4.5 熱輻射計

(資料來源：本研究整理)

D. 數據收集系統：

數據擷取裝置的主要作用是將實驗過程中熱電偶量和熱輻射計測到的數值傳輸並記錄下來。本實驗所用之數據收集系統是由一部筆記型電腦及資料擷取設備 (*Data Log*) 所組成，可同時接收多點信號並儲存。

E. 影像設備：

在控制室內靠近實驗區位置以及正視實驗室鐵捲門處均架設影像系統。透過觀測窗，錄下實驗進行時實驗空間內火源燃燒的狀態、水霧系統噴撒的情形與火源燃燒的時間。

四、火源

本研究透過火盤燃燒甲醇形成池火源作為實驗測試火源，火盤大小為 0.84m×0.59m、高度 0.1m，使用厚度 1.5mm 的鋼板製成，避免因燃燒時的高溫而產生變形。火盤位於實驗室中央，放置於地面上一長寬高均略大於火盤的水盆內，以減少實驗過程中火源受週遭地板熱效應之影響。

第二節 實驗規劃

本研究以實驗為主，以模擬加以對照，目的是希望能以正確的模擬結果減少實驗所帶來的金錢與時間的消耗，也可以作為實驗前的評估與設計工具。

一、CFD 軟體介紹

A. FDS 軟體簡介：

本研究所使用的 CFD(*Computational Fluid Dynamics*)模擬軟體為美國 NIST(*National Institute of Standard and Technology*)所發展的 FDS(*Fire Dynamic Simulator*)火場模擬軟體，並搭配火場情境繪圖軟體 Somkeview 觀察火場溫度、煙流方向或是其他性質作動情形。

FDS 這套軟體的核心是由 *Navier-Stokes* 組成，以解析流體公式的方式撰寫，可用於 3D 的流場和煙流動模擬，同時可模擬計算火場的變化。

B. FDS 使用步驟：

要使用 FDS 進行模擬之前，必須要先收集火場資料，包含火場外型、內容物位置、可燃物資料等等。然後就是定義起火點以及火源

尺寸和熱釋放率。資料齊全之後，便可著手建立 FDS 的輸入檔，使用 Windows 內建的「記事本」軟體編輯即可。這個輸入檔便是 FDS 讀取資料的來源，其中可加以建立的項目包含：模擬空間的大小及形狀、內容物的位置、門窗、偵測點的位置與種類、火場資料(如：溫度、熱輻射值、煙濃度)擷取點的位置。之後便是執行 FDS 開始進行計算的動作。

C. FDS 結果的處理與分析：

當 FDS 計算完畢之後，可直接執行 Smokeview 察看計算後的火場情景，將模擬的結果透過色彩、立體、動畫，讓使用者能很清楚的對於火場有鮮明的印象，快速掌握火場資訊，進一步對於火場進行分析，以瞭解災害發生的原因以及預防的方法。

二、FDS 執行過程

經由上述 FDS 執行步驟後，我們依照實際的建築-防火工程實驗室建立了 FDS 的模型，如圖 4.6~4.9 所示。其中灰色的部分代表實驗室主體，紅色代表火源，黃色代表 *Thermocouple*，綠色方塊是用來測量熱輻射值，如圖 4.7、4.8 說明。

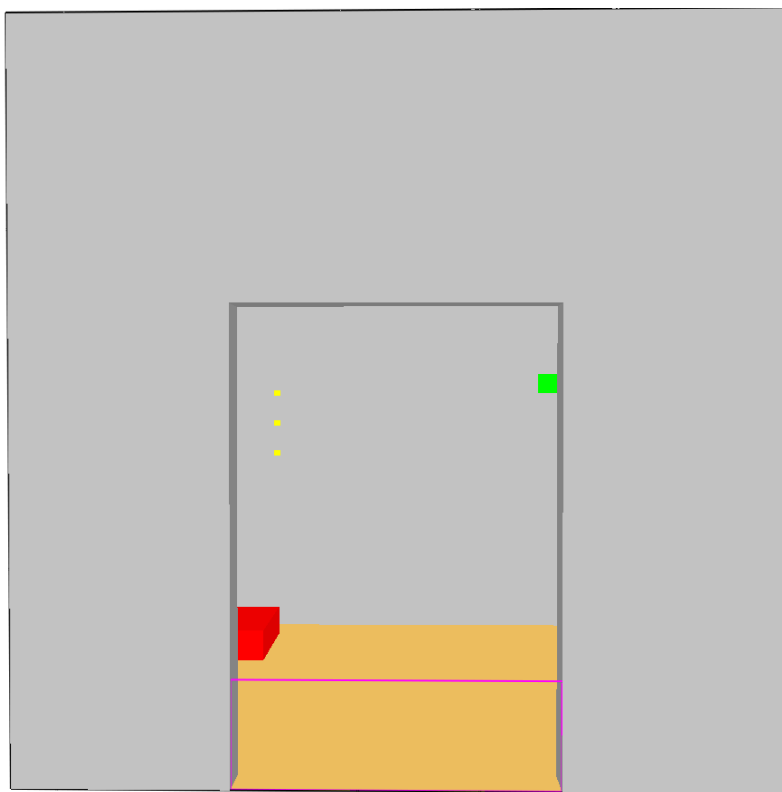


圖 4.6 FDS 模擬防火工程實驗室前視圖

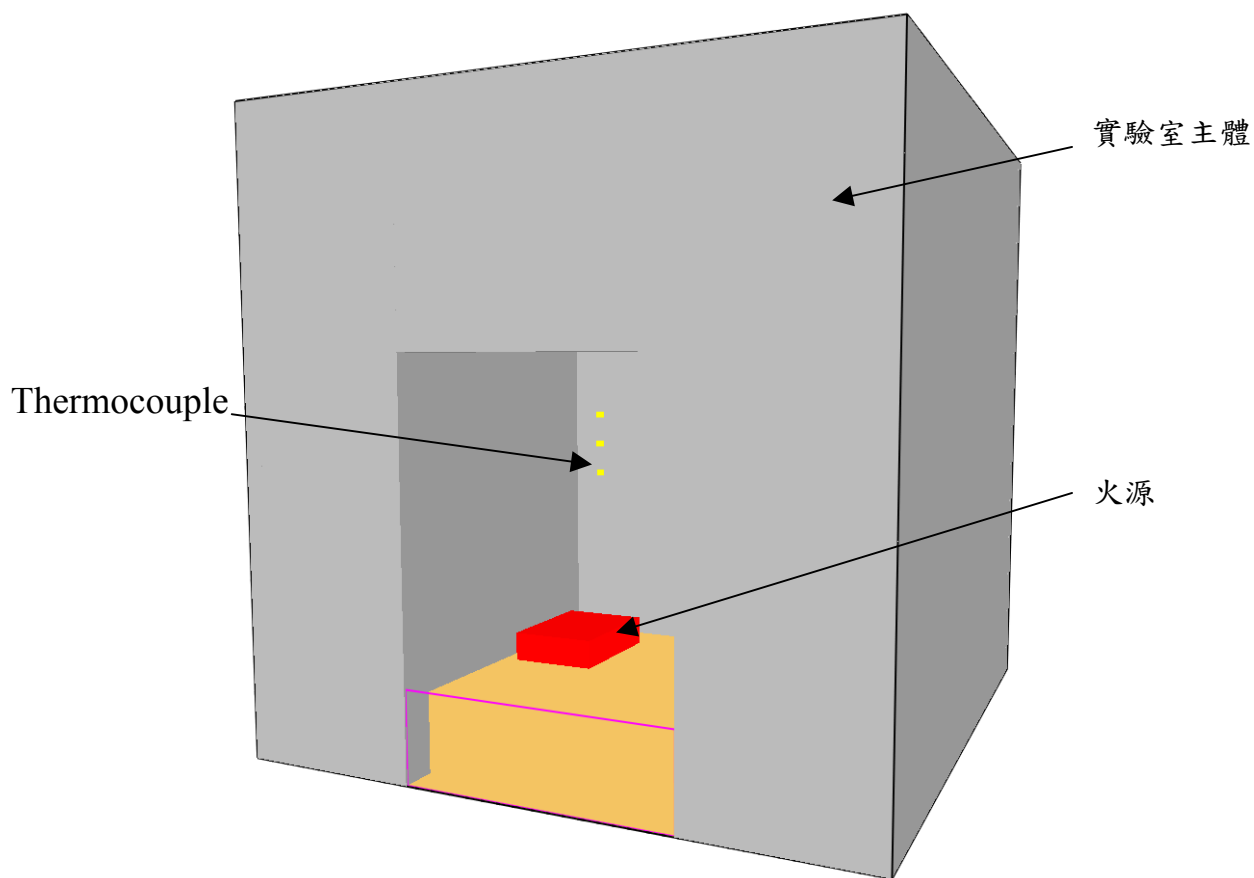


圖 4.7 FDS 模擬防火工程實驗室右轉 15 度角視圖

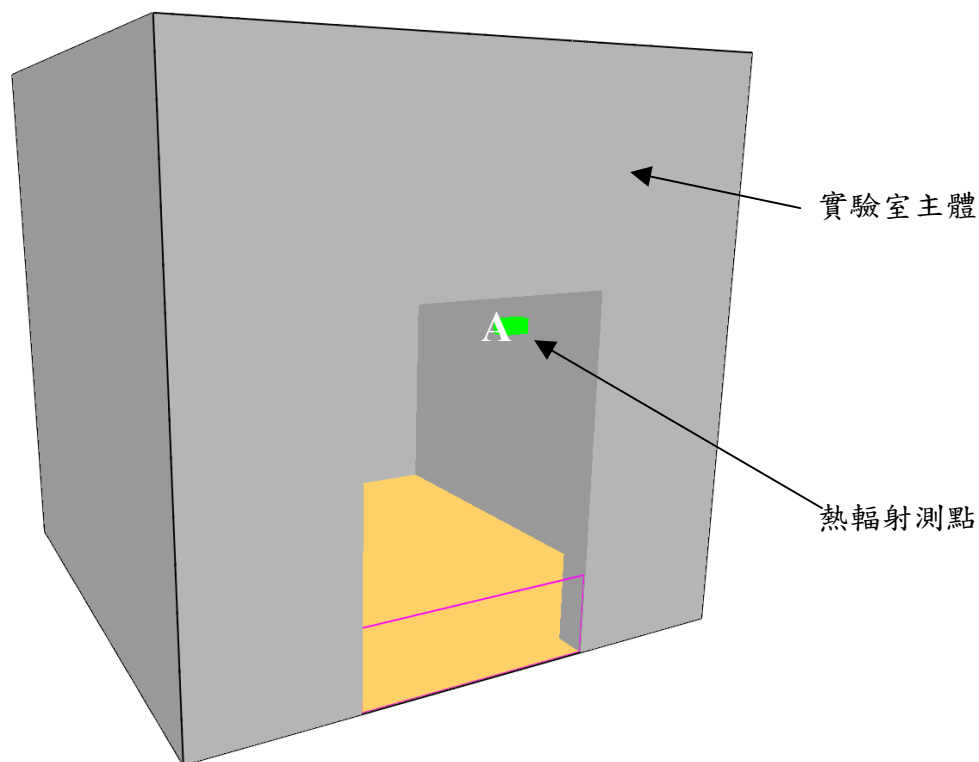


圖 4.8 FDS 模擬防火工程實驗室左轉 15 度角視圖

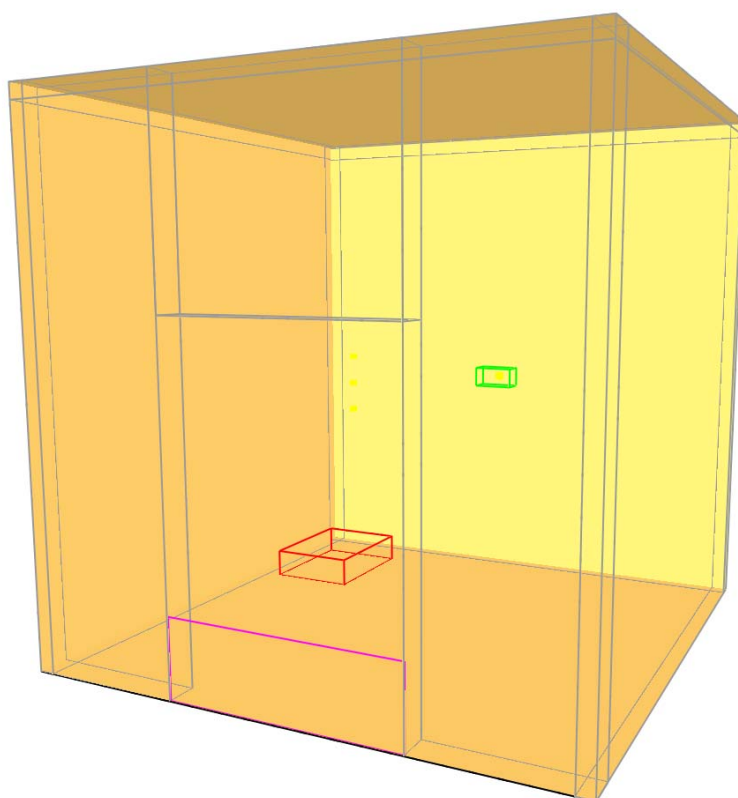


圖 4.9 FDS 模擬防火工程實驗室透視圖

(圖 4.6-4.9 資料來源：本研究整理)

三、實驗規劃

本研究實驗之部分將在防火工程實驗室內，距離牆壁 1.6m 處、高 2.1m、2.7m 處裝設水霧撒水頭，並在火盤旁裝設三點 *Thermocouple*，用來量測火場溫度變化。熱輻射計安裝在水霧撒水頭與火盆相同距離之對角線處，高度為 1.8m，在圖 4.8 中 A 點的位置。同時為產生不同粒徑大小之水霧滴，透過變頻式加壓泵浦壓力的改變及不同撒水頭來控制水的流量及粒徑大小，並利用雷射繞射粒徑分析儀量測水滴粒徑大小。

實驗中將使用自行開發之水霧撒水頭，為了產生不同之水霧噴撒粒徑，透過變頻式壓力泵浦來調整實驗過程中水的壓力，以得到不同之水霧粒滴直徑，來進行不同水霧粒徑大小對於滅火效能之影響及其他影響參數之交互作用，配合不同工作壓力以產生粒徑範圍 $D_{v0.9}$ 分別為 200 到 800 μm ，並紀錄相關的水霧放射條件（所需工作壓力及流量），以便進行不同水霧滴粒徑大小與放射壓力及工作流量對水系統滅火效能之影響研究。

水霧系統之滅火效能將從實際火源撲滅時間與火場空間溫度變化情形進行比較探討。滅火時間是指從水霧開始撒水一直到火源被完全撲滅為止之間的時間，配合影像系統觀察實驗過程中火源燃燒狀況與最後火源撲滅之時間，所有實驗完成後再進行性能比較分析。

而水霧系統對於熱輻射的阻隔分別使用不同高度及不同粒徑的水霧做區別，目的在於瞭解粒徑大小對於阻隔熱輻射的效率，以期能找出最符合經濟效益的組合。

由於預燃時間並不在本研究中探討，因此實驗時統一固定預燃時間為 60 秒，且為避免加壓水泵會有壓力上升之時間延遲，因此加壓

水泵會先開啟至所需之工作壓力，在管路內先行蓄壓，利用水霧撒水頭前方之電磁閥來控制系統之作動噴撒，從點火開始至 60 秒後水霧系統開始噴撒。

水霧系統之滅火效能將從實際火源撲滅時間與火場空間溫度變化情形進行比較探討。滅火時間是指從水霧開始撒水一直到火源被完全撲滅為止之間的時間，配合影像處理系統觀察實驗過程中火源燃燒之狀況與最後火源撲滅之時間。

表 4.1 實驗規劃表

實驗編號	水霧水滴粒徑 $Dv_{0.9}(\mu\text{m})$	撒水頭高度	燃料數量	燃料種類	流量(Lpm)	操作壓力 (kgf/cm^2)
1	N/A	N/A	3L	甲醇	N/A	N/A
2	N/A	N/A	5L	甲醇	N/A	N/A
3	N/A	N/A	3L	正庚烷	N/A	N/A
4	200	2.1m	3L	甲醇	12	16.3
5	800	2.1m	3L	甲醇	12	2
6	200	2.7m	3L	甲醇	12	16.3
7	400	2.7m	3L	甲醇	12	3.5
8	600	2.7m	3L	甲醇	12	5
9	800	2.7m	3L	甲醇	12	2
10	Sprinkler	2.7m	3L	甲醇	12	1
11	200	2.7m	3L	正庚烷	12	16.3
12	400	2.7m	3L	正庚烷	12	3.5
13	600	2.7m	3L	正庚烷	12	5
14	800	2.7m	3L	正庚烷	12	2
15	Sprinkler	2.7m	3L	正庚烷	12	1
16	200	2.7m	5L	甲醇	12	16.3

17	400	2.7m	5L	甲醇	12	3.5
18	600	2.7m	5L	甲醇	12	5
19	800	2.7m	5L	甲醇	12	2
20	Sprinkler	2.7m	5L	甲醇	12	1

註：1 kgf/cm² = 0.098 MPa = 14.214 psi = 0.968 atm

(資料來源：本研究整理)

第五章 實驗與模擬結果

第一節 實驗結果

本實驗所使用的燃料分別為 3 公升甲醇、5 公升甲醇、3 公升正庚烷比較其差異，在不啟動撒水設備時的燃燒熱輻射值如圖 5.1 所示：

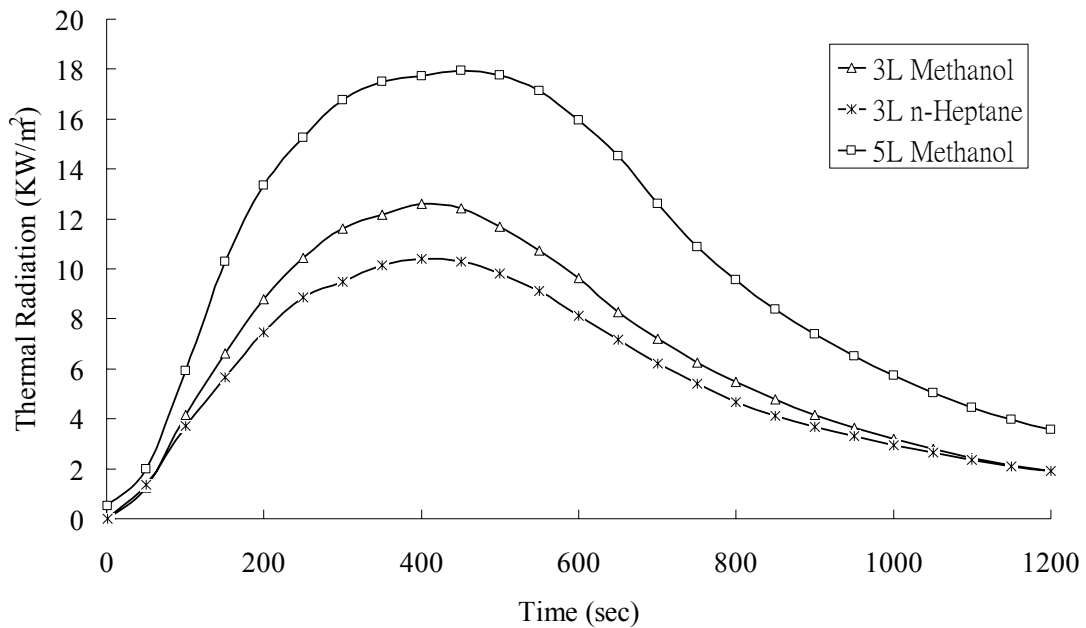


圖 5.1 不同數量燃料的熱輻射值比較

(資料來源：本研究整理)

由於本實驗最主要的目的，是為了得到在不同的水霧粒徑對於熱輻射的阻隔效果，所以我們分別量測在不同的燃料之下使用 200 μm 到 800 μm 粒徑水霧撒水頭與一般撒水頭所量測的數值。而本實驗另一個變更參數是撒水頭的高度。希望也能藉由實驗知道裝設在較高位置的撒水頭是否會增進水霧對於熱輻射的隔絕效果，故其中我們比較裝設在 2.1m 與 2.7m 高度所量測到的熱輻射值，其結果如圖 5.2-5.9 所示：

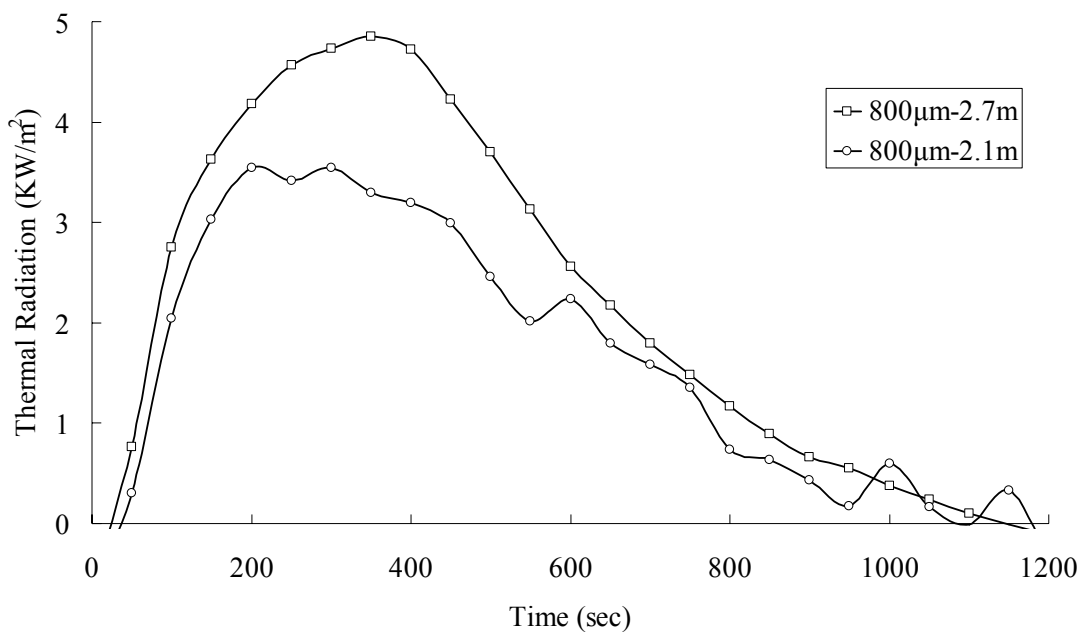


圖 5.2 甲醇 3 公升、粒徑 800µm、不同高度熱輻射值比較

(資料來源：本研究整理)

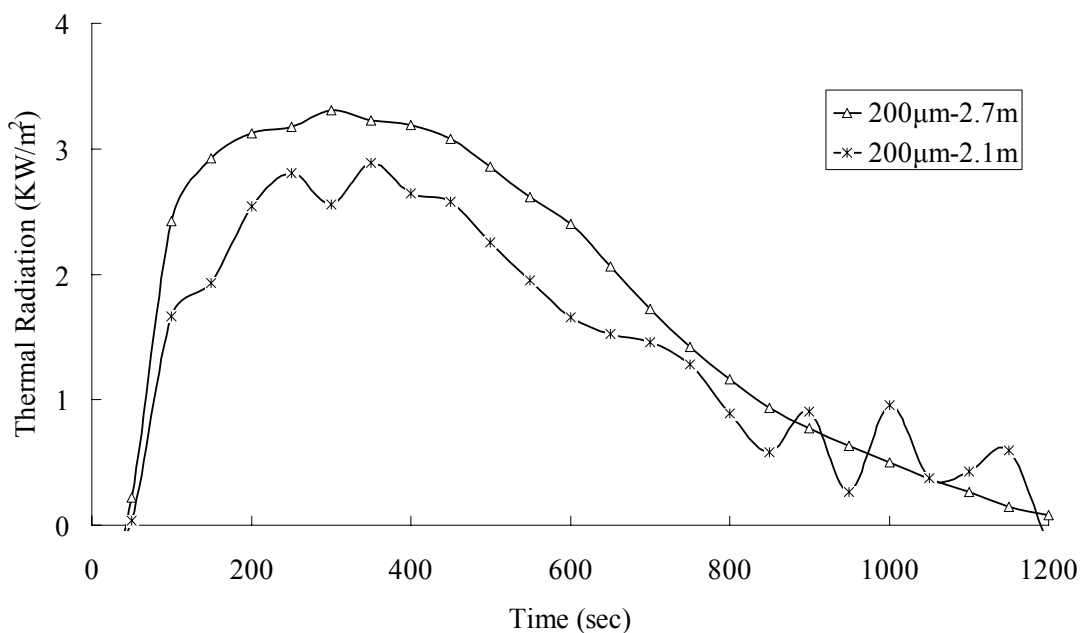


圖 5.3 甲醇 3 公升、粒徑 200µm、不同高度熱輻射值比較

(資料來源：本研究整理)

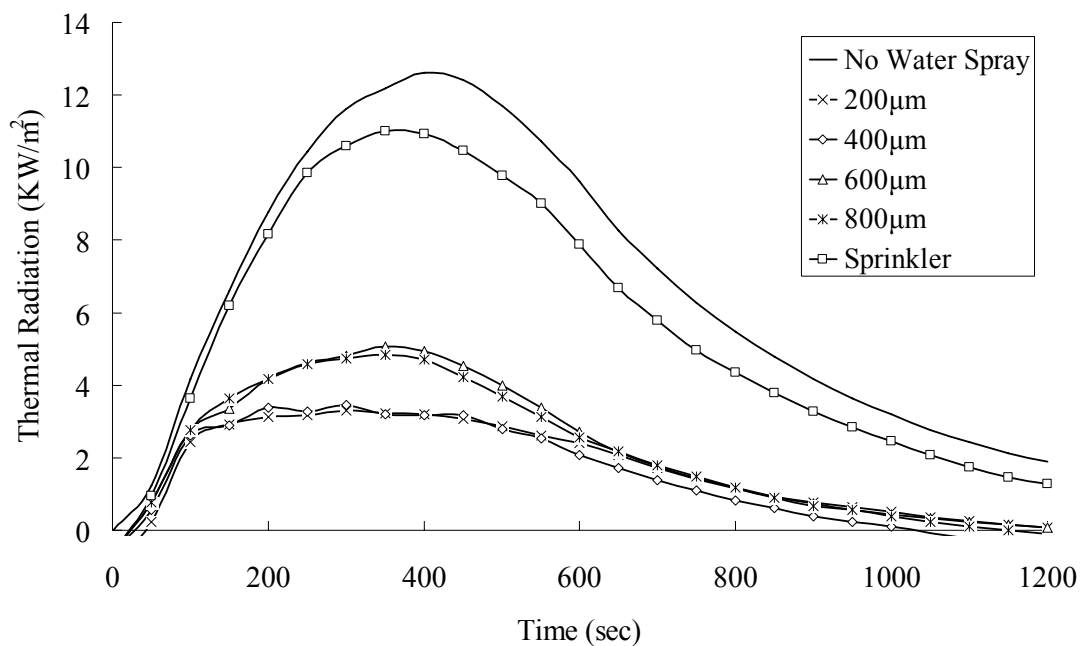


圖 5.4 甲醇 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射測量值

(資料來源：本研究整理)

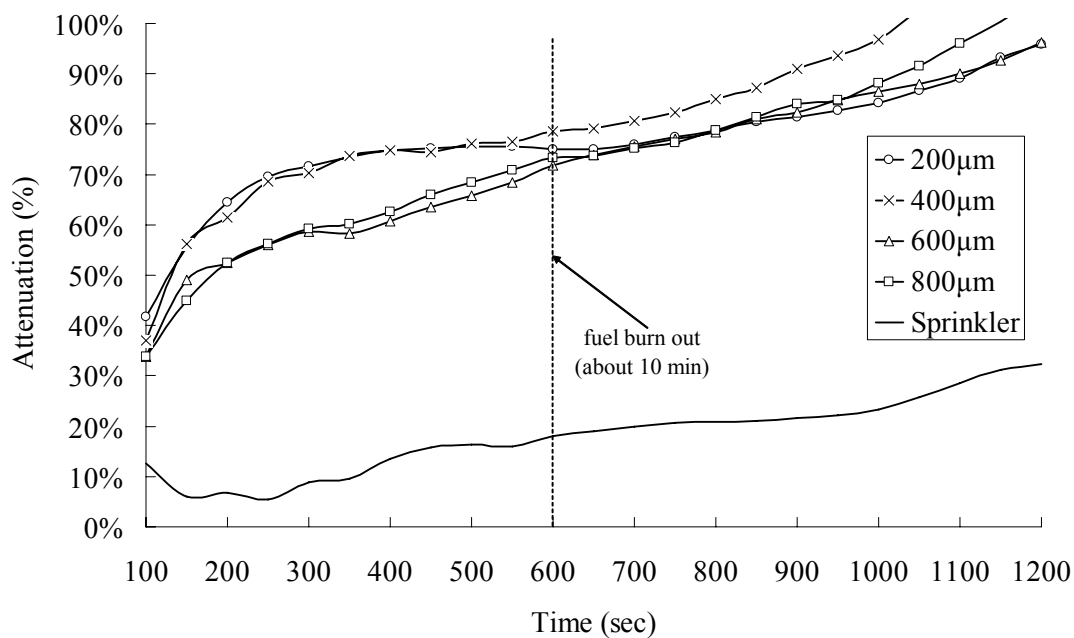


圖 5.5 甲醇 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射值遮蔽率

(資料來源：本研究整理)

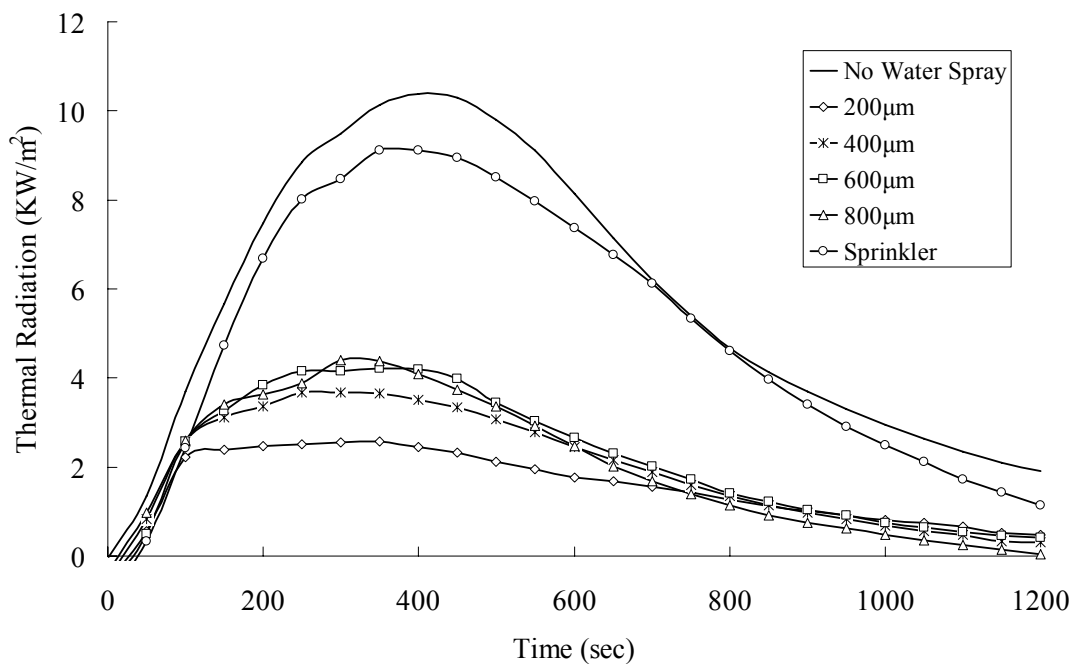


圖 5.6 正庚烷 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射測量值

(資料來源：本研究整理)

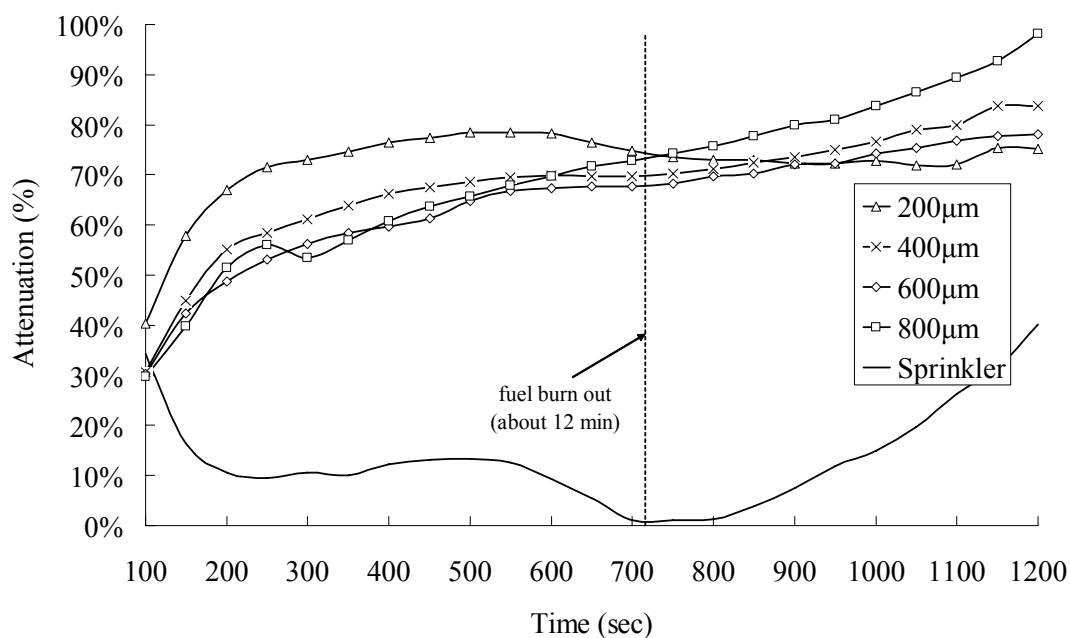


圖 5.7 正庚烷 3 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射值遮蔽率

(資料來源：本研究整理)

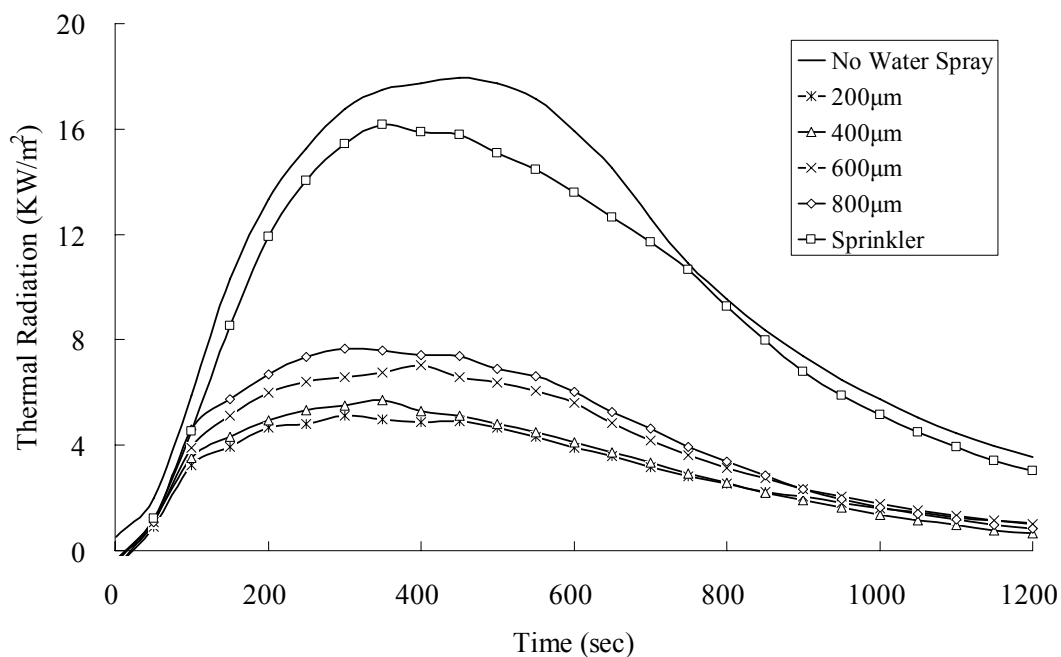


圖 5.8 甲醇 5 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射測量值

(資料來源：本研究整理)

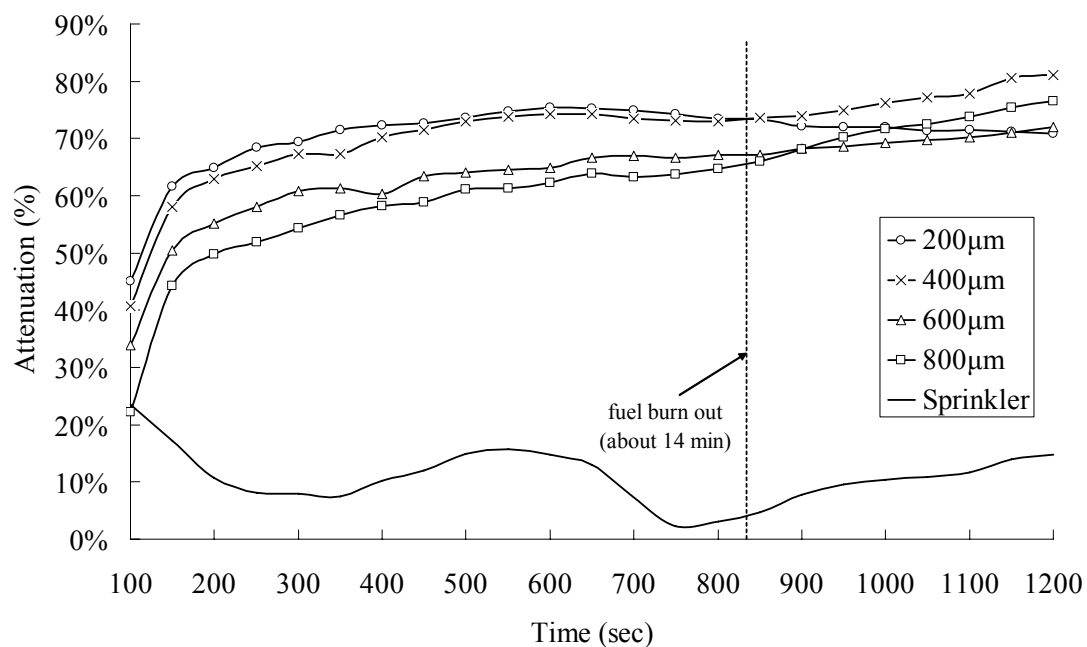


圖 5.9 甲醇 5 公升、撒水頭高度 2.7m 的熱輻射值遮蔽率

(資料來源：本研究整理)

可由以上實驗所得到的數值，可以再整理為如下表 5.1 所示：

表 5.1 實驗數據整合表

實驗編號	水霧粒徑 $Dv_{0.9}(\mu\text{m})$	撒水頭高度 (m)	燃料數量 (L)	熱輻射最大值(KW/m ²)
1	N/A	N/A	3L 甲醇	12.6
2	N/A	N/A	3L 正庚烷	10.4
3	N/A	N/A	5L 甲醇	17.9
4	200	2.1m	3L 甲醇	2.9
5	800	2.1m	3L 甲醇	3.6
6	200	2.7m	3L 甲醇	3.3
7	400	2.7m	3L 甲醇	3.5
8	600	2.7m	3L 甲醇	4.8
9	800	2.7m	3L 甲醇	5.1
10	Sprinkler	2.7m	3L 甲醇	10.9
11	200	2.7m	3L 正庚烷	2.6
12	400	2.7m	3L 正庚烷	3.7
13	600	2.7m	3L 正庚烷	4.2
14	800	2.7m	3L 正庚烷	4.4
15	Sprinkler	2.7m	3L 正庚烷	9.1
16	200	2.7m	5L 甲醇	5.1
17	400	2.7m	5L 甲醇	5.7
18	600	2.7m	5L 甲醇	7.0
19	800	2.7m	5L 甲醇	7.7
20	Sprinkler	2.7m	5L 甲醇	16.2

(資料來源：本研究整理)

比較裝設在同樣高度，不同粒徑的差異，其結果如表 5.2 所示：

表 5.2 3L 甲醇在同高度、不同粒徑之熱輻射值比較 (KW/m²)

	撒水頭高度 2.1m	撒水頭高度 2.7m
粒徑 200μm	2.9	3.3
粒徑 800μm	3.6	5.1
差值	0.7	1.8
差值百分比	19.44%	35.29%

(資料來源：本研究整理)

由表 5.2 可知，高度相同時，若使用不同粒徑會有很大的差異，以甲醇 3 公升為例，在高度 2.1m 的地方使用 800μm 的粒徑所測得的最高熱輻射值為 3.6 KW/m²，若改為使用 200μm 則會降到 2.9 KW/m²，約增加 19.44% 的吸收與遮蔽的效果。而在高度 2.7m 的地方使用 800μm 的粒徑所測得的最高熱輻射值為 5.1 KW/m²，若改為使用 200μm 則會降到 3.3 KW/m²，約增加 35.29% 的吸收與遮蔽的效果。

而在相同粒徑下，若裝設的高度不同，其結果如表 5.3 所示：

表 5.3 3L 甲醇在同粒徑、不同高度之熱輻射值比較 (KW/m²)

	粒徑 200μm	粒徑 800μm
撒水頭高度 2.1m	2.9	3.6
撒水頭高度 2.7m	3.3	5.1
差值	0.4	1.5
差值百分比	13.79%	41.66%

(資料來源：本研究整理)

由表 5.3 可知，當粒徑相同時，裝設的高度不同也會有不同的影響，以甲醇 3 公升為例，當粒徑為 200μm 的時候，裝設在 2.1m 高度所測得的最高熱輻射值為 2.9 KW/m²，而裝設在 2.7m 則增加至 3.3 KW/m²，約降低 13.79% 的效能。而當粒徑為 800μm 的時候，裝設在 2.1m 高度所測得的最高熱輻射值為 3.6 KW/m²，而裝設在 2.7m 則增

加至 5.1 KW/m^2 ，降低了約 41.66% 吸收與遮蔽的效果。將其結果製作成圖 5.10，由圖可知， $800\mu\text{m}$ 粒徑撒水頭比 $200\mu\text{m}$ 粒徑撒水頭裝設的高度對於所能吸收與遮蔽熱輻射值影響較大，以升高相同高度來計算， $800\mu\text{m}$ 粒徑撒水頭比 $200\mu\text{m}$ 粒徑撒水頭所降低的遮蔽率大三倍。

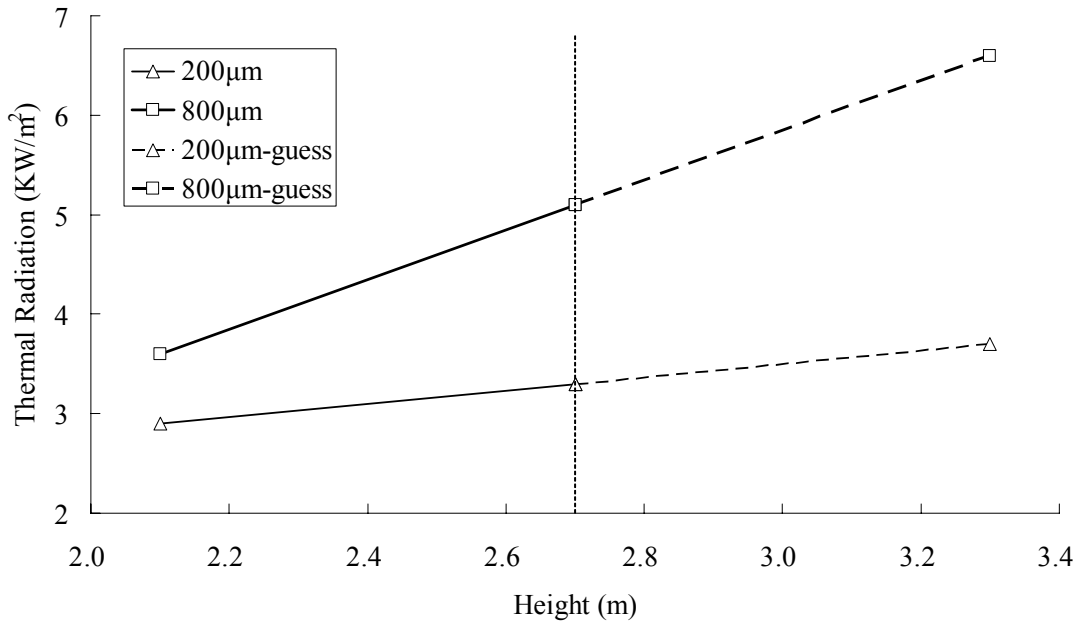


圖 5.10 3L 甲醇在相同粒徑但不同高度之熱輻射值比較圖

(資料來源：本研究整理)

由此可知，高度對於水霧撒水系統的確有所影響，而且當粒徑越大，所造成的影響程度也越高。造成此種現象的可能原因有二：

1. 粒徑 $200\mu\text{m}$ 的水霧液滴無論裝設的位置高低，因其總表面積較大，故較能有效的吸收周圍的熱值。而粒徑 $800\mu\text{m}$ 的水霧液滴在落地之前無法將熱值有效的吸收，且落地後因尚有大量的水滴衝擊地面，會造成擾流，使得熱氣往上流動，故造成粒徑 $800\mu\text{m}$ 的水霧液滴撒水頭裝設越高，衝擊地面的動能越大，造成擾流加劇，使得其量測到熱輻射值越大的現象。
2. 因撒水頭高度提高，所以有可能在水霧液滴落下時，使得液滴與液滴的間距加大，減少了阻擋熱輻射的效能。

表 5.4 不同粒徑的熱輻射遮蔽率比較

		Radiation Attenuation (%)		
		200sec	400sec	600sec
3L-Heptane	200 μm	66.9%	76.4%	78.2%
	400 μm	55.0%	66.3%	69.8%
	600 μm	48.7%	59.7%	67.4%
	800 μm	51.4%	60.7%	69.7%
	Sprinkler	10.6%	12.3%	9.3%
3L-Methanol	200 μm	64.4%	74.7%	75.1%
	400 μm	61.5%	74.9%	78.5%
	600 μm	52.4%	60.8%	71.7%
	800 μm	52.4%	62.6%	73.4%
	Sprinkler	6.8%	13.4%	18.0%
5L-Methanol	200 μm	64.8%	72.4%	75.4%
	400 μm	62.9%	70.1%	74.3%
	600 μm	55.1%	60.4%	64.9%
	800 μm	49.7%	58.2%	62.3%
	Sprinkler	10.6%	10.3%	14.7%

(資料來源：本研究整理)

本研究另一個探討的重點是水霧粒徑對於熱輻射的遮蔽率，由圖 5.5、圖 5.7、圖 5.9 整理成表 5.4。在火災初期（約點火 200 秒後），使用 200 μm 粒徑的水霧撒水系統對熱輻射平均約有 65.4% 的吸收遮蔽率，最大的 800 μm 粒徑水霧撒水系統對熱輻射也有 51.2% 的吸收遮蔽率，而一般撒水頭對熱輻射只有大約 9.3% 的吸收遮蔽率。由此可知，在不同熱輻射值之下，使用水霧撒水系統的確比一般傳統撒水頭更有吸收與遮蔽的效果。尤其是在火災初期，使用水霧撒水系統對於控制火災的延燒是相當有幫助的。

在實驗過程中，也證實水霧撒水系統對於火場的溫度有降溫的作用，如圖 5.10~5.12 所示。在火災初期（約點火 200 秒後），使用

200 μm 粒徑的水霧撒水系統對溫度平均約有 46.52 % 的降溫效果，最大的 800 μm 粒徑水霧撒水系統對溫度也有 25.69 % 的降溫效果，而一般撒水頭在火災初期的降溫效果較不明顯，需直到火災中、後期才有明顯的效果，如表 5.5 所示。由此可知，使用水霧撒水系統比一般撒水頭更早有降溫的效果。尤其是在火災初期，對於控制火災的延燒與幫助人員逃生有正面的幫助。

表 5.5 不同粒徑的溫度吸收率比較

		Temperature Attenuation (%)		
		200sec	400sec	600sec
3L-Heptane	200 μm	42.76%	55.77%	62.33%
	400 μm	38.20%	48.25%	64.17%
	600 μm	13.72%	27.42%	61.43%
	800 μm	23.60%	42.74%	65.16%
	Sprinkler	-3.03%	23.80%	51.69%
3L-Methanol	200 μm	49.87%	60.11%	74.21%
	400 μm	34.53%	54.44%	72.77%
	600 μm	13.61%	37.28%	72.64%
	800 μm	25.11%	42.63%	73.83%
	Sprinkler	-3.28%	29.28%	67.28%
5L-Methanol	200 μm	46.93%	51.01%	31.69%
	400 μm	42.55%	47.73%	33.35%
	600 μm	22.51%	20.53%	9.13%
	800 μm	28.36%	30.51%	24.06%
	Sprinkler	1.67%	12.43%	5.25%

(資料來源：本研究整理)

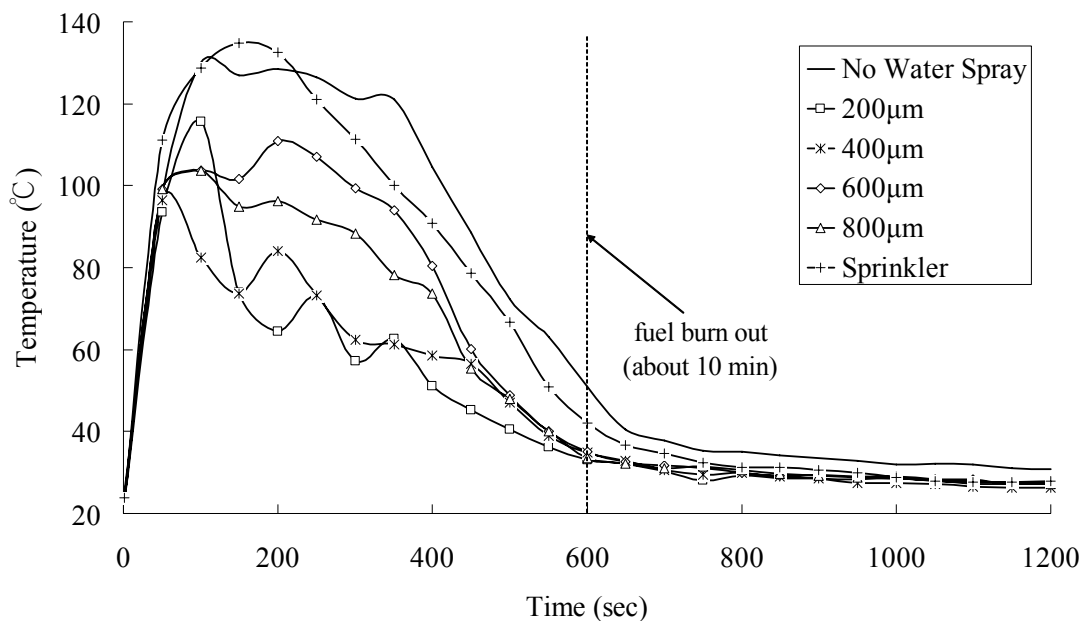


圖 5.11 甲醇 3 公升、撒水頭高度 2.7m 溫度圖

(資料來源：本研究整理)

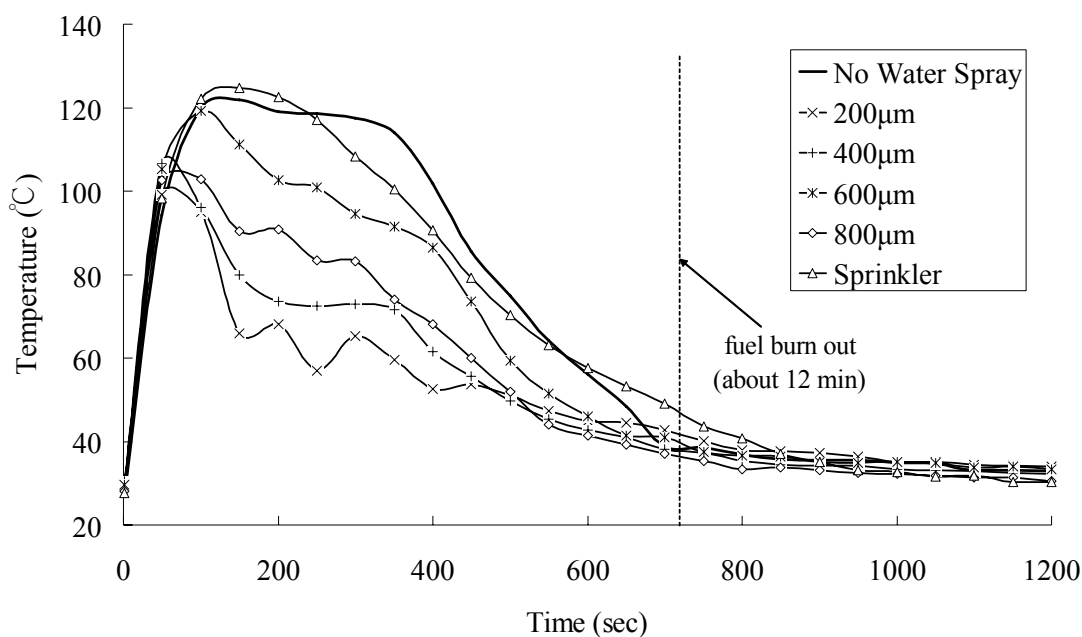


圖 5.12 正庚烷 3 公升、撒水頭高度 2.7m 溫度圖

(資料來源：本研究整理)

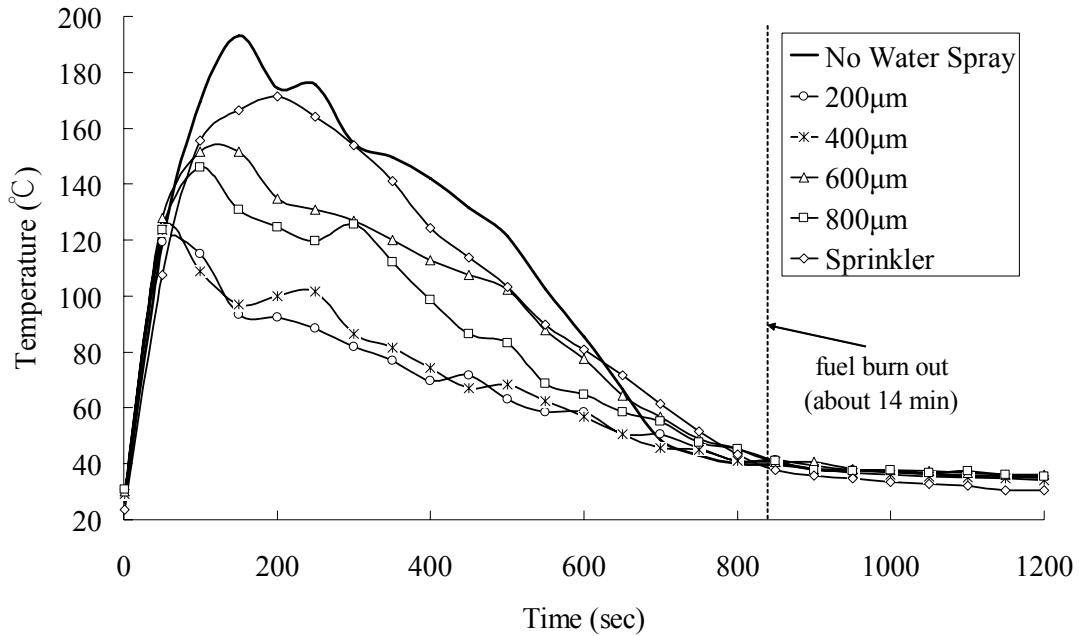


圖 5.13 甲醇 5 公升、撒水頭高度 2.7m 溫度圖

(資料來源：本研究整理)

第二節 FDS 模擬結果與實驗結果比較

本節主要是討論經由 FDS 5.0 版所模擬的結果，與實驗所得到的數據，是否可以相互驗證。

設定熱釋放率 0.5 MW 以及火盤尺寸為 0.85m×0.6m，依照實際的建築-防火工程實驗室建立 FDS 的模型(詳細設定可參閱附錄五)。因為 FDS 本身模擬水霧的參數是以傳統灑水系統為主，粒徑均在 1000µm 以上，故此模擬主要針對無撒水的情況。本研究使用 P4-2.8GHz 雙核心 CPU+4GB 記憶體搭配 Windows XP 系統的單一電腦主機完成模擬時間約五小時。

比較模擬與實驗的熱輻射值，結果如圖 5.14 所示。發現在 100~250 秒時模擬的結果與甲醇 3 公升的實驗結果平均差距 47%，與甲

醇 5 公升的實驗結果平均差距 64%，均超過合理誤差 $\pm 10\%$ 的範圍。

再來比較模擬與實驗的溫度值，結果如圖 5.15 所示。在 100~250 秒時模擬的結果與甲醇 3 公升的實驗結果平均差距 30%，與甲醇 5 公升的實驗結果平均差距 5.6%。

雖然溫度值差異較熱輻射值差異來的小，但整體來看依然超過合理誤差 $\pm 10\%$ 的範圍。故本研究中，經由 FDS 模擬的結果與實驗所得到的數據其驗證結果並不理想。

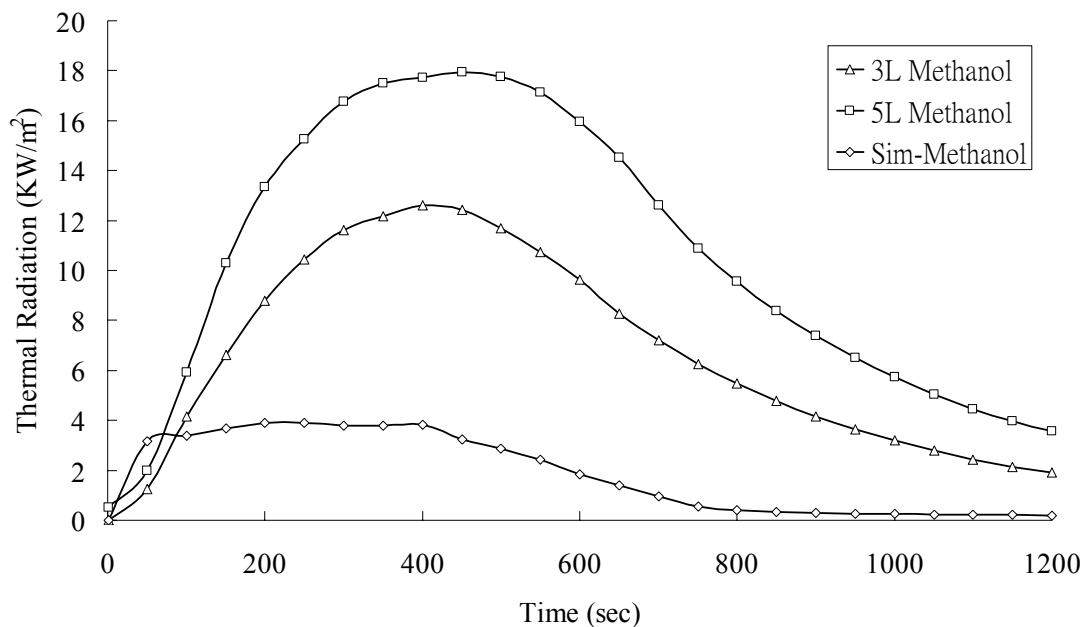


圖 5.14 模擬與實驗所量測之熱輻射值比較

(資料來源：本研究整理)

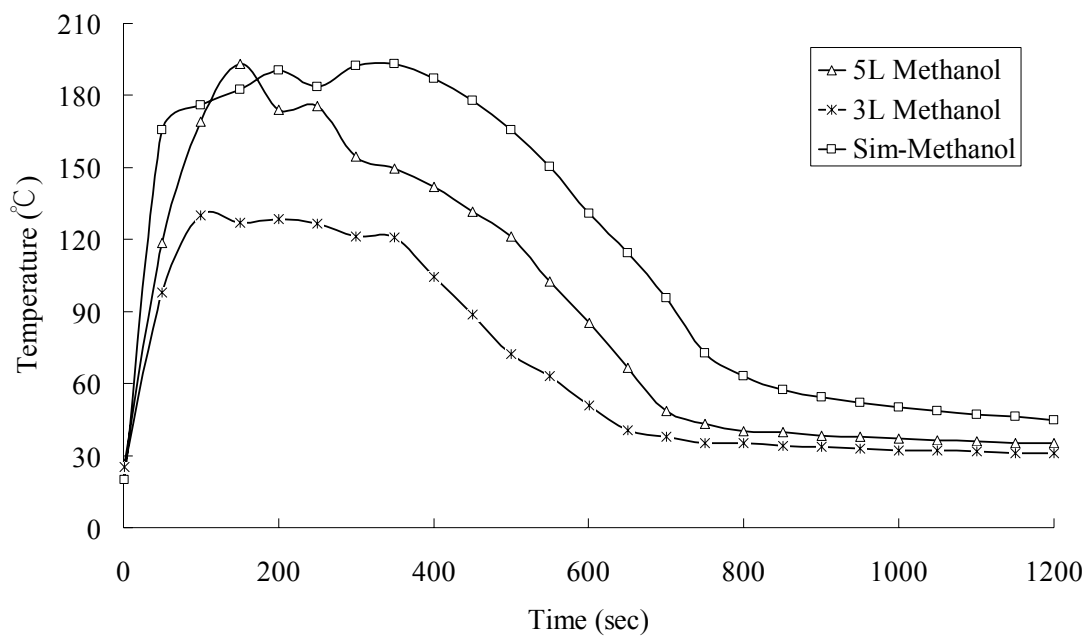


圖 5.15 模擬與實驗所量測之溫度值比較
(資料來源：本研究整理)

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究針對水霧系統之基本特性及其火場控制應用技術進行研究，主要研究水霧粒徑及撒水頭裝設高度等對水霧系統抑火效應之影響，透過理論探討與實際全尺寸實驗研究，找出不同水霧粒徑之差異。希望藉由此研究之進行能找出最佳水霧滅火粒徑及在相關粒徑大小下最佳裝設撒水頭高度位置。實驗中我們分別進行 200 μm 到 800 μm 粒徑大小之噴灑狀態及 2.1m、2.7m 兩種不同撒水頭裝設高度進行交叉實驗分析，找出相關參數對水霧粒徑大小影響之關係。

由相關理論分析及實際實驗之結果可歸納下列幾項結論：

- 一、 本研究結果顯示，使用 200 μm 到 800 μm 粒徑大小的水霧撒水頭，在火場中使用水霧撒水裝置的確能有效吸收與阻隔熱輻射值與溫度，且在相關文獻中也證實水霧系統對滅火也有相當卓越的成效，所以水霧撒水系統的裝設對於人員避難及防止延燒確實有相當大的幫助。
- 二、 在「建築技術規則」中第 79 條規定：『防火構造建築物總樓地板面積在一、五〇〇平方公尺以上者，應按每一、五〇〇平方公尺，以具有一小時以上防火時效之牆壁、防火門窗等防火設備與該處防火構造之樓地板區劃分隔。防火設備並應具有一小時以上之阻熱性。』，目前許多防火設備並無法達到一小時以上之阻

熱性之要求，因此在防火區劃兩側需要淨空距離以防止熱輻射造成延燒，但如果裝設傳統水霧系統即可有效阻止熱輻射傳遞，由本研究結果證明水霧撒水系統之裝設可替代淨空距離之要求。

- 三、 水霧撒水系統啟動過程中，水霧滴會有瞬間增強燃燒的現象，主要是水霧滴噴撒會帶進空氣進入燃油附近之火焰區，當油氣與空氣混合而產生蒸發膨脹之現象，撒水頭距火源越近增強現象越明顯。
- 四、 由實驗證明，在相同裝設高度，粒徑 $200\mu\text{m}$ 的水霧比粒徑 $800\mu\text{m}$ 的水霧更能吸收與阻擋熱輻射。如：撒水頭裝設在 2.7m 時，使用粒徑 $200\mu\text{m}$ 的水霧比粒徑 $800\mu\text{m}$ 的水霧約增加 35% 的吸收與遮蔽的效果。若裝設在不同高度，裝設的高度升高，其吸收與遮蔽的效果反而會降低。如：使用粒徑 $200\mu\text{m}$ 的水霧裝設在 2.1m 升高到 2.7m 時，降低約 14% 吸收與遮蔽的效果。由此可知水霧撒水系統中，「粒徑」的選擇會造成最大的影響。
- 五、 比較水霧撒水系統與傳統撒水頭對熱輻射的遮蔽率，由實驗結果發現，在火災初期使用粒徑 $200\mu\text{m}$ 到 $800\mu\text{m}$ 的水霧撒水系統約有 50~65% 的遮蔽率，而傳統撒水頭只有 10% 左右的遮蔽率，水霧撒水系統對熱輻射的遮蔽率大約是傳統撒水系統的五~六倍。
- 六、 比較水霧撒水系統與傳統撒水頭的降溫效果，由實驗結果發現，在火災初期使用粒徑 $200\mu\text{m}$ 到 $800\mu\text{m}$ 的水霧撒水系統約有 25~46% 的降溫效果，而傳統撒水頭在火災初期對火場溫度降溫的效果較不明顯，所以水霧撒水系統的降溫效果大約是傳統撒水系統的二~四倍。

第二節 後續研究建議

由於本研究受限於經費及自行設計撒水頭噴撒條件，同時影響水霧系統的參數相對較多也複雜，有些參數甚至具有交互作用之影響，因此本研究僅能針對限定相關參數來進行探討。對於後續延續及未來可行之研究方向敘述如下：

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、內政部消防署

為討論粒徑之效應對水霧效能之影響，因此利用自行開發製作之撒水頭以便產生不同粒徑大小，然而相對在噴撒條件上也受到限制，未來可以針對市售撒水頭且一次以多個為一組進行實驗，所得到的數據將更為實用。

在本研究中採用甲醇與正庚烷為燃料之池火源，建議可針對日常生活中容易引發火災的電器設備及其他液態燃料進行比較研究，可了解對於不同類型火源，水霧撒水系統效能與抑火機制之差異與限制。

火災現場若有人員逃生之情況，則水滴粒徑及汽化量須考量大量熱蒸汽對人員傷害及視線之遮蔽。撒水頭與油池的相對位置，並未在實驗中考量，可增加此參數以作為未來區劃規劃之參考。

FDS 撒水的模擬結果可能無法直接和水霧的實驗結果作比較，英國有一套軟體 FIREDASS 是模擬水霧滅火效能，建議後續研究可使用並納入探討。

長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、內政部消防署

實際的火場中，除了水霧放水量大小外，水霧滴在蒸發前能吸收和遮蔽多少熱輻射值與溫度，此將會影響水霧滅火之效能，尤其是靠火焰及燃料表面吸熱冷卻作為主要滅火機制之情況，建議後續研究可納入探討。

從工程實務的觀點上來看，本研究可延伸探討熱輻射對建材強度的影響，了解在火場中建築物受熱輻射所造成的損害，分析是否可以藉由水霧撒水系統減少熱輻射對建材的傷害以減少對人員逃生時有可能發生之危害，進而提出實際建築案例之水霧系統應用最佳設計。

細水霧所實驗過的尺寸可容許使用在比初始實驗環境更小的環境之中，所以 scale factor 需要考慮。若有考慮中介變數的量測，如：氧的濃度被稀釋了多少、水的密度...等等，會使實驗更加準確。不同的燃料會產生不同的煙霧，例如正庚烷比甲醇的煙更大，是否會影響實驗結果，建議可列入未來實驗規劃中。

建議未來實驗中能探討接近閃燃狀態之火災，撒水頭標準放水量下，放水壓力 1kgf/cm^2 時，滅火控制過程之熱輻射效應，以及在區劃中無灑水狀況，開口部或區劃交界處撒水作用下熱輻射之差異性。

粒徑小受 fire plume 影響應會較大，但在火災成長期隨時間變化輻射熱也隨之變大，應有以溫度或熱輻射值為固定值，觀察 fire plume 現象，是否粒徑大小受火焰或 fire plume 影響較大，此時再來探討高度對粒徑之影響。水壓力大小會對空間熱煙壓力產生變化，而後續吸熱效果才會明顯有滅火跡象，而壓力大才能侷限火災延燒，建議後續對堆積可燃物進行探討。

附錄一 期初審查會議記錄回覆情形

項次	專家學者	審查意見	回覆意見
1	邱教授文豐	1. 火載量選擇之條件及依據等，建請界定清楚，可參考現行法規中各類場所內裝種類燃燒 HRR 熱釋放率大小。	熱釋放率將參考現行法規界定清楚
		2. 建議排除對流熱傳導對撒水頭動作之影響及延燒之影響，而目標以精確量測輻射熱傳，推論降低輻射熱傳對撒水滅火之效能。	實驗將不考慮對流、熱傳效應
		3. 建議研究方向區分(1)熱輻射滅火控制(2)火勢熱流造成延燒擴大穿過防火區劃開口部熱輻射控制，二方面之相關參數之研究(HRR變化，撒水水量，口徑大小，工作壓力，粒徑，輻射熱值(如防止延燒 < 12.5KW/m ² ，閃燃 < 20KW/m ² ，溫度...等)。	依照委員意見修改
		4. 如何量測水滴之有效噴撒密度？僅以 Load Cell 量測得到？	本實驗量測水滴粒徑，並無量測水滴密度
2	陳教授金蓮	1. 本實驗的燃燒物是否含有塗料。	不含塗料
		2. 本研究有關人員燒傷程度如何分級。	不在本研究範圍內
		3. 本計畫之實驗參數選用原因為何？且如何將各參數間的交互影響納入考慮，建議採用田口式實驗法進行實驗設計。	實驗參數之選定是以水霧系統設計所需參數為優先
		4. 實驗時如何將熱傳導及熱對流影響排除。	實驗將不考慮對流、熱傳效應

3	簡教授賢文(書面)	1. 參考文獻宜引用近幾年國內外研究成果並加以比對分析，以確立本案之創新性。	若本案時間上許可將依建議納入
		2. 研究目的及研究適用對象空間可更明確界定。	依建議修改
		3. 實驗所採撒水頭高度1.7m, 2.1m, 2.7m及排煙量480m ³ /hr, 600m ³ /hr, 720m ³ /hr, 宜說明其意義。	本實驗採用2.1m、2.7m撒水頭高度是因為一般建築物撒水頭大多設置在此高度，而本實驗不考慮排煙量。
		4. 本案有其研究上之價值性，值得支持。	謝謝指教
		5. 是否可進行多個撒水頭之實驗計畫，俾觀察其整體性控火效果。	若建議所指為「同時」使用多個撒水頭，此為不在本研究範圍內，但會將其列入未來建議規劃
4	林教授文興(書面)	1. 本研究採用何種撒水頭測試？(細水霧或水霧)	測試範圍從200μm到800μm，涵蓋細水霧及水霧
		2. 撒水頭之配置方式，放水壓力及流量之標準為何？	報告中會加以說明
		3. 實驗中有無考慮不同火源規模所造成之影響？	有，報告中會加以說明
5	中華民國建築學會代表林裕昌	1. 本研究宜針對單一區劃或單一居室進行探討。	實用空間將以單一區劃為主
		2. 可考慮將建築物水損程度納入研究。	本研究暫不考慮建築物水損程度
		3. 本研究計畫書內部分宜重新排版及修正，如研究助理蕭敬倫學歷為大學或是碩士生。	依建議修改
6	中華民國土木工程技師公會全國聯合會代表鍾肇滿	1. 從工程實務的觀點上來看，建議本研究計劃能增加探討熱輻射對構材強度的影響。	若本案時間上許可將依建議納入
		2. 建議能將研究成果納入設計規範以利建築設計與規劃。	可列入未來建議規劃中

7	陳組長建忠	1. 有關預期成果 1.不同火載量所稱的是能量？或密度？或型態？實驗設計如何鋪築，請說明。而成果 2.更為複雜，其實驗組合為何？成果 3.的應用成果是如何？（本案本所已做過相關研究案，是否有何延續）	不同火載量為能量，實驗設計在報告中會加以說明
		2. 計畫書研究背景 Hankins 實驗之圖 1 設有撒水設備 10 分鐘內的溫度皆約在 400°F 內並無法避難，是否屬實，請再確認。	該溫度為天花板下之溫度
		3. 請考慮本研究的實驗場所，本所煙控實驗塔之面積、高度、樓層狀況，較符合高樓滅火之需，以及儀器設備調度比較方便，且雲科大與本所距離十分方便，亦是本所與其他北部學校所羨慕之條件，請多加利用。	謝謝指教
		4. 請本計畫填列 KPI 效益說明等表，隨時供研究階段檢視，並列於研究成果，俾本所擬新年度科技計畫及考核之用。	依委員建議進行
		5. 本研究是「通風」還是「換氣」？請與法規用詞一致。	通風與換氣用詞統一使用「通風」
		6. 口頭報告之設計撒水頭請以本所名義申請專利。	依委員建議進行
8	業務單位意見	1. 本所進行防火鐵捲門試驗時，實驗場確實受到熱輻射影響導致部分設備損害，而加設水霧撒水頭後已有效降低熱輻射影響，建議火載量設計所產生的熱輻射值宜與標準火災升溫所產生的熱輻射值相當。	依委員建議進行

附錄二 期中審查會議記錄回覆情形

項次	專家學者	審查意見	回覆意見
1	邱教授文豐	1. 依預期成果完成一定樓地板面積下，特定火載量，不同通風條件，不同噴水量，不同粒徑，不同放水量，不同距離狀況下對火災熱輻射釋放率之量化分析；唯火載量種類期中報告中應增列說明。	目前實驗規劃中，參數尚未全部納入，不同火載量會考慮在內
		2. 有關研究驗證部分，實驗採用水霧撒水頭，與模擬FDS採用一般撒水頭，其粒徑、放水量、火盤大小均相異，如何對照比較其關聯性？	火盤大小是相同的，而FDS使用一般的撒水頭的模擬只能證明一般撒水頭對於降低熱輻射仍有助益
		3. 期中報告內容部分，建議於第三章中，增加火災中熱輻射量化分析，例如甲醇(methanol)熱輻射約為原燃燒釋熱率之17%($q_R = x_r Q / 4 \pi c^2$) (依燃料不同 x_r 約15~20%, c : 距離)等；以及增加水滴粒子大小滅火效能，量化分析，例如多少 μm 之吸熱效果最佳？穿透火焰，抑制火焰，抵抗熱浮力等影響。第四章更改為水系統滅火設備。增加撒水、水霧。	本計畫是先利用人工運算固定面積可承受的熱輻射值，再經由實驗量測比較
		4. p12，公式2.4熱輻射形狀係數(F)數據 $2/\pi$ 似乎錯誤，應為 $1/2\pi$ ，故結論部分表6.2，6.3，6.4均應更正，相對誤差百分比，結果應修正。	公式2.4的 $2/\pi$ 為筆誤，應為 $1/2\pi$ ，報告書會予以更正

		<p>5. 撒水作用下，火源的熱釋放率與淨空距離變化關係，目前 FDS 模擬結果具體，實驗部分尚未完成，至於 FDS 模擬之基本輸入檔參數，如開口大小，通風或排煙量大小，撒水頭之 K 值，放水壓力，請明示。</p>	<p>依委員建議放入 FDS Input Data</p>
		<p>6. 本研究案實驗採用水霧探究火災熱輻射危害控制，依實務及法規，場所均採一般撒水系統，可否增列一般撒水系統對熱輻射危害控制，希望有具體成果或研究發現(例如排煙量 $1\text{cm}^3/\text{m}^2$，放水量 80 l/min 等參數)。</p>	<p>依委員意見列入規劃</p>
<p>2</p>	<p>徐建築師文志</p>	<p>1. 目前防火捲門已有達到阻熱性之效果，而水系統經由本研究之理論與實驗結果應用於性能設計之防火工程技術之提升，值得肯定。而藉由本研究具體提出實際建築案例之水系統應用之最佳設計為何?</p>	<p>防火鐵捲門大多未具有阻熱性，如在其背後使用時，必須要有一定的淨空距離，若採用水系統防護，則須要了解撒水頭密度等參數，才能取消淨空距離，本研究目的先獲得一降低熱輻射的相對值，並探討現有的法規淨空規定的實用性</p>
<p>3</p>	<p>許教授政行</p>	<p>1. 火災現場若有人員逃生之情況，則水滴粒徑及汽化量須考量大量熱蒸汽對人員傷害及視線之遮蔽。因此撒水時間之模擬選擇應列入危害控制之考慮。</p>	<p>本研究並無使用 FDS 軟體模擬水霧撒水，故不列入考慮，但會依委員建議加入未來規劃之中</p>
		<p>2. 撒水頭與油池的相對位置，並未在實驗中考量，或許在下一期計畫中，增加此參數以作為未來區劃規劃之參考。</p>	<p>依委員意見列入未來規劃</p>

4	陳教授俊勳	1. 本研究之水系統依期中報告內容看來應是水霧，所以應先釐清其特性，例如高、中、低壓的分類以及粒徑大小的分類，另外以一個撒水頭依背壓的不同而能產生不同的粒徑，此說法請確認。	依委員建議增列說明
		2. FDS 撒水的模擬結果可能無法直接去和水霧的實驗結果作比較，英國有一套軟體 FIRDASS 是模擬水霧滅火效能，請參卓。	本研究並未規劃使用此軟體，但會依委員建議列入未來規劃
		3. 在報告內容中，第五章應算是結果與討論，而不是結論，另外英文摘要須再加強修正。	依委員建議修改
		4. 在實驗中採用工業用甲醇，請說明其原因。	火源採用甲醇之緣由，係避免實驗室環境清潔遭破壞
		5. 建議第二，三及四章再整合。	依委員建議修改
5	蔡教授匡忠	1. 研究欲探討不同火載量火源之輻射效應，報告中未見不同火載量火源之規劃方式，另燃料用甲醇，其輻射熱不大，請說明使用甲醇之原因。	熱輻射的量測，與燃料容積有關，為避免實驗時對人員及儀器造成危害，故採用容積小、蓄熱時間較長的安全燃料
		2. 排煙設備之位置須明確標出。	通風會造成熱散失，導致無法量測熱輻射量，本研究實驗不考慮通風情形
		3. 預期成果中探討「不同水頭數量」之效應，實驗規劃中未標出。	本研究暫不考慮，但依委員建議列入未來規劃
		4. 水霧之產生依報告係由改變壓力，繼而產生不同粒徑及流量之水霧，請說明如何分別探討粒徑、噴水量之效應。	會在報告中增列說明

6	中華民國土木工程技師公會全國聯合會代表	1. 熱輻射對於混凝土保護層內鋼筋之影響如何?	不在本研究範圍內，但會依委員意見列入未來規劃
		2. 熱輻射對於混凝土表面溫度之影響如何?	不在本研究範圍內，但會依委員意見列入未來規劃
		3. 熱輻射對於四面圍體、三面圍體、二面圍體之混凝土牆之影響如何?	不在本研究範圍內，但會依委員意見列入未來規劃
7	中華民國消防設備師公會全國聯合會代表	1. 第五章第二節火盤面積被定義為圓盤直徑 1.128m，換算成面積約為 1m ² ，與實驗之假設火源 0.84×0.59 ÷ 0.5m ² 有差異，請說明原因?	因 0.84×0.59 為 A1 尺寸，本研究預計使用兩個火盤，報告中會依委員意見修改說明
		2. 表 6.3 與表 6.4 顯示量測點在一公尺處之誤差最大分別為 21.55% 及 11.45%，結論說已相當接近，請說明依據何在?	雖說有 21.55% 的誤差，但依估計值來看，約只有 0.07 KW/m ² 的差異，所以以相當接近作為結論說明，且此部分以實驗為主，故會在期末報告中加以修改
		3. 表 5.1 水霧粒徑與 water flow rate 之關係，請說明粒徑變大時，為何流量反而減少?	總流量不變的情況下，粒徑越大，流率越小
		4. 通風量 480m ³ /hr、600m ³ /hr、720m ³ /hr 設計目的何在，請說明。	通風會造成熱散失，導致無法量測熱輻射量，本研究實驗不考慮通風情形
8	陳組長建忠	1. 本案係新建實驗設備，就近於雲科大進行多次實驗，期末報告時，宜針對本所台南實驗中心進行實驗室移植，及技術移轉本所相關人員。	依委員建議加以考量
		2. 宜找出 FDS 使用輻射熱之算法基礎，否則只是驗證其「黑箱」而已，無法掌握全貌。	依委員建議修改
		3. 本研究理論部分敘述甚多，其文獻來源宜詳列，並補充背景敘述。	依委員建議修改

		4. 本案以水系統來命題，主要是今年已有其他案進行水霧研究業有分工，所以本案不能只做水霧的效能。	本計畫將實際建築案例之水系統應用，納入比較探討
9	業務單位意見	1. 請說明熱輻射計安裝高度的考慮因素。	熱輻射計安裝高度 1.8m，係考慮人的呼吸地帶
		2. 原研究計畫書之火源種類為固態及液態燃料，期中報告書僅規劃甲醇，是否遺漏未考慮？	本實驗在時間上無法列入期中報告之前，但會在期末報告中至少增加另一種液態燃料加以佐證。
		3. 本研究實驗規劃有無探討不同火載量影響？	有，會在報告書中加以說明
		4. 本計畫利用 FDS 軟體模擬，請於報告書內提供相關輸入資料，以利使用參考。	依建議增加 FDS DATA 至報告書中

附錄三 期末審查會議記錄回覆情形

編號	審查委員	審查意見	回覆
1	邱教授文豐	1.本案仍以水霧撒水頭之放水對火災熱輻射控制，唯圖 5.2~圖 5.5 出現撒水頭，建議修正，並請補充撒水頭之配置圖。	依委員意見修改
		2.水霧冷卻降低輻射效果佳，尤其在相同粒徑上之研究具體，結果很有價值。	謝謝指教
		3.實驗規劃燃料(甲醇)產生之溫度最高 120°C，3L 最高熱輻射約 14.5KW，對延燒而言可具威脅性，反之 2L 則否，另閃燃成災 700°C 以上 (20KW/m ²)，恐有很大差距，本案對避難逃生通道或區劃延燒替代性上恐無法達成。	本計畫希冀為防火工程性能設計鋪路，如防火鐵捲門阻熱性替代方案，可考慮設置水幕或撒水頭，但撒水量、粒徑大小、設置高度及降低熱輻射值等設計參數未知，期望本研究成果可初步提供基本資料。
2	唐教授雲明	1.研究結論中，除水霧撒水頭裝置高度不同 (2.1m 與 2.7m)，及粒徑不同 (200μm, 800μm) 會有不同結果之討論與預期成果 4 稍有關係，其餘 3 項預期成果似未有交代。	不同粒徑大小及不同火載量之實驗已補做，同時結果已在報告中補上。
		2.本案利用 FDS 模擬無撒水情形，僅描述其「熱輻射值與實驗所得的熱輻射值相差甚遠」(p.49)，然而具體數據資料並未呈現，亦未說明可能之原因，建議亦可列出參考比較！	依委員意見修改

3	徐董事長文志	1.本研究對於降低熱輻射相對值的成果深具價值，但對於在建築案例中之最佳設計為何？建議有所探討。	本研究暫不考慮最佳設計，但會列入未來建議規劃中
		2.實驗量測之高度及位置，請補充取樣原則。	依委員意見補充
4	許教授政行	1.結論顯示水霧撒水裝置確實有效隔離熱值，對撒水頭高度之敏感度也作了探討，建議相當明確，對水霧基本物理特性之結論也明確表達。	謝謝指教
		2.建議後續研究加上不同類型燃料之發熱，撒水頭位置、流量等參數效應之探討。其次粒徑/高度與熱輻射關係應可深入探索，增加不同粒徑尺寸及撒水頭高度，應可找出最佳設計參數。	依委員建議加入後續研究
5	曾教授偉文	1.文中出現「水滅火系統」、「水霧」、「水霧」等不同名詞（如 p.1、p.3 等），建議統一，免得定義會產生衝突，如 p.1 中水系統滅火設備具有低耗水量就不能適用放水型系統。	報告書有關用語、字型及大小統一修正
		2.建議定義市面上及國外法規水霧與水霧系統。	依委員意見列入報告
		3.結論文字敘述，建請明確回應前述章節。	依委員意見修改

		4.p.52 結論四、中「大小粒徑水霧與高度的影響」，實驗只採 2 種粒徑，如何定義大小粒徑；另外在 p.44 及 p.45 實驗結果似乎很難對應結論。	有關大小粒徑定義直接以粒徑值表示，實驗數據部分會再加以補充
6	練理事長福星	1.建議再增加大於 2.7m 撒水頭高度之實驗，以符合實際高層建築物撒水頭高度，並描述不同撒水頭高度下之水霧粒徑於實驗過程中變化。	本研究欲增加一組大於 2.7m 撒水頭高度實驗，與現有實驗資料比較，但因本實驗區高度限制，僅能實做 2.7m 以下的高度來推算 3m 以上高度之數據。
		2.水霧粒徑變化，勿以大小表示，宜直接用粒徑值表示。	有關大小粒徑定義直接以粒徑值表示
7	中華民國土木工程技師公會全國聯合會	1.p.31 頁第四章第一節第一行請將「本校」以全名表示。	依委員意見修改
		2.防火工程實驗中實驗區實驗中是否密閉？有無通風？由何方向進入？請予說明，以符實驗之周延性。	本實驗不考慮通風，火盤尺寸標示予以修正
8	中華民國消防設備師公會全國聯合會	1.摘要第八頁第六行「在相同粒徑下……」與後面陳述，似有不符，請釐清。	依委員意見修改
		2.字型、大小應做統一。	依委員意見修改
		3.報告中用語應一致，如 p.27 「超聲波震盪……」與 p.29 「超音速流」。	兩者所指並不相同，「超聲波震盪」是指水霧的產生方法之一，「超音速流」是指粒徑量測儀的量測速度
		4.單位應採用國際標準公制單位，如泵浦出口壓力應為 Mpa 而非 kgf/cm ² 。	因儀器單位是 kgf/cm ² ，故以此為主，依意見在表後附上換算標準。
		5.表 5.2~表 5.5 (p.46、p.47) 說明，應明確標示「熱輻射值」差異比較。	依委員意見修改

9	蔡研究員銘儒	<p>1.預期成果 1 水系統對火災熱輻射危害之量化分析，有無具體結果？僅油類燃燒及</p> <p>2 種燃料量以及水霧系統可否應用於所有水系統對火災熱輻射危害控制。</p>	<p>1.不同火載量的熱輻射量測已有列入報告之中，請參閱，會再增加相關數據以供參考</p> <p>2.目前以正庚烷及酒精進行實驗，正庚烷本身為較難撲滅之油類火災，應當具有代表性。</p>
		<p>2.研究實驗規劃通風條件、水頭數量為何？依預期成果 2 水頭與火源距離及不同水頭數量是否有進行？其結果為何？撒水頭高度取決條件？</p>	<p>1.本研究並無規劃通風</p> <p>2.一次使用一組不同粒徑水頭，不同水頭數量並無進行，會列入建議規劃</p> <p>3.參考現有撒水頭高度</p>
		<p>3.研究結果第 1 點宜提出量化效果，第 2 點火勢非常大之具體定義範圍，有無驗證資料佐證。</p>	<p>此為依據結果所做的合理假設，水系統係能將火場溫度壓制在閃燃溫度以下予以滅火，如為獲得高溫資料須將火載量提高，易造成熱輻射計（一般超過 300°C 以上）損壞，未來實驗會試圖提高火載量</p>
		<p>4.所謂大粒徑，其粒徑為何？其對熱輻射危害控制有效臨界粒徑為何？</p>	<p>1. 有關大小粒徑定義直接以粒徑值表示</p> <p>2. 尚未得到臨界粒徑相關參數</p>
		<p>5.溫度點位置應列示，FDS 模擬取測點是那一點位置？輻射計高度？其他兩點之結果比較是否有差異？FDS 模擬資料列示於報告可供參考。</p>	<p>原期末報告中即包含委員意見的說明，但會再加以整理</p>
10	陳建忠組長	<p>1.水系統的理論分析，只列水霧顯有不足，請將泛用之水系統撒水、水霧，依系統、使用空間加以納入研析。</p>	<p>研究結果已放入撒水、水霧，及細水霧對熱輻射危害控制之量化分析</p>

		<p>2.有關雲科大防火工程實驗室太小，可考量使用本所防火實驗室。</p>	<p>於建研所防火實驗室進行實驗的確有空間上的助益，但是對於實驗的時間分配與場地的規劃及儀器的架設，有許多的不便，且本研究初期以單一噴頭取得實驗數據為主，至建研所防火實驗室進行實驗等相關事宜列入未來多噴頭實驗規劃之中。</p>
		<p>3.FDS 僅量 A 測點，沒用到軟體可設多測點之特性（殊為可惜）。</p>	<p>因尚未得到單一測點的確定模擬結果，故不以多測點模擬</p>
		<p>4.實驗值與模擬值有圖 5-6 比較值化說明差異不大，如何比較差異不大，如尖峰溫度 120°C 差距即目視有 20°C 之差，可稱不大？另熱輻射則稱差異不大，並無數值表及圖形來表示。</p>	<p>1.模擬本應比實際所得的數據較高方為保守值，差異一般在±10%視為可接受。 2.熱輻射部分模擬與實際差距甚遠，數值或圖表會依意見補充。</p>
		<p>5.實驗尚未完成請趕辦，研究成果與四項預期成果比較進度、內容尚有努力空間，請協助完成。</p>	<p>依委員意見進行</p>
		<p>6.本報告可作為優良教材，但實驗數值宜列表詳加以補充。</p>	<p>謝謝指教</p>
		<p>7.本人所提建議多項並未於研究各章充實，僅表示依建議修改。</p>	<p>依委員意見加以補充</p>
		<p>8.有關理想實驗室尺寸、設備器材，請具體規劃設計，列於報告或附錄。</p>	<p>本研究實驗規劃以實驗概要表（包括設備、實驗步驟等）列於報告書</p>

		9.為配合科技計畫之研擬,請向本所承辦同仁索取SWOT、KPI、OUTPUT及OUTCOME等相關表格,詳予填列。	依委員意見回覆相關表格
11	業務單位意見	1.請補充對現有的法規淨空規定之實用性探討。	依建議補充對現有的法規之實用性探討。
		2.請增加不同火源種類之熱輻射釋放率量化分析。	依建議加入報告之中
		3.本研究報告書 p.53 表示受限場地無法模擬全尺寸多撒水頭配置實驗,本所防火實驗中心可提供相關場地。	於建研所防火實驗室進行實驗的確有空間上的助益,但是對於實驗的時間分配與場地的規劃及儀器的架設,有許多的不便,且本研究初期以單一噴頭取得實驗數據為主,至建研所防火實驗室進行實驗等相關事宜列入未來多噴頭實驗規劃之中。

附錄四 專家學者座談會會議記錄回覆情形

編號	審查委員	審查意見	回覆
1	沈教授子勝	1. 是否有可能把誤施的結果當作實驗的結果，比如：熱輻射計可能被水霧所覆蓋，是否會影響實驗結果？	在熱輻射計與 thermocouple 上面均有加口形罩，以防止水霧直接影響實驗數據。
		2. 水霧所實驗過的尺寸可容許使用在比初始實驗環境更小的環境之中，所以 scale factor 需要考慮。	依建議列入未來建議規劃
		3. 若有中介變數的量測，如：氧的濃度被稀釋了多少、水的密度...等等，會使實驗更加準確，建議在未來規劃中可加入考慮。	依建議列入未來建議規劃
		4. 不同的燃料會產生不同的煙霧，例如正庚烷比甲醇的煙更大，是否會影響實驗結果，建議可列入未來實驗規劃。	依建議列入未來建議規劃
2	吳教授玉祥	1. 在第三章中的 $Dv_{0.9}$ 未定義清楚，希望能加以說明。	依建議補充說明
		2. 是否有資料或數據可資佐證實驗中所使用的 200 μm 、400 μm 、600 μm 、800 μm 粒徑確實為所標示的粒徑。	此粒徑是使用粒徑量測儀多次測量而得，粒徑量測儀資料有表附於報告之中
		3. 實驗中所使用的 3 點 thermocouple 的意義為何？	裝置 thermocouple 的用意主要是對照 FDS 模擬，比較實驗值與模擬差異性。
		4. 實驗中用水是否持續？報告中 p.41 中 Lpm 的單位建議改為 L/min，較為清楚。而所使用的 12 Lpm 是依據什麼做定義？	1. 實驗中供水是持續的 2. 依建議修改 3. 水量固定，data 才有參考價值。12 Lpm 是依據實驗所需而設定的。

		5. 第三章的公式單位需加以標示。	依建議修改補充
		6. 第三章的公式在本研究中所應用的地方為何？是否可與已取得的實驗 data 做驗證。	所列的公式原先僅提供參考之用，但因目前已取得許多數據，會加以應用、驗證。
		7. 中英文摘要與表次需再修改及補強。	依建議修改補充
		8. 表 4.1 的操作單位 kgf/cm^3 應修正為 kgf/cm^2 。	依建議修改
		9. 若報告中能加入圖片說明會更加清楚。	依建議修改補充
3	李副研究員其忠	1. 若將來要移植台南實驗中心，一些相關參數該如何設定？	首先要釐清移植之後的目的為何？若是要做水霧撒水頭效能的驗證認可，那本研究的配置即可，否則只能以個案設計所需的配置。建議建研所防火實驗室進行未來可規劃多噴頭相關實驗。
		2. 熱輻射計的量測數據是否單純為熱輻射？或是有包含熱對流在內？	熱輻射計所量測的數值為熱通量，包含熱輻射及熱對流，但因本研究不考慮熱對流所造成的影響，故在本研究中均以熱輻射稱之。
		3. 有承諾加做撒水頭 3m 以上的數據，請補足。	本有計畫加做 3m 以上高度的 data，但後來發現本研究位於雲科大實驗場水頭設置高度上限只到 2.7m，故將此部分列入未來規劃之中。
4	陳組長建忠	1. 撒水頭的水使用的更多，為何效果較差？	撒水頭水滴很大，水霧水滴小，所以水霧的表面積總數較大，所以雖然撒水頭使用的水量較多，但效果不如水霧好。

		<p>2. 要移植的話，所需要的空間或相關參數為何？有具體說明為佳。</p>	<p>1.首先要釐清移植之後的目的為何？若是要做水霧撒水頭效能的驗證認可，那本研究的配置即可，否則只能以個案設計所需的配置。建議建研所防火實驗室進行未來可規劃多噴頭相關實驗。</p> <p>2.會將本研究所設定的相關參數，列表附於報告之中。</p>
5	邱教授文豐(書面意見)	<p>1.小尺寸實驗已在水系統滅火控制火災熱輻射上獲得正面效益，且發現不同水滴粒徑之冷卻效果。</p>	<p>謝謝指教</p>
		<p>2.建議未來全尺寸實驗中能探討接近閃燃狀態之火災，撒水頭標準放水量下，放水壓力 1kgf/cm^2 時，滅火控制過程之熱輻射效應，以及在區劃中無撒水狀況，開口部或區劃交界處撒水作用下熱輻射之差異性。</p>	<p>依建議列入未來建議規劃</p>
6	吳大隊長武泰(書面意見)	<p>1.甲醇以油盤方式燃燒，對空間初期屬自由空間火災，其HRR（熱釋放率）或許以對流及輻射呈現，但熱源本身可忽略，此時開口對熱散失有影響，所以撒水頭高度、粒徑大小、開口可能存在某些函數關係，建議後續可列入探討。</p>	<p>依建議列入未來建議規劃</p>

		<p>2.粒徑小受 fire plume 影響應會較大，但在火災成長期隨時間變化輻射熱也隨之變大，應有以溫度或熱輻射值為固定值，觀察 fire plume 現象，是否粒徑大小受火焰或羽流 (fire plume) 影響較大，此時再來探討高度對粒徑之影響。</p>	<p>依建議列入未來建議規劃</p>
		<p>3.水壓力大小會對空間熱煙壓力產生變化，而後續吸熱效果才會明顯有滅火跡象，而壓力大才能侷限火災延燒，建議後續對堆積可燃物進行探討。</p>	<p>依建議列入未來建議規劃</p>

附錄五 FDS Input Data

```

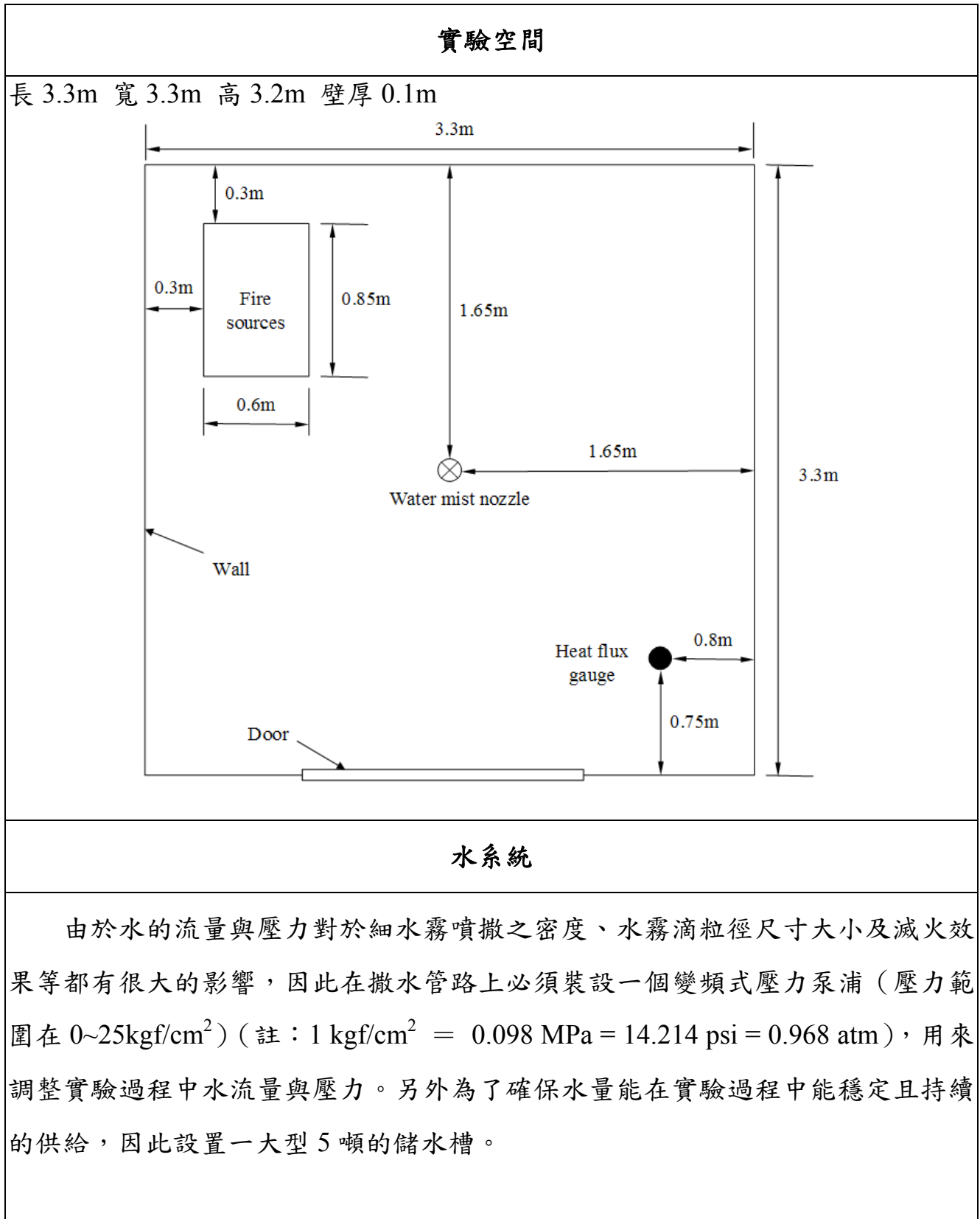
&HEAD CHID='lab',TITLE='radiation of lab' /
&MESH IJK=36,36,36, XB=6,9.6,-1.8,1.8,0,3.6 /
&TIME DT=1,TWFIN=1200. /
&RADI NUMBER_RADIATION_ANGLES=100
    TIME_STEP_INCREMENT = 1
    ANGLE_INCREMENT = 1
    KAPPA0 = 1.0
    WIDE_BAND_MODEL=.TRUE.
    RADIATIVE_FRACTION=0.0 /
&SURF ID = 'BURNER'
    EMISSIVITY = 1.
    MATL_ID ='METHANOL_C'
    COLOR    = 'RED'
    HEAT_OF_VAPORIZATION = 1101.
    HRRPUA   = 500.
    RAMP_Q = 'HRR' /
&MATL ID = 'METHANOL_C'
    HEAT_OF_COMBUSTION= 19800.
    DENSITY = 790.
    SPECIFIC_HEAT = 2.5
    CONDUCTIVITY = 0.20 /
&RAMP ID='HRR',T=0.0,F=0.0 /
&RAMP ID='HRR',T=3.0,F=1.0 /
&RAMP ID='HRR',T=360.0,F=1.0 /
&RAMP ID='HRR',T=720.0,F=0.0 /
&REAC ID  = 'METHANOL'
    FYI    = 'Methyl Alcohol, C H4 O'
    SOOT_YIELD= 0.0
    C      = 1.
    H      = 4.
    O      = 1.

```

```
EPUMO2 = 13290. /
&MATL ID      = 'CONCRETE'
  CONDUCTIVITY  = 1.
  SPECIFIC_HEAT  = 0.88
  DENSITY       = 2100. /
&SURF ID      = 'CONCRETE'
  MATL_ID       = 'CONCRETE'
  COLOR         = 'GRAY'
  THICKNESS     = 0.1 /
&VENT XB=8.25,9.1,0.9,1.5,0,0,SURF_ID='BURNER' /
&OBST XB=6,6.1,-1.8,1.8,0,3.6,SURF_ID='CONCRETE' /
&OBST XB=6,9.6,1.6,1.8,0,3.6,SURF_ID='CONCRETE' /
&OBST XB=6,9.6,-1.6,-1.8,0,3.6,SURF_ID='CONCRETE' /
&OBST XB=9.4,9.6,-1.8,1.8,0,3.6,SURF_ID='CONCRETE' /
&OBST XB=6,9.6,-1.8,1.8,3.4,3.6,SURF_ID='CONCRETE' /
&HOLE XB=6,6.1,-0.8,0.8,0,2.2 /
&VENT XB=6,6,-0.8,0.8,0,0.5,SURF_ID='OPEN' /
&BNDF QUANTITY='INCIDENT_HEAT_FLUX' /
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=8.6, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&DEVC XYZ=8.3,0.8,1.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TEM_1.8m' /
&DEVC XYZ=8.3,0.8,1.6, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TEM_1.6m' /
&DEVC XYZ=8.3,0.8,1.4, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TEM_1.4m' /
&OBST XB=6.9,7.0,-0.75,-0.9,0,2, SURF_ID='CONCRETE' /
&DEVC XYZ=7.0,-0.8,1.8, QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX', IOR=1,
ID='RAD_1.8m' /
&DEVC XYZ=7.0,-0.8,1.1, QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX', IOR=1,
ID='RAD_1.1m' /

&TAIL /
```

附錄六 實驗規劃表



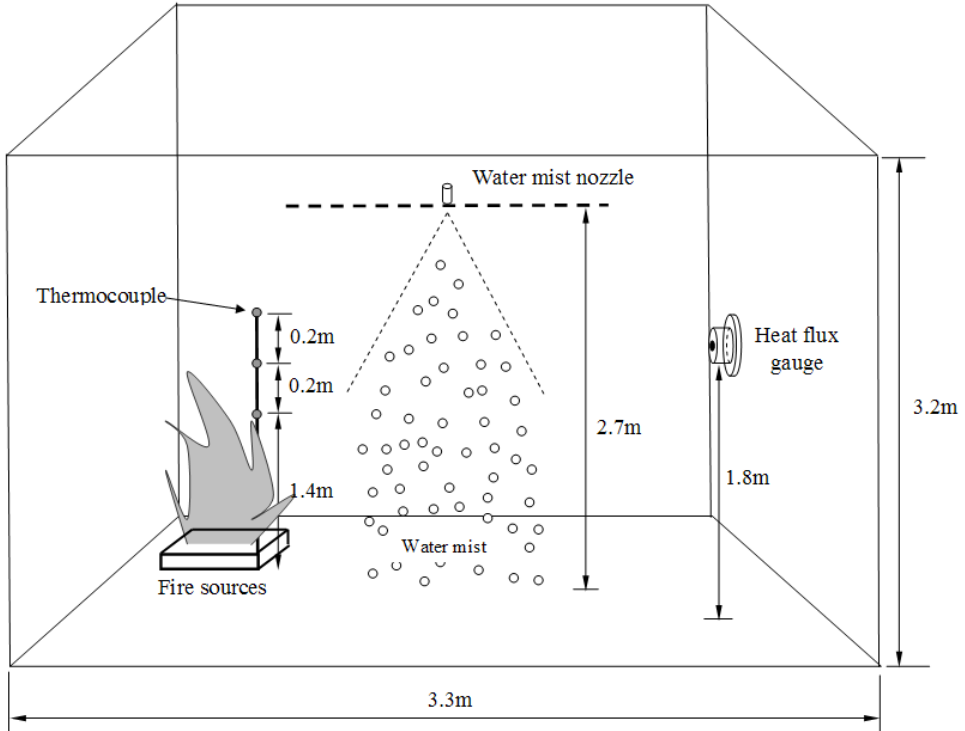
泵浦資料：

型式：TTD	容量：0.3 m ³ /min
口徑：50×40mm	轉速：3550RPM
揚程：230m	段數：4



量測設備

溫度量測設備	<p>熱電偶使用 K-type，最高溫度可以量測到 400°C。</p> <p>實驗室內架設三點熱電偶，分別在距離地面 1.4m、1.6m、1.8m 等三個不同高度架設熱電偶，如圖：</p>
--------	---

	 <p>The diagram illustrates the experimental setup within a chamber. On the left, 'Fire sources' are placed on a base. A 'Thermocouple' is positioned vertically above the fire, with two 0.2m segments and a 1.4m segment from the fire base. A 'Water mist nozzle' is located at the top center, with a 2.7m vertical distance to the fire base. A 'Heat flux gauge' is mounted on the right wall, 1.8m from the fire base. The chamber has a width of 3.3m and a total height of 3.2m. A 'Water mist' cloud is shown as a cone of droplets originating from the nozzle.</p>
<p>流量計 壓力計</p>	<p>為產生不同粒徑之細水霧粒滴，利用變頻式之加壓水泵改變壓力來進行粒徑之變化，改變壓力亦會改變流量，同時細水霧噴撒之流量對於細水物之滅火效應也會有影響。因此在加壓水泵出口端裝設數位式流量計，用來量測撒水頭所噴撒出的水量。</p> <p>壓力計裝設在加壓泵浦的出口處與支管的入口處用來量測細水霧之的噴撒壓力。另外為方便監控，將撒水管路延伸至控制室內並在管路末端裝設一個壓力錶頭。</p>
<p>熱輻射計</p>	<p>為了量測細水霧系統對於熱輻射的阻隔與吸收，本研究採用的熱輻射計，其吸收率為 0.92。本研究備有 $0.9980\text{W}/\text{cm}^2$ per mV 和 $0.6061\text{W}/\text{cm}^2$ per mV 兩種熱輻射計。</p>
<p>數據收集系統</p>	<p>數據擷取裝置的主要作用是將實驗過程中熱電偶量和熱輻射計測到的數值傳輸並記錄下來。本實驗所用之數據收集系統是由一部筆記型電腦及資料擷取設備 (Data Log) 所組成，可同時接收多</p>

	點信號並儲存。																								
影像設備	在控制室內靠近實驗區位置以及正視實驗室鐵捲門處均架設影像系統。透過觀測窗，錄下實驗進行時實驗空間內火源燃燒的狀態、細水霧系統噴撒的情形與火源燃燒的時間。																								
雷射粒徑分析儀	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">規 格</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>量 測 原 理</td> <td>Mie Scattering</td> </tr> <tr> <td>量 測 範 圍</td> <td>2.25~850μm 微半圓形或不規則形狀粒子</td> </tr> <tr> <td>光 源</td> <td>固態雷射，波長 670nm，功率 1MW</td> </tr> <tr> <td>光 束 直 徑</td> <td>10nm</td> </tr> <tr> <td>量 測 濃 度</td> <td>1ppm~10,000ppm，相對雷射(Obscurations)2%~95%</td> </tr> <tr> <td>準 確 度</td> <td>3%</td> </tr> <tr> <td>精 確 度</td> <td>0.5%</td> </tr> <tr> <td>量 測 速 度</td> <td>靜止至超音速流，每秒可量 2,000 個粒徑分佈</td> </tr> <tr> <td>量 測 時 間</td> <td>0.5 秒以上</td> </tr> <tr> <td>偵 測 器</td> <td>32 個光二極體</td> </tr> <tr> <td colspan="2">擁有氣幕裝置，避免量測時，鏡頭受待測物質不正常遮蔽。</td> </tr> </tbody> </table>	規 格		量 測 原 理	Mie Scattering	量 測 範 圍	2.25~850 μ m 微半圓形或不規則形狀粒子	光 源	固態雷射，波長 670nm，功率 1MW	光 束 直 徑	10nm	量 測 濃 度	1ppm~10,000ppm，相對雷射(Obscurations)2%~95%	準 確 度	3%	精 確 度	0.5%	量 測 速 度	靜止至超音速流，每秒可量 2,000 個粒徑分佈	量 測 時 間	0.5 秒以上	偵 測 器	32 個光二極體	擁有氣幕裝置，避免量測時，鏡頭受待測物質不正常遮蔽。	
規 格																									
量 測 原 理	Mie Scattering																								
量 測 範 圍	2.25~850 μ m 微半圓形或不規則形狀粒子																								
光 源	固態雷射，波長 670nm，功率 1MW																								
光 束 直 徑	10nm																								
量 測 濃 度	1ppm~10,000ppm，相對雷射(Obscurations)2%~95%																								
準 確 度	3%																								
精 確 度	0.5%																								
量 測 速 度	靜止至超音速流，每秒可量 2,000 個粒徑分佈																								
量 測 時 間	0.5 秒以上																								
偵 測 器	32 個光二極體																								
擁有氣幕裝置，避免量測時，鏡頭受待測物質不正常遮蔽。																									
火源																									
本研究透過火盤燃燒甲醇形成池火源作為實驗測試火源，火盤大小為0.84m×0.59m、高度 0.1m，使用厚度 1.5mm 的鋼板製成，避免因燃燒時的高溫而產生變形。火盤位於實驗室中央，放置於地面上一長寬高均略大於火盤的水盆內，以減少實驗過程中火源受週遭地板熱效應之影響。																									
燃料																									
本研究使用甲醇、正庚烷等易燃液體作為實驗中所使用的燃料。																									
撒水頭（渦頭及渦道）																									



泵浦變頻控制器



水霧水滴粒 徑 $D_{V0.9}(\mu\text{m})$	噴頭配置	流量(Lpm)	操作壓力 (kgf/cm^2)	操作頻率 (Hz)
200	2.0-H3T1.0	12	16.3	50
400	4.0-H3T2.5	12	3.5	25
600	3.5-H3T2.5	12	5	29
800	4.0-H6T2.5	12	2	20
Sprinkler	N/A	12	1	10

參考書目

1. Wong, L. T., Hazard of thermal radiation from a heated fire shutter surface to a standing person. Building Services Engineering Research & Technology 2003, 24, (1), 1-8.
2. Incropera, F. P.; DeWitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer. fifth Edition ed.; p 9-10.
3. Lienhard, J. H., A Heat Transfer Textbook.
4. 陳弘毅, 火災學. Fifth ed.; 2003.
5. Ohlemiller, T. J.; Clary, T. G., Aspects of the Motor Vehicle Fire Threat from Flammable Liquid Spills on a Road Surface. National Institute of Standards and Technology Internal Report 1990, 93-100.
6. 連眷昫, 防火區劃之淨空替代設計研究. 台灣科技大學建築工程系碩士論文 2003.
7. Karlsson, B.; Quintiere, J. G., Enclosure Fire Dynamics. 2000.
8. DiNunno, P. J.; Drysdale, D.; Beyler, C. L.; Walton, W. D.; Custer, R. L. P.; Hall, J. R.; Watts, J. M., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third ed.; 2002.
9. 吳友烈, 水霧粒徑在不同側風與火源距離條件下之滅火效應研究. 雲林科技大學工程科技研究所博士班博士論文 2006.
10. 梵辰, 消防滅火系統-水系統. 2004.
11. Chan; T.S., Measurements of Water Density and Droplet Size Distributions of Selected ESFR Sprinkler. Journal of Fire Protection Engineering 1994, 6, (2), 79-87.
12. Lefebvre A.H., "Atomization and sprays" ,Taylor & Francis, New York, 1989.
13. Herterich, A.O., "Library of the Science of Fire Protection and

Related Area: Section 3: the Diffuse Jet-Spray Jet”, Heidelberg: Alfred Huthig Publishing Company, Germany, 1960.

14. Kim, M.B., Jang, Y.J. and Kim, J.K., “Burning Rate of Pool Fire with Downward-directed Spray”, Fire Safety Journal, Vol. 27(1), 1996, pp.37-48.

15. “NFPA 750 2000 edition : Standard on Water Mist Fire Protection Systems”, National Fire Protection Associate, Quincy, MA, 2000.

16. 消防安全法令彙編,財團法人消防安全中心基金會編印, 2005.