

# 燃 燒 季 刊

## Combustion Quarterly

第二十三卷 第二期

中華民國一百零三年五月出版

Vol. 23, No.2

May. 2014

### 目 錄

### CONTENTS

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 編輯札記                          | 2  |
| 江金龍、陳維新                       |    |
| 乙烯醋酸乙烯酯/蒙脫土奈米複合材料熱穩定性及耐燃性質之研究 | 3  |
| 張銘坤、林佳穎、林學昌                   |    |
| 以熱煙測試方法分析建築物居室火場煙層下降速率        | 16 |
| 蘇崇輝、陳永隆、潘永藍、李文傑               |    |
| 水蒸氣惰化含氧碳氫化合物之爆炸界限影響           | 29 |
| 劉上豪、廖建堯、林農凱、徐啟銘               |    |
| 火災時人員疏散時間經驗公式之評估              | 46 |
| 陳宇翔、呂牧蓁                       |    |
| 運用 FDS 電腦模擬程式重建一個住宅火災事件       | 66 |
| 許育彰、紀人豪、賴冠廷                   |    |
| 增程式電動機車研發及性能發展                | 78 |
| 朱力民、張歲縉、李卓昱、許哲嘉、吳正豐           |    |
| 徵稿說明                          | 94 |

## 編輯札記

本期共刊登六篇專業論文，分別來自國內各大專院校之研究成果。雲林科技大學環安系張銘坤教授利用氫氧化鋁添加蒙脫土作為乙烯醋酸乙烯酯的無鹵耐燃劑，依不同重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土之材料配方製備奈米複合材料，提高奈米複合材料之耐燃性能；國立高雄第一科技大學環安系蘇崇輝教授參考澳洲標準AS 4391-1999熱煙測試方式，以實驗室固定的空間體積、固定監測點位置，於煙霧室中進行不同釋放壓力與不同火源大小等數種放煙模式，由結果顯示，釋放壓力影響與火源大小均對熱煙沉降速率明顯。溫度衰減曲線與火源大小較有關係；雲林科技大學環安系徐啟銘教授團隊利用質能平衡之關係，假設絕熱火焰溫度不變的條件下，探討含氧基碳氫化合物在以水蒸氣作為惰化劑，對其惰化混合物之爆炸界限進行預測，並以實驗數據作為佐證。

弘光科技大學環安系呂牧蓁教授採用美國國家標準局所研發出來的軟體--FDS+Evac探討SFPE消防工程手冊中所列之Melinek and Booth、Togawa及Pauls等人所提出之三種理論預估建築物發生火災時的疏散時間，而火災時疏散時間的長短是決定人員是否能存活的重要關鍵；吳鳳科技大學消防系紀人豪教授以蒐集新竹新埔火災現場勘查資料、照片，並以美國國家標準局所開發的電腦模擬程式(FDS+EVAC)進行火災現場重建模擬，以了解該住宅火災之火流分布、濃煙流動、溫度分佈及上層溫度、CO及CO<sub>2</sub>濃度之變化、O<sub>2</sub>濃度之變化、煙層高度等火災危害因子之變化情形，將分析結果與消防局火災調查科的火災調查鑑定資料相互印證，進而提出防火對策；南台科技大學機械工程系張崴晉教授先將TGB Tapo二行程機車，修改為電動機車，再使用SHX1000發電機，將其與電動機車串聯，以此研發增程式電動機車。

本期的內容包含無鹵阻燃技術、火災熱煙測試、物質爆炸界限預測技術、火災逃生避難模式、火災現場重建模擬及電動機車增程技術等面向，希望能讓讀者更了解燃燒的多樣性，也請本刊讀者繼續支持及踴躍投稿本期刊，共同推動燃燒科技之知識分享及研究交流，增進產業研發技術。

副總編輯 江金龍

總編輯 陳維新

# 乙烯醋酸乙烯酯/蒙脫土奈米複合材料熱穩定性及耐燃性質 之研究

## The study of thermal stability and fire retardant systems of ethylene-vinyl acetate copolymer/montmorillonitenanocomposites

張銘坤<sup>1</sup>、林佳穎<sup>2</sup>、林學昌<sup>3</sup>

Ming-Kuen Chang, Chia-Ying Lin, Hsueh-Chang-Lin

國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系

Department & Graduate School of Safety Health & Environment Engineering,  
National Yunlin University of Science and Technology

### 摘要

為了達到高分子材料本質化安全的目的，市面上之耐燃材料、電線電纜材料發展已趨向低煙、無鹵素耐燃技術，許多高分子耐燃材料，需要添加高比例的金屬水合物填料，填充量須高達 60% 以上，以達到良好的耐燃標準，但是可能導致其缺乏彈性、力學性質差之問題。本研究利用氫氧化鋁添加蒙脫土作為 EVA 的無鹵耐燃劑，依不同重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土（0、1、2、3 wt%）之材料配方製備奈米複合材料，透過 XRD 試驗、拉伸試驗、DSC 分析、TGA 分析、LOI 試驗與 FE-SEM 分析，探討添加有機黏土（OMMT）之層間距離的變化、熱性質、機械性質與耐燃性質之研究。經 XRD 檢測結果顯示，利用十八胺改質蒙脫土層間距離，由 1.27 nm 擴大到 1.96 nm，使得有機高分子更易插層至黏土層間。在拉伸試驗中，OMMT 含量為 3 wt% 時，有最佳的拉伸強度，所以，在無鹵素耐燃級 EVA 中，添加 3 wt% 的 OMMT，氫氧化鋁添加量於 47 wt% 時，有最佳的伸長率及耐燃性能（LOI 為 28），並能提高奈米複合材料之耐燃性能。

**關鍵詞：**蒙脫土、乙烯醋酸乙烯酯、耐燃劑、熱穩定性

---

<sup>1</sup>張銘坤，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，副教授

E-mail: [changmk@yuntech.edu.tw](mailto:changmk@yuntech.edu.tw)

<sup>2</sup>林佳穎，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士

<sup>3</sup>林學昌，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士班研究生

## Abstract

To achieve the purpose of safety equipment and development of fire retardant and wire cable materials has trended to low smoke and halogen-free flame retardant technology in the business. However, many polymer flame retardant materials required a very high proportion of the metal hydrate filler within the polymer matrix (60 wt%) to achieve a suitable level of flame retardant, which may lead to a lack of flexibility, poor mechanical properties and problems during compounding. In this study, the aluminum hydroxide added montmorillonite (MMT) as the halogen-free flame retardant of EVA, according to the different EVA/ATH/MMT (0, 1, 2, 3 wt%) weight percentage of the preparation of nanocomposite material formulation. And through the XRD test, tensile test, DSC analysis, TGA analysis, LOI test and FE-SEM analysis to explore the addition of organic modified clay (OMMT) and researched the layer-distance, thermal properties, mechanical properties and flame retardant properties. In addition, use XRD to make the characterization analysis, it is found that increasing the polymers into the MMT, layer-distance increased from 1.27 nm to 1.96 nm when used the octadecylamine modified the MMT. For the tensile test, it is found that the montmorillonite weight percentage 3 wt% has the best tensile strength. In addition, the halogen-free flame retardant grade of EVA are added the OMMT in 3 wt%, the composition of nanocomposites was 47 wt% of the ATH filler has the best elongation and fire retardant (LOI was 28). Improvements in tensile and flame retardant properties were observed in nanocomposites.

Keywords: flame retardant、ethylene vinyl acetate、montmorillonite、thermal stability

## 一、前言

近年來，高分子材料廣泛應用於民生、國防及一般工業上，與人們日常生活息息相關。聚合物/蒙脫土奈米複合材料發展相當迅速，由於其在耐燃性、力學性、阻隔性能等及應用方面優於一般的聚合物材料，已成為當今聚合物材料基礎研究和應用開發的研究議題[1,2]。

高分子複合材料是在高分子材料中加入一些無機填充物作為填充材料或補強劑[3-5]，例如：黏土、玻璃纖維、碳黑、二氧化鈦和二氧化矽等[6,7]，這些填充材料的目的是降低成本和提升原材料之物理性質或化學性質[8,9]。聚合物/蒙脫土奈米複合材料之發展相當迅速，尤其在耐燃性、力學性、阻隔性能等應用方面，已成為現今聚合物材料基礎研究與應用開發的研究重點。根據研究指出，聚合物／層狀奈米複合材料具有耐燃特性與奈米結構和無機物的分散程度相關。在燃燒過程中奈米複合材料結構易被破壞[10]，材料表面在燃燒過程會形成多層矽

酸鹽奈米複合結構炭層，此炭層會產生屏障作用，並生成緊密的炭層結構形成炭化作用來提高其阻燃能力。例如：聚合物添加蒙脫土系統就是利用上述概念來藉此提升其耐燃性能[11,12]。

近年來，低煙無鹵素之難燃材料之產生，在產品的安全規範中，電子電器產品之耐燃材料已趨向符合環保低煙、無鹵耐燃技術等需求發展，而應用於電線電纜外層由原來PVC材料披覆材料逐漸改為環保型基材，例如：聚烯烴樹酯(EVA、PP、PE)等。例如：在低煙無毒性的材料中，聚合物之作用主要是增加電線電纜的柔軟性，一般常用的聚合物材料，例如：EVA(乙烯醋酸乙烯)、EEA(乙烯-丙烯酸乙酯)、EPDM(乙烯丙烯二烯共聚物)等[13]。

隨著科技的進步，環保意識的興起，人們對於生態及環境品質之要求也越來越高，在生活用品及作業場所中，耐燃的等級及材料選擇，也趨向無鹵素耐燃劑的方向發展，例如電子電器產品使用時安全性考量之下，設計上都必須符合耐燃之等級要求像 LOI、UL94 等標準。氫氧化鋁耐燃劑具有上述低煙無鹵素之優點，所以有些電子及電器產品改用添加耐燃之高分子材料，因此，本研究針對耐燃等級及複合材料性質來進行探討。

本研究利用熔融插層法製備乙烯醋酸乙烯酯共聚物/改質蒙脫土(EVA/OMMT)奈米複合材料[14-16]，探討奈米複合材料添加有機黏土(OMMT)之層間距離的變化與其影響[17-19]。奈米複合材料中也添加氫氧化鋁(ATH)耐燃劑，經過高溫型萬馬力機進行混煉與造粒，利用射出成型機射出啞鈴型試片來進行性質測試分析。並分析不同含量的有機蒙脫土及氫氧化鋁之摻雜量，對於奈米複合材料之耐燃特性、熱穩定性質和機械性質之影響[20]。

## 二、實驗

### 2.1 實驗材料

本研究使用之奈米複合材料之組成如表一所示，包含下列成分。

- (1) 乙烯/醋酸乙烯酯共聚物 (EVA, UE629, 台灣聚合化學品股份有限公司)
- (2) 十八烷基胺 (Octadecylamine, 98%, Alfa Aesar)
- (3) 氫氧化鋁 (Alumina Trihydrate, 極東貿易股份有限公司)
- (4) 蒙脫土 (Montmorillonite, 環綺國際貿易股份有限公司)

### 2.2 有機改質蒙脫土之製備

- (1) 取 20 g 蒙脫土 (CEC=92 meq/100g) 加入 1000 ml 去離子水中，室溫下攪拌 6 小時，稱為 A 溶液。
- (2) 取 4.96 g 之 Octadecylamine 溶於 50 ml 去離子水中，並加入適當鹽酸，攪拌三小時，稱為 B 溶液。
- (3) 將 B 溶液倒入 A 溶液中，加熱至 80°C 並持續攪拌 3 小時。

- (4)待反應完成後，以去離子水洗滌過濾，並以 $\text{AgNO}_3$ 滴定至無白色沉澱。  
 (5)真空乾燥 24 小時，研磨過篩，得到有機黏土。

### 2.3 乙烯醋酸乙烯酯-氫氧化鋁/黏土之混煉/射出

- (1)依據不同的重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土（0wt %、1wt %、2 wt %、3 wt %）之材料配方。  
 (2)置於混煉機中進行混煉，溫度設定為 60-70 °C，攪拌時間為 20 分鐘。  
 (3)將複合材料熔融物質，由高溫型萬馬力機混練出，再經造粒機切粒後，即可得實驗所需 EVA-ATH/MMT 複合材料。  
 (4)先將已混煉之樣本加熱到所需溫度。  
 (5)啟動加熱器加熱並測試射出壓力、速度及冷卻時間之條件。  
 (6)射出成型，平均 1 分鐘可射出一片試片。

表一 奈米複合材料之組成

| Sample formulation | Sample composition (wt%) |     |      |     |
|--------------------|--------------------------|-----|------|-----|
|                    | EVA                      | ATH | OMMT | MMT |
| neat EVA           | 100                      | 0   | 0    | 0   |
| EVA/ATH            | 40                       | 60  | 0    | 0   |
| EVA-ATH/OMMT-1     | 50                       | 49  | 1    | 0   |
| EVA-ATH/OMMT-2     | 50                       | 48  | 2    | 0   |
| EVA-ATH/OMMT-3     | 50                       | 47  | 3    | 0   |
| EVA-ATH/MMT-1      | 50                       | 49  | 0    | 1   |
| EVA-ATH/MMT-2      | 50                       | 48  | 0    | 2   |
| EVA-ATH/MMT-3      | 50                       | 47  | 0    | 3   |

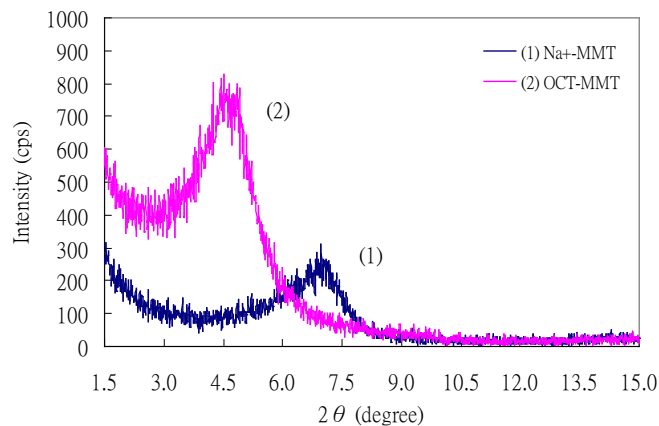
### 2.4 實驗分析

利用氫氧化鋁添加蒙脫土作為 EVA 的無鹵耐燃劑，依不同重量百分比乙烯醋酸乙烯酯／氫氧化鋁／蒙脫土（0、1、2、3 wt %）之材料配方製備奈米複合材料，透過 XRD 試驗（ $2\theta=1.5\sim15^\circ$ ）觀察蒙脫土層間距離之變化；並以拉伸試驗來測定材料之機械性質。使用 TGA 及 DSC 測試奈米複合材料之熱性質影響；實驗中也利用極限氧指數儀檢測材料之耐燃等級，並用 FE-SEM 觀察複合材料之分散情況。

### 三、結果與討論

#### 3.1 有機黏土之 XRD 分析

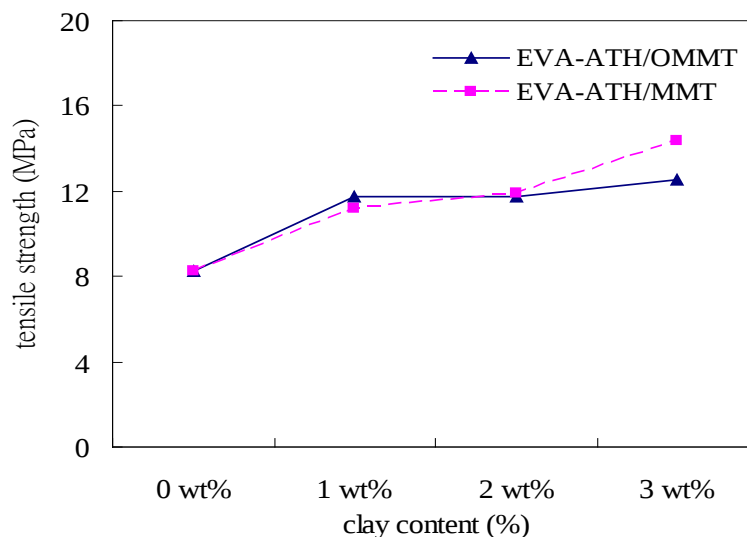
XRD結果如圖一顯示，未改質蒙脫土，其矽酸鹽層（001）晶格繞射峰之  $2\theta$  角為  $6.97^\circ$  有Peak 產生，經過布拉格公式求得層間距（d-spacing）為  $12.7 \text{ \AA}$ 。以改質劑十八烷基胺處理後之MMT，其矽酸鹽層（001）晶格繞射峰之  $2\theta$  角為  $4.5^\circ$ ，層間距（d-spacing）為  $19.6 \text{ \AA}$ ，改質前後相差  $6.9 \text{ \AA}$ 。由結果可知，改質劑十八胺的碳長鏈，確實能夠進入黏土矽酸鹽層與 $\text{Na}^+$ 進行交換反應，使得層間距離變大。經X-Ray結構分析，有效撐開層間距離由  $1.27 \text{ nm}$ 擴大到  $1.96 \text{ nm}$ ，可使有機高分子更易插層至黏土層間。



圖一、 $\text{Na}^+$ -MMT與Oct-MMT之XRD圖

#### 3.2 拉伸試驗

拉伸試驗結果 EVA-ATH/OMMT 與 EVA-ATH/MMT 複合材料與抗拉強度比較圖，由圖二得知，隨著蒙脫土添加量之增加，抗拉強度（tensile strength）呈現上升趨勢。對於 EVA 複合材料添加 3 wt% MMT 有最大的拉伸強度，為  $12.58 \text{ MPa}$  及  $14.26 \text{ MPa}$ ，與純 EVA 的  $8.23 \text{ MPa}$  相比，增加了  $52.86 \%$  和  $73.27 \%$ 。

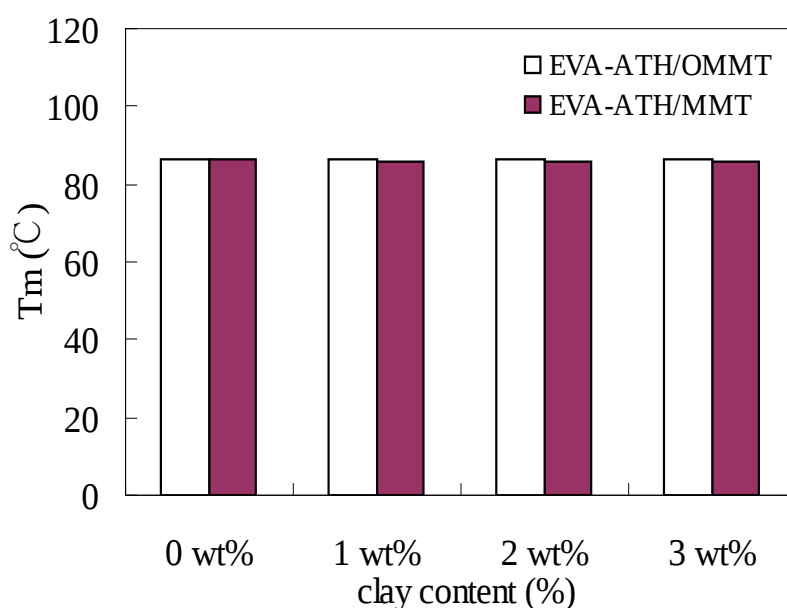


圖二、EVA-ATH/MMT組成之複合材料拉伸試驗圖

EVA-ATH / OMMT 與 EVA-ATH / MMT 複合材料添加 1 wt % 時，拉伸強度與伸長率相差不多。而以 MMT 合成的奈米複合材料比未添加 MMT 的強度改善程度稍顯提升，如表二所示；黏土的加入也進一步降低了其延展性，不同的添加量對 EVA 體系具有一定的影響力。

表二 奈米複合材料之機械性質

| Sample         | 拉伸強度 (MPa) | 伸長率 (%) |
|----------------|------------|---------|
| neat EVA       | 8.23       | 72.48   |
| EVA/ATH        | 17.43      | 21.08   |
| EVA/ATH/OMMT-1 | 11.65      | 60.62   |
| EVA/ATH/OMMT-2 | 11.69      | 43.81   |
| EVA/ATH/OMMT-3 | 12.58      | 42.20   |
| EVA/ATH/MMT-1  | 11.36      | 60.72   |
| EVA/ATH/MMT-2  | 11.86      | 53.09   |
| EVA/ATH/MMT-3  | 14.26      | 42.20   |



圖三、EVA-ATH/MMT 組成之奈米複合材料 DSC 試驗圖

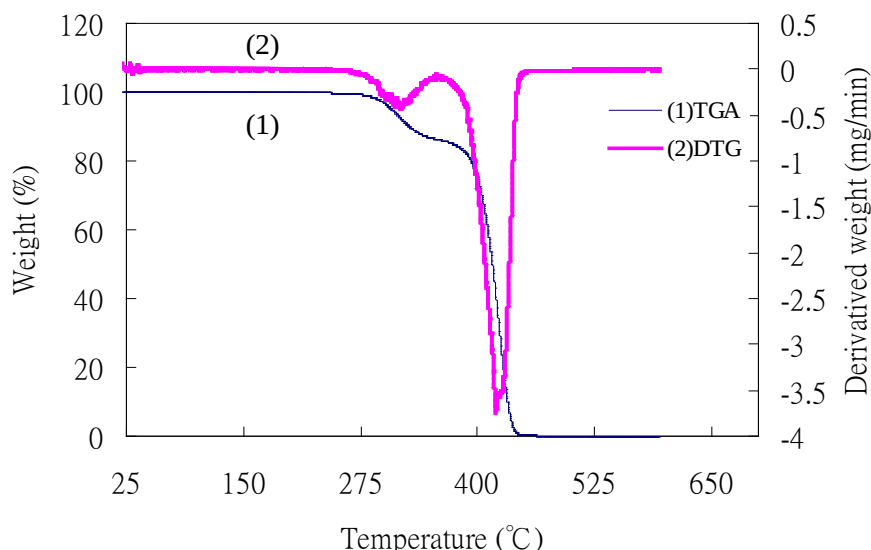
### 3.3 DSC 試驗

DSC 觀察 EVA 複合材料比較結果，圖三顯示熔點 ( $T_m$ ) 並無明顯改變，表示添加蒙脫土並未能明顯將乙烯醋酸乙烯酯之  $T_m$  呈向後趨勢；而添加 MMT 及 Oct-MMT，並未能明顯提升奈米複合材料的熔點。

### 3.4 TGA 試驗

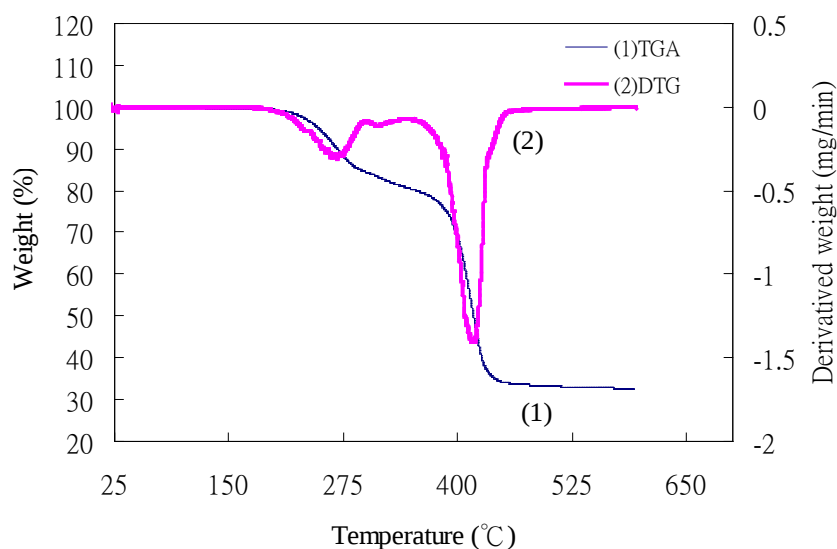
圖四為純乙烯醋酸乙烯酯 (EVA, 18%VA) 在氮氣環境下，在室溫下以每分

鐘10°C的升溫速率至700°C，EVA的降解反應分為兩個連續的分解階段過程。第一階段降解溫度從280°C到350°C，降解生成acetic acid並形成雙鍵和交聯；而第二階段從350°C到430°C，會進一步產生自由基斷裂（非氧化降解反應）或受熱燃燒（氧化降解反應），導致主鏈的熱降解過程。



圖四、純乙烯醋酸乙烯酯之TGA-DTG圖

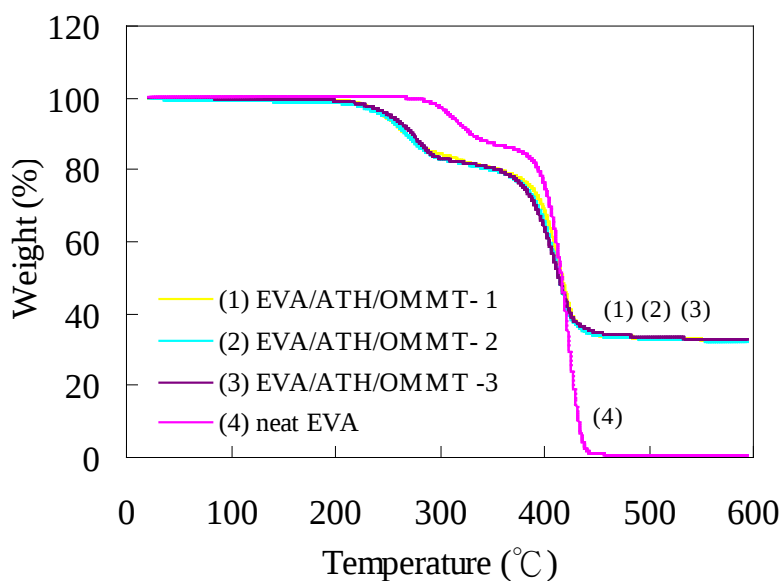
圖五為TGA觀察到EVA-ATH/OMMT-1有二個階段的熱重損失。首先，第一階段降解溫度涉及氫氧化鋁的脫水反應，發生在240°C到340°C，實驗結果顯示脫乙酰化（損失醋酸）發生較早，比純EVA和第二個階段聚合物分解保持不變。而



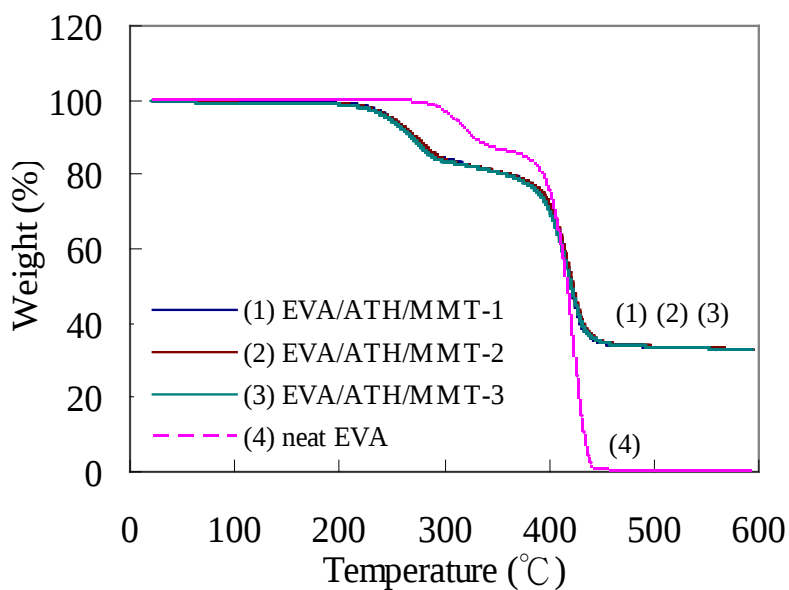
圖五、EVA-ATH//OMMT-1之TGA-DTG圖

這在較低溫度下第二個階段的分解為氫氧化鋁和EVA/-ATH/MMT奈米複合材料形成保護層間的關係。由此可發現，在降解過程中產生的氫氧化鋁分解所剩下的氧化鋁或水會形成阻止或破壞的保護層，而影響EVA/-ATH/MMT奈米複合材料的降解過程。

圖六與圖七分別是 EVA-ATH/OMMT 與 EVA-ATH/MMT 組成之奈米複合材料 TGA 曲線圖，實驗結果顯示，添加耐燃劑之作用為減緩材料的氧化分解，其耐燃功能是通過不可燃的成份覆蓋正在分解的材料，由 TGA 分析曲線圖得知，當含有耐燃劑的樣品燃燒後耐燃劑成功地撲滅尚未燃燒的樣品，並阻止其進一步氧化，耐燃劑添加高比例時，會導致 EVA-ATH/OMMT 與 EVA-ATH/MMT 組成之奈米複合材料熱穩定性下降。



圖六、EVA-ATH/OMMT 之 TGA 曲線圖



圖七、EVA-ATH/MMT 之 TGA 曲線圖

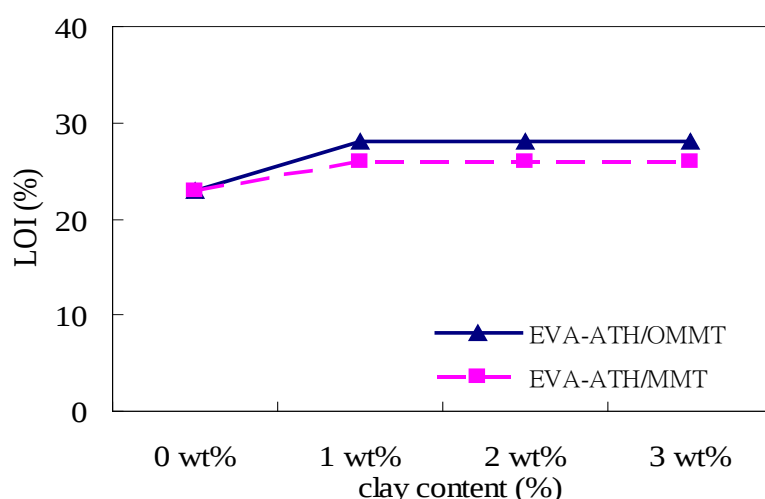
純的乙烯醋酸乙烯酯如前述圖四所示，初始裂解溫度為 307℃；由表三得知，蒙脫土與改質蒙脫土添加量為 1 wt%、2 wt%、3 wt% 時，初始裂解溫度則分別為 242℃、251℃ 及 252℃ 與 257℃、263℃ 及 266℃。即添加蒙脫土並未能改變乙烯醋酸乙烯酯的初始裂解溫度 ( $T_d$ )。當溫度升高時，由於奈米複合材料之乙烯醋酸乙烯酯的基材裂解溫度小於蒙脫土，故溫度升高時，乙烯醋酸乙烯酯會比蒙脫土更快產生裂解現象。不管蒙脫土之添加量多寡，均未影響樹脂初始裂解溫度。

表三 各種組成奈米複合料之熱裂解溫度( $T_d$ )

| Sample         | $T_d$ (°C)<br>for loss in nitrogen |
|----------------|------------------------------------|
| neat EVA       | 307                                |
| EVA/ATH        | 291                                |
| EVA/ATH/OMMT-1 | 257                                |
| EVA/ATH/OMMT-2 | 263                                |
| EVA/ATH/OMMT-3 | 266                                |
| EVA/ATH/MMT-1  | 242                                |
| EVA/ATH/MMT-2  | 251                                |
| EVA/ATH/MMT-3  | 252                                |

### 3.5 LOI 試驗

極限氧指數 (LOI) 為複合材料在氧、氮混合氣流中維持平穩燃燒所需之最低氧濃度，通常以氧在混合氣體中所占的體積比來表示。材料 LOI 值超過 21%，說明該材料具有耐燃性能，其 LOI 值越高表示其耐燃性能越好。由圖八可發現，在未添加耐燃劑及蒙脫土的純原料 EVA 的 LOI 值為 23，表示其較不易燃燒，然而在加入耐燃劑及改質蒙脫土後，可使得 LOI 值提升到 28，效果最為顯著，且 EVA 奈米複合材料組成之極限氧指數 (LOI)，依等級分類  $\geq 26$  為達到難燃性。



圖八、EVA-ATH/MMT 之奈米複合材料 LOI 比較圖

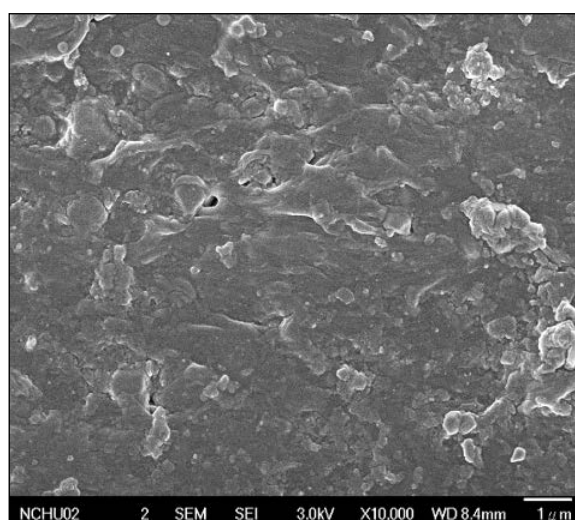
由表四可觀察到 100%EVA 與 40%EVA 加入 60%耐燃劑氫氧化鋁作比較，

極限氧指數由 23 上升至 33，而添加改質蒙脫土 LOI 值比未改質蒙脫土提升高 2 個 LOI 等級。EVA-ATH/MMT 之 LOI 為 26，EVA-ATH/OMMT 之 LOI 為 28，可知一般電纜電線配方（40/60 wt%）比添加少量蒙脫土，其耐燃性效果較佳。並發現添加有機改質蒙脫土能明顯改善材料的耐燃性能。

表四 各種組成奈米複合料之極限氧指數(LOI)

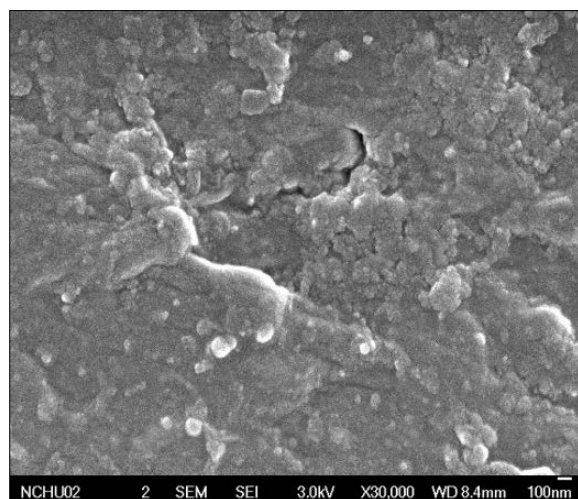
| Samples        | EVA<br>(wt %) | ATH<br>(wt %) | O <sub>2</sub><br>(%) |
|----------------|---------------|---------------|-----------------------|
| neat EVA       | 100           | 0             | 23                    |
| EVA/ATH        | 40            | 60            | 33                    |
| EVA/ATH/OMMT-1 | 50            | 49            | 28                    |
| EVA/ATH/OMMT-2 | 50            | 48            | 28                    |
| EVA/ATH/OMMT-3 | 50            | 47            | 28                    |
| EVA/ATH/MMT-1  | 50            | 49            | 26                    |
| EVA/ATH/MMT-2  | 50            | 48            | 26                    |
| EVA/ATH/MMT-3  | 50            | 47            | 26                    |

### 3.6 FE-SEM 觀察



本研究將EVA-ATH添加不同比例之OMMT（0、1、2、3 wt%），經熱壓製成試片，  
圖九、EVA-ATH/OMMT-1奈米複合材料之FE-SEM圖（×10,000）

使用場發射掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)進行奈米複合材料的層狀結構的觀察與分析。由圖九為奈米複合材料試片放大至10,000，從顯微結構觀察複合材料呈現剝離狀，有如翻頁鬆散般的聚集。圖十為放大倍率至30,000倍相片，可觀察到奈米複合材料平滑緊密堆疊之層狀結構的表面，奈米複合材料中蒙脫土含量分別為1 wt%的FE-SEM分析圖，由此顯示，添加clay有提高分散的效果。



圖十、EVA-ATH/OMMT-1奈米複合材料之FE-SEM圖 (×30,000)

#### 四、結論與建議

1. 以十八烷基胺 (Octadecylamine) 改質蒙脫土，使蒙脫土由親水性變成親油性，層間距離由1.27 nm擴大到1.96 nm，有效撐開層間距離，可使聚合物單體或有機高分子更易插層到蒙脫土層間。
2. 由XRD結果顯示，當EVA單體插層到有機改質蒙脫土層間，有機改質蒙脫土會被EVA所剝落，形成脫層型奈米複合材料。
3. 由拉伸試驗結果顯示，隨著蒙脫土添加量之增加，抗拉強度呈上升趨勢，使機械性質獲得改善，而在蒙脫土為3 wt%時，機械性質有較佳的趨勢，可見蒙脫土的加入，能提高EVA基材的力學性能。
4. EVA奈米複合材料在楊氏係數方面，鈉蒙脫土與有機改質蒙脫土，皆隨著蒙脫土含量的增加，楊氏係數都有增加的趨勢。添加無機材料來形成有機/無機高分子複合材料，藉以補強高分子材料機械強度不佳的缺點，讓材料變的較硬，所以，斷裂伸長率皆隨黏土添加量的增加而降低。
5. 在熱性質方面，以DSC量測結果得知其 $T_m$ 並無明顯改變；TGA量測結果得知EVA-ATH/MMT組成之奈米複合材料，其裂解溫度並無隨著蒙脫土添加量的增加而有明顯上升的趨勢，溫度皆低於純EVA裂解溫度 (306.51°C)，顯然添加高比例之耐燃劑和降解過程，可能使複合材料熱性質呈下降趨勢。
6. 由極限氧指數分析結果得知，添加改質之蒙脫土LOI值比未改質高2個LOI等級。EVA-ATH/MMT之複合材料LOI為26，EVA-ATH/OMMT之複合材料LOI為28，效果最為顯著，且EVA奈米複合材料組成之極限氧指數 (LOI)，依等級分類 $\geq 26$ 為達到難燃性，可知改質過之蒙脫土能提升耐燃性。在無鹵耐燃級EVA中，添加3 wt%的蒙脫土，氫氧化鋁添加量於47 wt%時，有最佳的拉伸強度及耐燃性。
7. 場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM) 觀察有機改質蒙脫土微結構中，奈米複合材料平滑緊密堆疊之層狀結構表面，以片狀均勻分布在EVA基材中，EVA-ATH/OMMT-3比EVA-ATH/OMMT-1、EVA-ATH/OMMT-2縝密的排列

結構，更容易讓MMT均勻分散並嵌入高分子中。

8. 蒙脫土的加入會降低其延展性，有機改質蒙脫土與ATH複合實用能夠提高EVA的耐燃性能，這有可能在不降低耐燃等級下，實現降低ATH的添加量，並能改善耐燃材料的物理機械性能及其他性能。另外，希望能進一步嘗試其他有機改質蒙脫土與其他常規耐燃添加劑的配合使用。

## 五、參考文獻

1. ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties ofPlastics.
2. Banhart F, Ajayan P M, “Nanotechnology in Carbon and Related Materials”,Nano-teC99 Conference, University of Sussex at Brighton,U.K,1999.9, pp. 8-10 (1999).
3. Okada K., Japanese Pat., pp.11-228748 (1999).
4. Brydson J.A.著，“塑膠材料”，范啟明譯，大中國圖書公司印行，國立編譯館主譯 (1999)。
5. 彭艷慧、尤建智、王郁銘，“聚乙烯／蒙脫土奈米複合材料之研究”，實務專題研究，雲林科技大學環境與安全衛生工程系 (2007)。
6. Laoutid F. et al., “Intumescent mineral fire retardant systems in ethylene-vinyl acetate copolymer:Effect of silica particles on char cohesion”,Polymer Degradation and Stability,91, pp. 2140-2145 (2006).
7. Kroto H W, Heath JR, O’Brien S C, et al. Nature,318, pp.162-163 (1985).
8. Paul Calvert., “Polymer/Clay Nanocomposite”，英國《自然》雜誌 Nature,Vol. 383.26:26 (1996).
9. 朱賢士，“聚丙烯/黏土奈米複合材料之製備與性質研究”，碩士論文，中國文化大學材料科學與奈米科技所 (2006)。
10. William D. Callister , Jr 著，“材料科學與工程”，簡仁德、楊子毅、張柳春譯，學銘圖書館有限公司與歐亞書局有限公司，第 213-215 頁，第 145-150 頁 (2006)。
11. Beyer G et al., “Flame retardant properties ofEVA-nanocomposites andimprovements by combination of nanofiller with aluminiumtrihydrate”, FireMater, 25, pp. 193–197 (2001).
12. Günter Beyer et al., Fire and Materials, 25, pp.193-197 (2001).
13. Thostenson E T, Ren Z, Chou T W. Compos. Sci.Technol.,61: pp.1899-1912 (2001).
14. 洪志揚，“EVA/ Clay 奈米複合材料對LLDPE電線電纜披覆材熱性質之影響”，碩士論文，國立台北科技大學化工系 (2003)。
15. 林忠慶，“EVA/一般，奈米Mg(OH)<sub>2</sub>/蒙脫土奈米複合材料之性質研究”，碩士論文，國立台北科技大學有機高分子所 (2005)。
16. 漆宗能、尚文字，“聚合物／層狀矽酸鹽奈米複合材料”，五南圖書出版公

- 司 (2004)。
17. Ca´rdenas M.A. et al.,“Mechanical and fire retardant properties of EVA/clay/ATH nano- composites - Effect of particle size and surface treatment of ATH filler”, Polymer Degradation and Stability, 93, pp.2032–2037 (2008).
  18. 巫雅惠，“以烷基鹽插層改質蒙脫石之攪磨剝層研究”，碩士論文，成功大學資源工程學系研究所 (2004)。
  19. 葉孟恆，“添加劑對蒙脫土改質之影響”，博士論文，國立成功大學材料科學及工程學系 (2006)。
  20. 羅次郎，“聚丙烯／蒙脫土奈米複合材料之製備”，碩士論文，國立雲林科技大學化學工程與材料工程系 (2006)。

# 以熱煙測試方法分析建築物居室火場煙層下降速率

## Decline Rate of the Smoke Layer in Building Compartments Fire by Hot Smoke Test

蘇崇輝<sup>1</sup>

C. H. Su<sup>1</sup>

國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系

Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung  
First University of Science and Technology

陳永隆<sup>2</sup>、潘永藍<sup>2</sup>

Y. L. Chen<sup>2</sup>, Y. L. Pan<sup>2</sup>

吳鳳科技大學消防研究所

Department of Fire Science, Wufeng University

李文傑<sup>3</sup>

W. J. Li<sup>3</sup>

吳鳳科技大學光機電暨材料研究所

Graduate School of Opto-Mechatronics and Materials, Wufeng University

### 摘要

火場中濃煙為人員致命的重要因素之一，因此建築物排煙系統扮演重要的維生角色。排煙系統之有效性將十分重要。國際間常見以全尺度熱煙測試進行排煙系統效能的分析。測試過程中，熱煙煙層下降速率快慢為主要的判斷關鍵因素之一。本研究參考澳洲標準 AS 4391-1999 熱煙測試方式，以實驗室固定的空間體積、固定監測點位置，於煙霧室中進行不同釋放壓力與不同火源大小等數種放煙模式。過程由「煙能見度量測儀」記錄量測值，採用 Lambert-Beer 定律，以平行單色可見光的衰減原理，作為濃煙分布的定量化量測，據以比較二種不同釋放壓力的發煙量以及二種不同火源及五點量測座標點來分析能見度和煙沉降速率的相互關係。由結果顯示，釋放壓力影響與火源大小均對熱煙沉降速率明顯。溫度衰減曲線與火源大小較有關係。

**關鍵字：**煙沉降速率、煙控系統、火場熱煙全尺度試驗、Lambert-Beer 定律

---

<sup>1</sup>國立高雄第一科技大學 環境與安全衛生工程系

E-mail: such@nckust.edu.tw

<sup>2</sup>吳鳳科技大學 消防研究所

<sup>3</sup>吳鳳科技大學 光機電暨材料研究所

## Abstract

Since the smoke is one of the factors in death in the fire accident, the smoke exhaust systems of buildings are the crucial subsistence equipments. Therefore, the effectiveness of the smoke exhaust system is very important. Full-scale hot smoke tests were used to analyze the performance of the smoke exhaust system in building devices. Decrease the rate of hot smoke layer is usually one of the critical judgments factors in the testing process. Reference to AS 4391-1999 hot smoke tests, the study set up some monitoring sites in the fixed laboratory space to record the smoke distribution in different release pressures and fire sizes and a few other fire sources put the smoke patterns in the smoke chamber. Parallel monochromatic visible attenuation principle was adopted in the present study. The attenuation values were recorded in smoke visibility measurement instrument, using the Lambert-Beer law, during the entire testing process. Quantitative of smoke distribution were measured. The results showed that the release pressure and fire size had the significant impact on the decline rate of fire smoke. The relationship of temperature attenuation and fire source were more significant.

Keywords: The decline rate of smoke, Smoke control system, Full-scale hot smoke test, Lambert-Beer's law

## 一、前言

### 1.1 火場之濃煙危害性

火災發生時，火場產生大量濃煙，往往是火場主要的致命因素(Alarie, 2002; Kobes et al., 2010)。建築物火災中的煙是明顯危害著人員生命安全並且值得探討。1980 年 11 月 21 日，美國拉斯維加斯大型賭場之一美國米高梅飯店發生大火，造成 85 人死亡，600 多人受傷。其中 67 人係由濃煙致死的(Bryan, 1983)。2009 年 3 月 2 日凌晨，台北市白雪大旅社發生火災事故，火勢雖然在 30 分鐘內撲滅，因濃煙造成包含 3 名外籍人士在內 7 人死亡，及 1 重傷之不幸。為台北市 15 年來重大公共火災安全事件，引起有關機關重視(Kuo, 2010)。

除生理層面之影響外，火場中濃煙的掩蔽也會使人員視覺無法直接觀察週遭環境，產成心理的恐慌。導致對避難逃生時的決策產生錯誤(Paul et al., 2008; 蘇崇輝等 2011, 2012)。

### 1.2 排煙系統效能

建築物的煙控系統在火場中扮演重要的維生角色。在建築法規中強調火災的危害性與許多火災科學研究的完成也被法規所節錄與引用。各種建築物的煙控策略紛紛產生，主要原理為利用建築物特徵進行蓄煙、防煙區劃、自然排煙或機械

式強制排煙等煙控措施，使濃煙不致擴散至非起火空間或樓層，營造一有利火場逃生因素。現今諸多研究，針對建築物火災發生後，濃煙的分布與排煙的系統有效性進行分析(Chow, 2005; Su et al., 2011; 陳清吉, 2011; 姚建忠, 2011; 陳春利, 2013)。

目前台灣地區對於建築物排煙系統之效能規定，主要為「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條第 8 款之內容，排煙機排煙量應大於每分鐘一百二十立方公尺。在一防煙區劃時，在該防煙區劃面積每平方公尺每分鐘一立方公尺以上；在二區以上之防煙區劃時，在最大防煙區劃面積每平方公尺每分鐘二立方公尺以上(內政部消防署, 2013)。

### 1.3 全尺度熱煙測試

濃煙的量測與定量化分析，為重要的關鍵。過去常見的方法為 NFPA(National Fire Protection Association) 92B「煙控系統設計指引」的煙濃度  $N\%$  法則(Ferreira, 2012)，惟量測過程為使用高溫的燃燒物質。國際間已有不少煙層高度量測的火場熱煙全尺度試驗，例如澳洲國家標準「AS 4391-1999 Smoke management systems - Hot smoke test」(Chow, 2005)實驗規範、中國大陸 2012 年實施的「GA/T 999-2012 防排煙系統性能現場驗證方法—熱煙試驗法」(中國消防標準化技術委員會, 2012)、日本「JIS. A4303. -1994. 排煙設備の檢查標準. Inspection standard of smoke exhaust equipment.」(JISC, 1994)、美國冷凍空調協會(ASHRAE) Guideline 1.5-2012 - The Commissioning Process for Smoke Control Systems(ASHRAE, 2012)，進行煙控系統的有效性測試。

圖 1 為澳洲國家標準 AS 4391-1999 發煙配置情況。圖 2 為日本國家標準 JIS. A4303 排煙設備之檢查方式。煙層下降速率為重要的評估要點。先前判斷煙層之方式為以燈泡串為目視可透光標準。然而由圖 3 可以發現，黑煙與白煙之透光現象並不相同。如在排煙系統全尺度驗證過程中以一般黑煙方式判別能見度，將會產生嚴重之誤判。

為避免上述缺失，本研究採用 Lambert-Beer 定律為主之煙能見度量測儀，進行煙層遮光現象之判別(蘇崇輝, 2009; 蘇崇輝等, 2010 與 2013)。

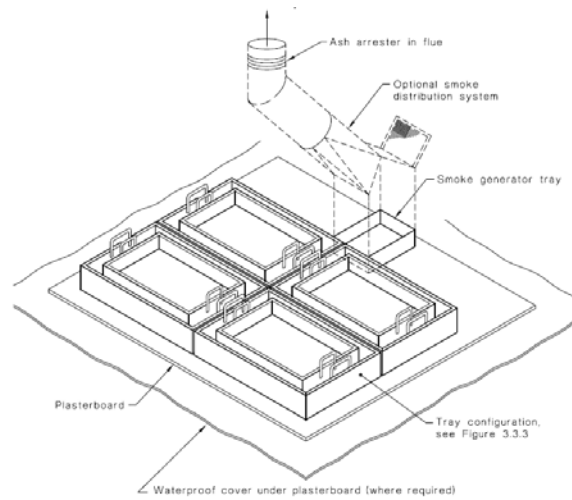


圖 1. 澳洲國家標準 AS 4391-1999 配置圖

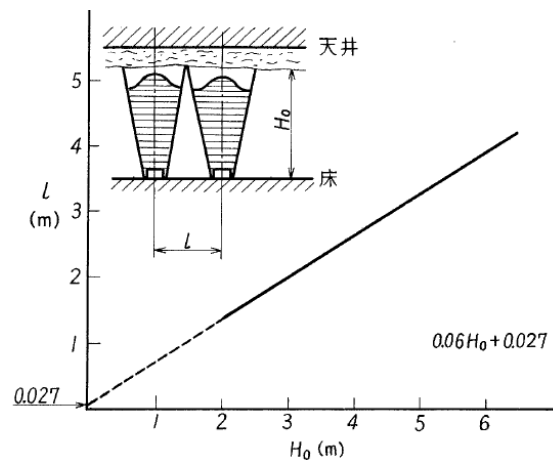


圖 2. 日本國家標準 JIS. A4303 排煙設備之檢查方式



圖 3. 黑煙與白煙測試現象

## 二、實驗設備及方法

## 2.1 實驗設備

依據 AS4391 之標準，實驗的進行過程，紀錄資料有影像與數據。紀錄的影像包含靜態相片與動態影片，由影像模擬人員於濃煙現場的視覺效果，觀察濃煙之變化。記錄的數值為能見度變化之火場性質。相關實驗設備說明如下：

### (1) 測試場地

研究的測試場所位於 W 科技大學的煙霧實驗室。內部提供 10 公尺煙能見度之目視觀測。表 1 為空間說明，平面視圖如圖 4 所示。

表 1. 煙霧室空間說明

|         |                       |
|---------|-----------------------|
| 長度      | 10.40 m               |
| 寬度      | 8.80 m                |
| 天花板高度   | 2.70 m                |
| 內部樓地板面積 | 91.52 m <sup>2</sup>  |
| 空間體積    | 247.10 m <sup>3</sup> |

煙霧室內配備發煙機、排煙設備及補氣口等設備，能以數種模式進行放煙及排煙。為產生實驗所須之各種煙霧濃度變化，本研究利用發煙機本身放射壓力變化，可以有效調整發煙量。

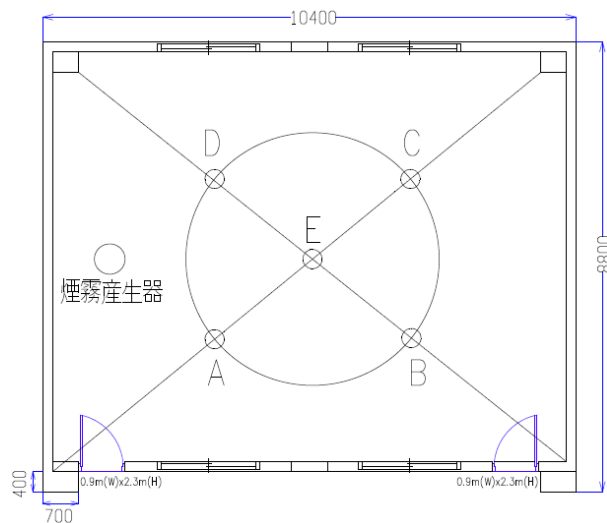


圖 4. 煙霧室平面視圖

### (2) 火源設備

本實驗所使用之火盤與發煙器相關設備，其中火盤採用直徑1尺4吋之火盤，與澳洲國家標準「AS 4391—1999, Smoke management systems - Hot smoke test」規範中之A3尺寸同、燃燒面積為0.125m<sup>2</sup>。發煙設備由發煙器、煙流導管及二氧化碳鋼瓶等組合而成。利用煙霧製造機，加熱至370℃，產生煙，製造火場的煙擴散效果。

為增加煙浮力，使用火盤燃燒甲醇，協助煙上升。經量測火盤上方的煙的溫度為70至80℃，呈現良好的漂浮效果。實驗使用荷重元、記錄器記錄甲醇燃燒情

形，如圖5的結果。甲醇的燃燒熱值為5,420 cal/g，由計算得知燃燒速率及燃燒熱值分別為1.9 g/s與43.3 kW。每次測試的燃燒速率都相同。

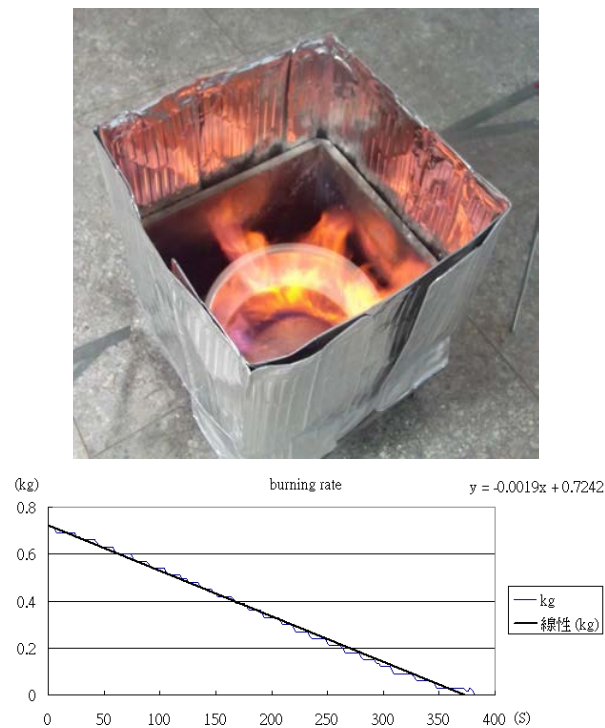


圖 5. 火盤與燃料燒失率

### (3) 發煙器

實驗採用的發煙機，如圖 6、7，為應用於全尺度煙控與防火避難等性能驗證，模擬火場煙霧的設備。發煙器產生的白煙不會污染建築物，可長時間維持漂浮在室內空氣中，為一款適合應用在建築物大空間與室內觀察煙霧流動情形的油基（Oil Based）發煙材料。



圖 6. 發煙機發煙狀況



圖 7. 發煙機及 CO2 鋼瓶

煙霧通過 HEPA (High-Efficiency Particulate Absorption, 高效率空氣微粒子過濾網)過濾測試, 粒子粒徑  $0.2-0.3\mu m$ 。發煙機的發煙方式為藉由驅動氣體(二氧化碳), 釋放鋼瓶內的高壓氣體, 推送發煙機所產生的白煙。

#### (4) 煙能見度量測儀

本研究自行開發設置一套雷射式煙層量測設備, 如圖 8、9(蘇崇輝等, 2013)。以雷射光射穿煙層。由於煙霧對光線會產生吸收、反射與折射的效果, 使照度計量到的光強度減弱。經由分析光線的遮蔽值, 可以取得煙變化的情形。發射端為工業用小型雷射光頭, 功率為 5 mW、波長為 650 nm。接收端為數位式照度計, 具有感光的元件。光靈敏度特性為 380~780 nm。

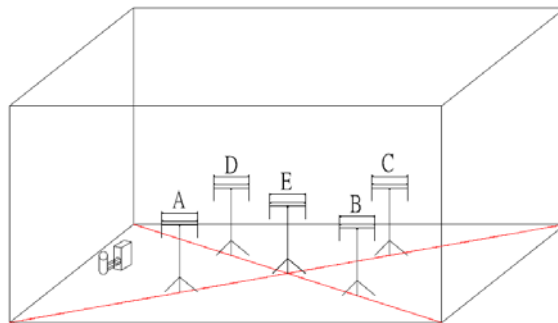


圖 8. 煙能見度量測儀測試點位置圖

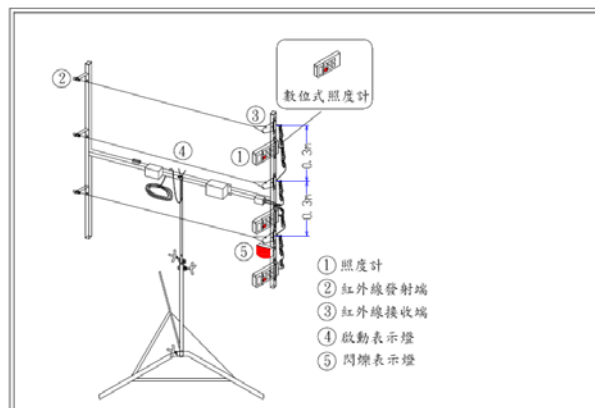


圖 9. 煙能見度量測儀配置情形

火場許多因素將影響火場的能見度, 消光係數 (K) 與火場能見度具有相關

性。一些研究探討物品燃燒時的煙的光學密度，採用計算煙的消光係數。根據 Lambert beer 定律，當波長(Wavelength)為  $\lambda$  之光束(Luminous flux)通過煙層時，光束強度的減弱具有以下關係(Ijaz et al., 2013)：

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} \exp(-KL) \quad (1)$$

其中  $I_{\lambda 0}$  ：入射光之強度(cd)

$I_{\lambda}$  ：透過煙層光之強度(cd)

L ：煙層之厚度(m)

K ：消光係數( $m^{-1}$ )

由研究的資料，整理發光物體在火場能見度(Visibility)與消光係數的關係式如下：

$$K \times S = 8 \quad (2)$$

其中 K ：消光係數( $m^{-1}$ )

S ：火場能見度(Visibility)(m)

另一套紀錄設備為利用影像錄影系統，可紀錄煙的動態分布情形。由記錄影像，觀察煙層下降時光的遮蔽現象，可模擬人員在現場的視覺感受。

## 2.2 實驗步驟

為將發煙設備之熱煙煙層下降速率值予以定量化，本研究在兩種熱源(350cc x 1 皿、350cc x 2 皿)下，發煙器以不同的氣體釋放壓力值(40、80Psi)，進行空間煙層分佈影響的量測，及能見度(s)變化的情形。

以各監測點位置(A、B、C、D、E)為單位，在相同的時間，不同的氣體釋放量，對空間煙層分佈，使測量點高度不同(距樓地板面第一點高度 2.1m、第二點高度 1.8m)的情形下其能見度(S)變化的情形。

測試時，將驅動氣體鋼瓶設定在固定壓力。參與實驗人員進行教育訓練，以了解實驗時之任務及熟悉儀器操作。試驗儀器並先行完成校正，以求實驗結果之準確性。於進行測試前，確認測試現場防護設施完備。於實驗室內設置滅火器，預防實驗當中突發狀況發生。

在相同的時間各個監測點同時所測量煙層分佈，因高度相差 30 公分，所量測之能見度變化情形。測試次數為兩次，以進行結果比較。

## 三、實驗結果與討論

在實驗的過程中以數位錄影攝影機，分佈四個角落點，以影像記錄煙層變化情形。在煙層變化當中觀察紅外線照度儀 (Infrared illumination instrument) 所發

射之紅外光在煙層煙霧中光軸所呈現之因煙霧阻擋光波行進路線的過程，並將其記錄作為資料。

在實驗的過程中以數位錄影攝影機，分佈四個角落點，以影像記錄煙層變化情形。在煙層變化當中觀察紅外線照度儀(Infrared illumination instrument)所發射之紅外光在煙層煙霧中光軸所呈現之因煙霧阻擋光波行進路線的過程，並將其記錄作為資料。

圖 10 為測試現場濃煙擴散狀況，圖 11 為實驗現場實景。由現場發現，當發煙機釋放約 40 秒後，現場能見度下降十分明顯。顯見全尺度熱煙測試可達到模擬火場濃煙分布之實況現象。



圖 10. 測試現場濃煙擴散狀況



圖 11. 實驗測試現場實景

濃煙經適當之加熱，呈現與實際火場相同的火羽流現象。因此發煙機在預熱 30 秒後，隨即持續發煙 160 秒後停止發煙。當停止發煙後，持續紀錄房間內濃煙產生的能見度變化。整個實驗於 290 秒後結束。

釋放氣體在 40psi 與 80psi 之釋放壓力下，量測儀器之光度衰減變化情形。其中，釋放時間為 160 秒。所顯示之位置為中央處之光衰減曲線。由圖 12 顯示在同樣的火源情境下，不同釋放壓力時之變化。由結果顯示，釋放壓力愈大，熱煙沉降速率愈快。最終呈現穩定後的衰減值更小。

圖 13 顯示在相同釋放壓力情境下，不同火源時之光衰減曲線變化。由圖形顯示，火源愈小，熱煙沉降速率愈快。

本研究以 K-TYPE 熱電偶紀錄實驗過程中，天花板上方的溫度分布，觀察釋放壓力與火盆多寡的影響程度。當發煙機停止發煙後，持續觀察紀錄溫度變化。

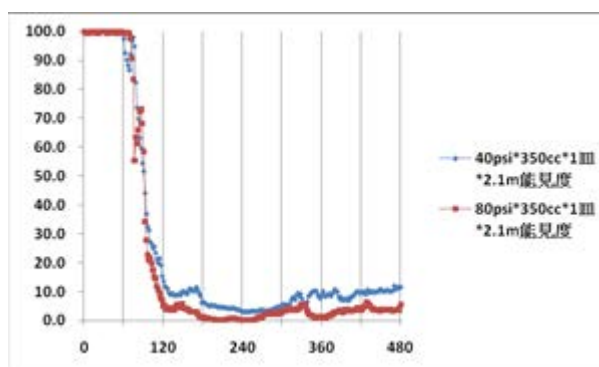


圖12. 不同釋放壓力之能見度衰減曲線  
(@一皿燃燒火源)

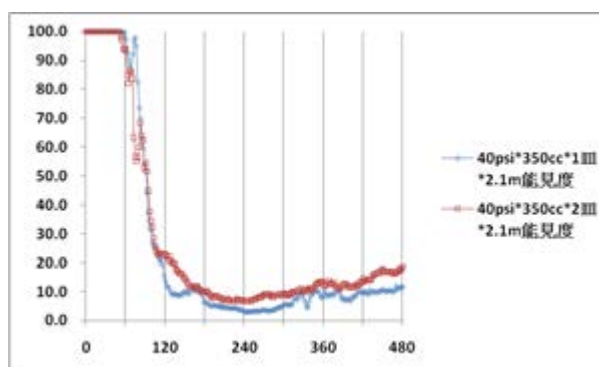


圖13. 不同火源之能見度衰減曲線  
(@40psi釋放壓力)

由圖 14 顯示，不同的氣體釋放壓力，分別在 40psi 與 80psi 壓力下，量測儀器之溫度衰減變化均十分類似。溫度皆由室溫 22°C 逐漸上升，在 180 秒時達到最高的溫度值，約 30°C。然後逐漸下降，最終保持溫度在 25°C 左右。由圖形顯示，在相同火源情境下，即使釋放壓力不同，溫度曲線仍會維持類似之變化。

圖 15 顯示不同火源情境下，溫度衰減曲線的變化較為明顯。在一皿的酒精火盤下，溫度由室溫 22°C 逐漸上升，在 180 秒時達到最高的溫度值，約 30°C。然後逐漸下降，最終保持溫度在 25°C 左右。在二皿火盤時，溫度由室溫 22°C 快速上升，在 180 秒時溫度為最高溫度值，約 36°C。經逐漸下降後，最終溫度在 27°C 左右。由圖形顯示，在相同釋放壓力情境下，不同火源導致溫度曲線變化差異甚大。

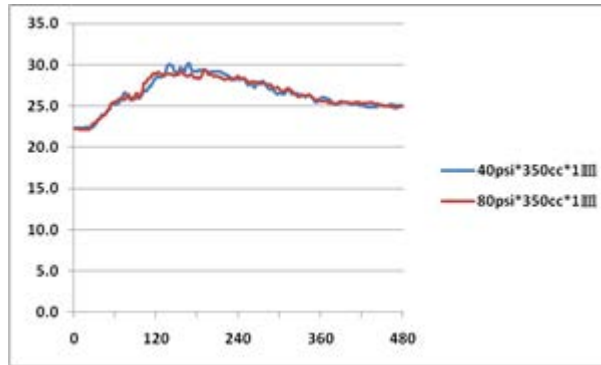


圖14. 不同釋放壓力之溫度衰減曲線  
(@一皿燃燒火源)

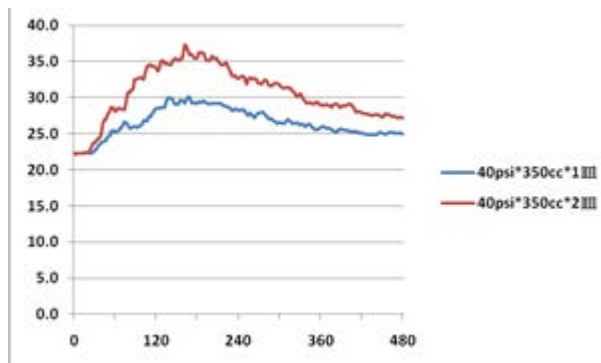


圖15. 不同火源之溫度衰減曲線  
(@40psi釋放壓力)

#### 四、驗結果與討論

全尺度熱煙實驗之優點為可清楚展現及記錄火場真實燃燒情境與煙層下降的狀況，具有真實重現火場現場情境之功能。測試結果可與火災動態與避難模擬軟體進行之模擬結果相互比對。最終結果可獲得一些相關參數，如煙流情形、煙層沉降速度、火場能見度、溫度變化等。

本實驗使用發煙機進行測試，應用於全尺度煙控性能驗證，可模擬並重現火場的煙霧效果。因產生的白煙不會污染建築物、可長時間維持漂浮於空氣中，適合建築物大空間與室內觀察煙霧流動之情形，並且不會對室內環境產生影響。

本研究測試過程採用「煙能見度量測儀」進行記錄。應用可見光的衰減原理，利用照度計作為逃生路徑濃煙熱煙煙層下降速率值分布的定量化量測。本實驗研究證明：

- (1) 當釋放壓力愈小，熱煙沉降速率愈快。
- (2) 火源熱能愈小，熱煙沉降速率愈快。
- (3) 當同火源情境下，釋放壓力不同，溫度衰減曲線維持。
- (4) 在相同釋放壓力情境下，不同火源導致溫度衰減曲線變化較大。

## 五、致謝

本文承蒙國科會研究計畫編號：NSC 101-2221-E-274-004 之經費補助得以順利完成，特此感謝。

## 六、參考文獻

1. Alarie, Y. , Toxicity of fire smoke. CRC Critical Reviews in Toxicology,32(4), 259-289, 2002.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers , Guideline 1.5-2012 -- The Commissioning Process for Smoke Control Systems.
3. Bryan, John L. "A review of the examination and analysis of the dynamics of human behavior in the fire at the MGM Grand Hotel, Clark County, Nevada as determined from a selected questionnaire population." Fire Safety Journal 5.3 (1983): 233-240.
4. Chow, W. K., et al. "Experimental studies on mechanical smoke exhaust system in an atrium." Journal of fire sciences 23.5 (2005): 429-444.
5. Chow, W. K. "Atrium smoke exhaust and technical issues on hot smoke tests." ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2005.
6. Ferreira, Michael J. "SMOKE-CONTROL SYSTEMS." Fire and Life Safety Inspection Manual (2012): 173.
7. Ijaz, Muhammad, et al. "Modeling of fog and smoke attenuation in free space optical communications link under controlled laboratory conditions." Journal of Lightwave Technology 31.11 (2013): 1720-1726.
8. Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., & Post, J. G., Building safety and human behaviour in fire: A literature review. Fire Safety Journal, 45(1), 1-11, 2010.
9. Kuo, Ching-Jung. A study on Improving Fire Safety of Existing Hotels in Taipei. Diss. Master thesis, Department of Architecture, National Taiwan University of Science and Technology, 2010.
10. Paul, K. T., et al. "Fire smoke toxicity: The effect of nitrogen oxides." Fire safety journal 43.4 (2008): 243-251.
11. Su, Chung-Hwei, et al. "Stack effect of smoke for an old-style apartment in Taiwan." Building and Environment 46.12 (2011): 2425-2433.
12. 中國消防標準化技術委員會建築消防安全工程分技術委員會, GA/T 999-2012《防排煙系統性能現場驗證方法 熱煙試驗法》.
13. 日本工業標準調查會(JP-JISC), JIS A4303-1994 排煙設備的檢驗標準
14. 各類場所消防安全設備設置標準. 內政部消防署編輯委員會, 2013.

15. 陳清吉，太子樓建築物之自然排煙效應全尺度實驗分析，吳鳳科技大學消防研究所，碩士論文，2011年8月。
16. 姚建忠，排煙設備側向補氣效應分析-以辦公室為例，吳鳳科技大學消防研究所，碩士論文，2011年8月。
17. 陳春利，以性能式設計方法（PBD）進行既有酒廠展售廣場之消防安全提昇—以C酒廠為例，吳鳳科技大學消防研究所，碩士論文，2013年8月。
18. 蘇崇輝，蘇立羣. "探討獨居老人居家消防安全訪視-以嘉義市為例." 物業管理學會論文集 (2012): 83-90.
19. 蘇崇輝，火場煙層量測裝置，中華民國發明專利，發明第335554號，2009。。
20. 蘇崇輝，陳國基，煙霧變化量測裝置，中華民國新型專利M462857，2013.10。

# 水蒸氣惰化含氧碳氫化合物之爆炸界限影響

## Effects of inert steam on explosion limits with for oxygenated hydrocarbons

劉上豪<sup>1</sup>、廖建堯<sup>2</sup>、林農凱<sup>3</sup>、徐啟銘<sup>4</sup>

Shang-Hao Liu, Jian-Yao Liao, Nung-Kai Lin, Chi-Min Shu

國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系

Department of Safety Health and Environmental Engineering, National Yunlin

University of Science and Technology, Yunlin, Taiwan

### 摘要

易燃性液體與可燃性氣體在化學工業中使用相當廣泛，爆炸界限為易燃性液體與可燃性氣體火災爆炸危害的重要指標。本研究利用質能平衡之關係，假設絕熱火焰溫度不變的條件下，探討含氧基碳氫化合物在以水蒸氣作為惰化劑，對其惰化混合物之爆炸界限進行預測，並以實驗數據作為佐證。本研究初始條件設定大氣壓為 1 atm、溫度為 150 °C，使用 20 升爆炸鋼球以獲取爆炸界限數據，含氧基碳氫化合物則選用甲醇、丙酮及甲酸甲酯，惰化劑則為水蒸氣。研究結果顯示，理論線性關係在爆炸上限成立，其線性迴歸值  $R^2$  皆大於 0.992，而水蒸氣也有效惰化甲醇、丙酮及甲酸甲酯，爆炸界限會隨著水蒸氣含量增加而逐漸縮小，直至惰化點為止。

**關鍵字：**爆炸界限、含氧基碳氫化合物、絕熱火焰溫度、質能平衡

### Abstract

Flammable vapors or gases are used widely in chemical industrial. Therefore, explosion limits are crucial information for people who handle/operate flammable vapors or gases. With the assumptions that the adiabatic flame temperatures are the same for all limit mixtures, this study adopted energy balance to develop a theoretical model for forecasting explosion limit of inert mixtures. Moreover, the difference between theoretical and experimental data were compared. Experimental tasks were via the in a 20-L-Apparatus at 1 atm and 423 K to measure the explosion limits of methyl alcohol, acetone and methyl formate diluted with steam, respectively.

---

<sup>1</sup>雲林科技大學環境與安全衛生工程系，博士研究生

<sup>2</sup>雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士研究生

<sup>3</sup>雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士

<sup>4</sup>雲林科技大學環境與安全衛生工程系，特聘教授，E-mail: [shucm@yuntech.edu.tw](mailto:shucm@yuntech.edu.tw)

The experimental results indicated that theoretical linear relationship was established due to the coefficients of determination ( $R^2$ ) of the regression lines are found to be more than 0.992 for all aforementioned cases at UEL. The experimental results also indicated that steam can inert oxygenated hydrocarbons effectively. The explosion limits range of oxygenated hydrocarbons were decreased when steam volume increasing until reaching fuel inertization point.

Keywords: explosion limits, oxygenated hydrocarbons, adiabatic flame temperatures, energy balance

## 一、前言

隨著工業的發展，許多工廠如石化廠、特化廠以及科技產業如半導體、光電廠皆有在製程中使用多種有害物與危險物。相對於會對環境造成危害之有害物，危險物在其製程本質安全上則受到更多關注，因危險物常具有自燃性、易燃性及反應性等特性，更有衍生火災爆炸之虞。隨著工業製程的發展與進步，所使用的化學品更加繁雜也更具危險性，因此提供可燃物防止燃爆的方法對於製程安全上是有利且重要的。

工廠在製程上使用或生產引火性液體與可燃性氣體，為避免在儲存與運輸過程中有洩漏之情形，必須定期進行保養、維護，同時也須注意是否會有使用年限過長、材料因破損而外洩之情形。在儲存、運輸過程中也須注意空間內引火性液體與可燃性氣體濃度，為防止作業人員在作業期間發生燃爆意外，於是在工業上會使用惰化的方式以降低儲槽內可燃性氣體濃度，如此一來可避開爆炸（燃燒）界限範圍。

為防止爆炸之發生，爆炸界限 (Explosion limit) 為最重要之參數，爆炸界限係指可燃性氣體或易燃液體之蒸氣與空氣（氧氣）混合後，遇到火源後可達爆炸最低或最高之體積百分比，可達爆炸最低體積百分比稱為爆炸下限 (Lower Explosion Limit, LEL)，而可達爆炸最高體積百分比稱為爆炸上限 (Upper Explosion Limit, UEL)，界限範圍亦稱為爆炸範圍，為防止火災爆炸之發生，多數工廠在作業期間都會試圖避開爆炸上下限範圍。為避免火災爆炸發生，於可燃性或易燃性液體蒸氣之混合物中添加惰性氣體，使空氣中之氧濃度低於最小需氧濃度 (Minimum Oxygen Concentration, MOC)[1, 2]，因當惰性氣體含量增多會使爆炸範圍縮小而抑制易燃性物質的易燃特性避免爆炸情況發生[3]。

為降低氧氣在製程中的濃度，化工廠多使用惰性氣體取代空氣以避免可燃性物質達燃爆範圍內。常見惰性氣體如氮氣 ( $N_2$ )、水蒸氣 ( $H_2O$ ) 以及二氧化碳 ( $CO_2$ )，而藉由加入惰性氣體使可燃性氣體濃度下降至燃爆範圍外稱為惰化 (Inert)，由於惰性氣體不參與反應而使災害發生機率大幅減小。

為防止火災爆炸危害發生，在過去有許多對於燃燒界限相關研究，除了有對純可燃性氣體的爆炸界限進行預測[4]，也有針對多種可燃性氣體混合物與含有

情性氣體惰化情況之燃燒界限影響進行研究[5, 6]，採用 Le Chatelier's 原理估算多種可燃性混合物的燃燒界限，也有學者將其原理延伸到系統含有情性氣體進行燃燒界限估算[7]。

本研究針對含氧基之碳氫化合物利用水蒸氣進行惰化，在假設絕熱火焰溫度 (Adiabatic Flame Temperatures, AFT) 不變並利用質能平衡之關係下建立理論模式，探討水蒸氣對燃燒界限之影響，利用理論計算結果對實驗數據進行驗證，實驗部份則使用常見的有機溶劑如甲醇/水、丙酮/水以及甲酸甲酯/水作進行試驗，利用上述物質於爆炸上下限之產物進行定性分析，以瞭解是否與平衡假設之產物相符。

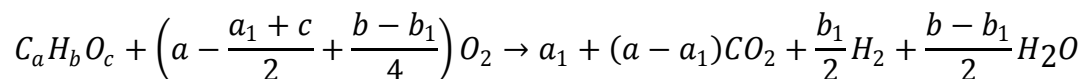
## 二、材料與方法

### 2.1.理論

一般來說，在許多文獻中可燃性物質之爆炸界限可用體積百分比 (vol.%) 來表示；然而，含氧碳氫化合物可在大氣壓下視為理想氣體，爆炸界限可作為莫耳分率解釋，這是本研究所採用的表示式來解釋。為使接下來的理論推倒過程能夠清楚表達，因此先說明符號所代表之意義：(1)  $U$  為可燃物惰化之燃燒上限，可燃物與混合物 (可燃物、空氣以及情性氣體) 之莫耳百分比， $U = \text{Fuel} / (\text{Fuel} + \text{Inert} + \text{Air})$  在未惰化情況下；(2)  $U_1$  為含氧基碳氫化合物在UEL時，可燃物與混合物 (可燃物與空氣) 之莫耳分率，即  $U_1 = \text{Fuel} / (\text{Fuel} + \text{Air})$ ；(3)  $L$  為可燃物惰化之燃燒下限，可燃物與混合物 (可燃物、空氣以及情性氣體)，即  $L = \text{Fuel} / (\text{Fuel} + \text{Inert} + \text{Air})$ ；(4)  $L_1$  為含氧基碳氫化合物在LEL時，可燃物與混合物 (可燃物與空氣) 之莫耳分率，即  $L_1 = \text{Fuel} / (\text{Fuel} + \text{Air})$ ；(5)  $x$  為可燃性物質與惰系氣體混合物之莫耳分率，即  $x = \text{Fuel} / (\text{Fuel} + \text{Inert})$ 。

#### 2.1.1.燃燒上限理論模式

含氧基碳氫化合物在未惰化之燃燒上限，因燃料過量而氧氣少量的情況下，可燃性物質沒有完全燃燒，我們假設燃燒 1 mole 的含氧碳氫化合物 ( $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$ ) 可產生  $a_1$  mole 的  $\text{CO}$ 、 $b_1/2$  mole 的  $\text{H}_2$ ，因此相對應的化學劑量關係燃燒反應式如下：



$$\Delta H = -\Delta h_c \quad (1)$$

根據式 (1)  $-\Delta h_c$  為燃燒 1 mole 含氧基碳氫化合物的反應熱，根據式 (1) 可將反應物、生成物與氧氣莫耳數之比值簡化為符號，以下符號在本節中定義：

$$k = \frac{1}{a - (a_1 + c)/2 + (b - b_1)/4}$$

$$q = \frac{a_1}{a - (a_1 + c)/2 + (b - b_1)/4}$$

$$r = \frac{a - a_1}{a - (a_1 + c)/2 + (b - b_1)/4}$$

$$s = \frac{(b - b_1)/2}{a - (a_1 + c)/2 + (b - b_1)/4}$$

$$t = \frac{b_1/2}{a - (a_1 + c)/2 + (b - b_1)/4}$$

在此小節假定為真的假設包含: ( $U_1$ ) 氧氣在UEL完全反應; ( $U_2$ ) 惰性氣體存在下, 在式 (1) 化學劑量關係式不會改變; 以及 ( $U_3$ ) 在UEL時, 所有混合物絕熱溫度上升相同。

根據假設 $U_1$ 與 $U_2$ 所有反應物與生成物在燃燒反應前後的莫耳數可以被計算。在燃燒前有 $U$ 莫耳的含氧基碳氫化合物、 $U/x$ 莫耳的混合氣體、 $(U/x-U)$ 莫耳的惰化蒸氣以及 $(1-U/x)$ 莫耳的空氣。在燃燒過後氧氣應為 0 mole 因為假設 $U_1$ 在UEL時需要氧氣完全反應。當假設 $U_2$ 需要燃燒反應的化學劑量關係式在有惰性氣體存在下不會改變, 所有燃燒產物的數量可根據化學劑量關係式 (1) 計算, 表 1 總結了所有反應物包含在其UEL燃燒 1 mole 總混合物燃燒反應前後莫耳數。

表 1 於燃燒上限惰化混合物之燃燒前後的物質莫耳分率

| 化合物名稱    | 燃燒前莫耳分率                             | 燃燒後莫耳分率                                                   |
|----------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 含氧基碳氫化合物 | $U$                                 | $U - 0.21k \left(1 - \frac{U}{x}\right)$                  |
| 空氣       |                                     |                                                           |
| 氮氣       | $0.79 \left(1 - \frac{U}{x}\right)$ | $0.79 \left(1 - \frac{U}{x}\right)$                       |
| 氧氣       | $0.21 \left(1 - \frac{U}{x}\right)$ | 0                                                         |
| 一氧化碳     | 0                                   | $0.21q \left(1 - \frac{U}{x}\right)$                      |
| 二氧化碳     | 0                                   | $0.21r \left(1 - \frac{U}{x}\right)$                      |
| 水        | $\frac{U}{x}(1 - x)$                | $0.21s \left(1 - \frac{U}{x}\right) + \frac{U}{x}(1 - x)$ |
| 氫氣       | 0                                   | $0.21t \left(1 - \frac{U}{x}\right)$                      |

假設氧氣完全被消耗，在 UEL 下燃燒 1 mole 混合物所釋放的熱可使用下式計算：

$$\Delta h = 0.21k \left(1 - \frac{U}{x}\right) (-\Delta h_c) \quad (2)$$

此外，燃燒產物總熱容（包含未燃燒之反應物）可被計算為

$$\begin{aligned} Cp = & \left( U - 0.21k \left(1 - \frac{U}{x}\right) \right) Cp_f + 0.79 \left(1 - \frac{U}{x}\right) Cp_{N_2} + 0.21q \left(1 - \frac{U}{x}\right) Cp_{CO} \\ & + 0.21r \left(1 - \left(\frac{U}{x}\right)\right) Cp_{CO_2} + \left[ 0.21s \left(1 - \frac{U}{x}\right) + \frac{U}{x}(1 - x) \right] Cp_{H_2O} \\ & + 0.21t \left(1 - \frac{U}{x}\right) Cp_{H_2} \end{aligned} \quad (3)$$

$C_p$  為燃燒產物總熱容， $C_{p_f}$ ,  $C_{p_{N_2}}$ ,  $C_{p_{CO}}$ ,  $C_{p_{CO_2}}$ ,  $C_{p_{H_2O}}$  以及  $C_{p_{H_2}}$  分別為含氧基碳氫化合物、氮氣、一氧化碳、二氧化碳、水以及氫氣之莫耳熱容。

將式 (3) 含有  $U$  的式子結合在一起得出下列式子：

$$\begin{aligned} C_p = & \left( U - 0.21k \left( 1 - \frac{U}{x} \right) \right) C_{p_f} + 0.79 \left( 1 - \frac{U}{x} \right) C_{p_{N_2}} + 0.21q \left( 1 - \frac{U}{x} \right) C_{p_{CO}} \\ & + 0.21r \left( 1 - \left( \frac{U}{x} \right) \right) C_{p_{CO_2}} + \left[ 0.21s \left( 1 - \frac{U}{x} \right) + \frac{U}{x} (1 - x) \right] C_{p_{H_2O}} \\ & + 0.21t \left( 1 - \frac{U}{x} \right) C_{p_{H_2}} \end{aligned} \quad (4)$$

為符號簡便起見，以  $P_1$  定義如下：

$$\begin{aligned} P_1 \equiv & 0.21k C_{p_f} - 0.79 C_{p_{N_2}} - 0.21q C_{p_{CO}} - 0.21r C_{p_{CO_2}} - 0.21s C_{p_{H_2O}} \\ & - 0.21t C_{p_{H_2}} \end{aligned} \quad (5)$$

將式 (5) 代入式 (4) 後並重新整理後得

$$C_p = U(C_{p_f} - C_{p_{H_2O}}) + \frac{U}{x}(P_1 + C_{p_{H_2O}}) - P_1 \quad (6)$$

根據假設  $U_1$  與假設  $U_2$ ，每個物質包含經過燃燒程序燃燒反應前後之莫耳數都可被計算，計算結果總結於表 2。

表 2 於燃燒上限未惰化混合物之燃燒前後的物質莫耳分率

| 化合物名稱    | 燃燒前莫耳分率         | 燃燒後莫耳分率                |
|----------|-----------------|------------------------|
| 含氧基碳氫化合物 | $U_1$           | $U_1 - 0.21k(1 - U_1)$ |
| k 空氣     |                 |                        |
| 氧氣       | $0.79(1 - U_1)$ | $0.79(1 - U_1)$        |
| 氮氣       | $0.21(1 - U_1)$ | 0                      |
| 一氧化碳     | 0               | $0.21q(1 - U_1)$       |

---

|      |   |                  |
|------|---|------------------|
| 二氧化碳 | 0 | $0.21r(1 - U_1)$ |
| 水    | 0 | $0.21s(1 - U_1)$ |
| 氫氣   | 0 | $0.21t(1 - U_1)$ |

---

根據表 2，在 UEL 下燃燒 1 mole 的燃料混合物所釋放的熱為

$$(\Delta h)_1 = 0.21k(1 - U_1)(-\Delta h_c) \quad (7)$$

燃燒 1 mole 燃料混合物之燃燒產物總熱容可以下式計算：

$$\begin{aligned} Cp = & (U_1 - 0.21k(1 - U_1))Cp_f + (0.79(1 - U_1))Cp_{N_2} + (0.21q(1 - U_1))Cp_{CO} \\ & + 0.21r(1 - U_1)Cp_{CO_2} + 0.21s(1 - U_1)Cp_{H_2O} + 0.21t(1 - U_1)Cp_{H_2} \end{aligned} \quad (8)$$

將式 8 中含有  $U_1$  式子結合結合在一起並代入式 5 可得

$$\begin{aligned} Cp_1 &= U_1(Cp_f + P_1) - P_1 \\ &= U_1(Cp_f - Cp_{H_2O}) + U_1(Cp_f + Cp_{H_2O}) - P_1 \end{aligned} \quad (9)$$

比較燃燒 1 mole 總混合物與 1 mole 的燃料混合物在相對應的 UEL 釋放熱，以下結果為從假設  $U_3$  所得之結論

$$\frac{\Delta h}{(\Delta h)_1} = \frac{Cp\Delta T}{Cp_1\Delta T_1} = \frac{Cp}{Cp_1} \quad (10)$$

$\Delta T$  與  $\Delta T_1$  分別為燃燒總混合物與燃料混合物絕熱溫度上升。將式 2、6、7 以及式 9 代入式 10 可得

$$\frac{0.21k(1 - U/x)(-\Delta h_c)}{0.21k(1 - U_1)(-\Delta h_c)} = \frac{U(Cp_f - Cp_{H_2O}) + (U/x)(P_1 + Cp_{H_2O}) - P_1}{U_1(Cp_f + P_1) - P_1} \quad (11)$$

將  $-\Delta h_c$  從式 11 消去並整合式 11 所有含有  $U$  項目，可得

$$\frac{1}{U} = \frac{U_1Cp_f + (1 - U_1)Cp_{H_2O}}{U_1Cp_f} \frac{1}{x} + \frac{(1 - U_1)(Cp_f - Cp_{H_2O})}{U_1Cp_f} \quad (12)$$

將式 (12) 重新整理改寫後可得

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{U_1 C p_f + (1 - U_1) C p_{H_2O}}{U_1 C p_f} \left( \frac{1}{x} - 1 \right) \quad (13)$$

從式 13 可輕易瞭解係數  $((1/x)-1)$  項目為常數項對於給定含氧基碳氫化合物，定義  $\phi_U$  如下：

$$\phi_U \equiv \frac{U_1 C p_f + (1 - U_1) C p_{H_2O}}{U_1 C p_f} \quad (14)$$

因此，式 13 可用更緊湊的形式表示如下：

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \phi_U \left( \frac{1}{x} - 1 \right) \quad (15)$$

式 15 可用來預測含氧基碳氫化合物經蒸氣稀釋後之理論模型，利用  $((1/U)-(1/U_1))$  對  $((1/x)-1)$  作圖可得穿過原點一直線，在結果與討論部份會檢視此理論是否支持現有的實驗方法。

## 2.2. 研究方法

本研究所使用的含氧基碳氫化合物為甲醇、丙酮以及甲酸甲酯，這些物質皆為含氧基碳氫化合物之可燃性物質，且為普遍使用之溶劑，根據其官能基可分為三類：醇類（甲醇）、酮類（丙酮）以及酯類（甲酸甲酯）。

實驗初始條件設定在壓力為 1 大氣壓與溫度 150 °C 下進行，選擇此溫度原因為實驗所使用的含氧基碳氫化合物沸點皆低於 150 °C，可確保其完全揮發成器相以利實驗之進行。溶液配置則利用莫耳分率 (Fuel/(Fuel+Inert)) 比例下換算得知含氧碳氫化合物與惰化物水各別所需量，實驗先以比率 0.25、0.5、0.75 為主要大刻度，決定其爆炸上下限，直到接近惰化點再劃分小刻度進行取點。實驗進行前先將熱煤油升溫至實驗所需之溫度並維持恆溫。而爆炸爆炸上下限測定方法為先取樣品 1 mol% 或 2 mol% 開始測試，首先以大範圍進行測試，待接近上限點時再以每次增加 0.1–0.5 mol% 進行測試，若連續三次以上均無法引爆則進行下一個能夠引爆之濃度值，此濃度為爆炸上限 (UEL)；反之，當接近下限點時再以每次減少或增加樣品 0.1–0.5 mol%，直到連續三次以上均無法引爆的濃度為止則往上一個能夠引爆之濃度值，極為爆炸下限 (LEL)。

本研究所使用的儀器為 20 升爆炸鋼球，如圖 1 所示，此爆炸鋼球符合美國材料試驗學會 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 1226 與德國工程師組織 (Verein Deutscher Ingenieure, VDI) 2263 所訂定之規範。20 升爆炸鋼球具有耐溫、耐壓較佳之優點且多用於粉塵測試，但稍經改良後即可測試可燃性氣體與易揮發性液體燃爆參數。

本研究儀器設備包含以下 4 個系統：(a) 溫度系統，使用恆溫油浴槽加熱煤油並維持恆溫，使用泵將熱煤油泵進鋼球夾層內，控制實驗所需溫度；(b) 壓力系統：可用來量測爆炸所產生的壓力；(c) 點火系統：選用選用 KESP 320，點

火方式為使用 KSEP 6.0f 軟體操作點火步驟使鐵釘尖端放電點火；(d) 數據傳輸系統：透過 KSEP 332 壓力傳輸器將量測到的壓力數據傳回電腦，最後再使用 KSEP 6.0f 軟體進行數據計算。本研究儀器設備如圖 2。



圖 1 20 升爆炸鋼球裝置圖

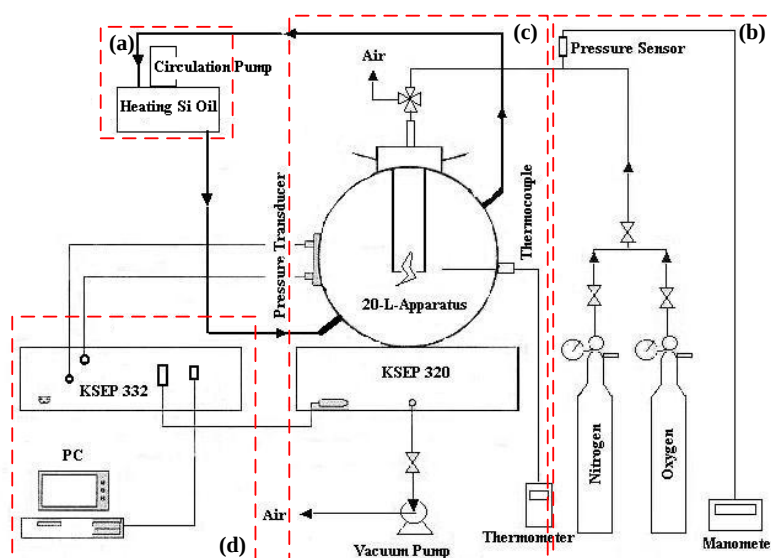


圖 2 20 升爆炸鋼球之控制系統與配置圖

(a) 溫度系統 (b) 壓力系統 (c) 點火系統 (d) 數據傳輸系統

在本研究中所使用之實驗方法為 ASTM 標準試驗方法，如 ASTM 681-09[8]、E918-83[9]以及 E 2079[10]，而實驗分成三個階段，第一階段根據 ASTM 681-09 首先將鋼球內抽取真空並充入空氣，以確保在實驗進行前鋼球內無其它殘留之揮發性廢氣[8]；第二階段於添加惰化劑之前先添加燃料，之後空氣導入鋼球內直到初始條件 (101 kPa)；最後階段，我們必須確定爆炸是否有在特定的惰化比例

發生。根據 E 918-83 當壓力上升超過或等於初始試驗壓力的 7% 可被認定為爆炸 [9]。此外，根據 E 2079 將點火能量設定為 10 J。

### 三、結果與討論

水蒸氣惰化甲醇、丙酮以及甲酸甲酯之爆炸上下限結果數據如表 3-5 所示，而圖 3-5 為依據表 3-5 數據所繪成。由圖 3-5 可看出含氧基碳氫化合物之爆炸界限會隨著水蒸氣含量增加而逐漸縮小，直至惰化點 (Fuel inertization point, FIP) 為止。有文獻指出惰性氣體加入會取代原本的空氣，但在爆炸下限時，燃料為限制性材料，必須達到下限濃度才會產生燃燒爆炸反應，因此無論空氣是否增加或減少都無法達到燃燒爆炸反應的濃度點為惰化點 [11]。

表 3 水蒸氣惰化甲醇之爆炸界限

| 莫耳分率 (x) | LEL/mol. % | UEL/mol. % |
|----------|------------|------------|
| 0.130    | 6.2435     | 6.7638     |
| 0.150    | 7.1106     | 8.1512     |
| 0.170    | 6.2435     | 8.6715     |
| 0.200    | 6.4169     | 10.0590    |
| 0.250    | 6.4169     | 13.5276    |
| 0.500    | 6.4169     | 21.6788    |
| 0.750    | 6.0701     | 31.0441    |
| 1.000    | 5.7232     | 41.1030    |

表 4 水蒸氣惰化丙酮之爆炸界限

| 莫耳分率 (x) | LEL/mol. % | UEL/mol. % |
|----------|------------|------------|
| 0.080    | 3.4686     | 3.4686     |
| 0.090    | 2.9483     | 3.9889     |
| 0.100    | 2.7749     | 4.1623     |
| 0.250    | 2.6015     | 7.6309     |
| 0.500    | 2.6015     | 10.5793    |
| 0.750    | 2.6015     | 12.8339    |
| 1.000    | 2.615      | 13.8744    |

表 5 水蒸氣惰化甲酸甲酯之爆炸界限

| 莫耳分率 (x) | LEL/mol. % | UEL/mol. % |
|----------|------------|------------|
| 0.125    | 6.2435     | 6.5904     |
| 0.150    | 5.2029     | 7.6309     |
| 0.200    | 4.8561     | 9.3652     |
| 0.250    | 4.8561     | 11.0995    |
| 0.500    | 4.8561     | 17.6899    |
| 0.750    | 4.8561     | 22.8928    |
| 0.900    | 4.8561     | 25.6677    |
| 1.000    | 4.8561     | 28.2692    |

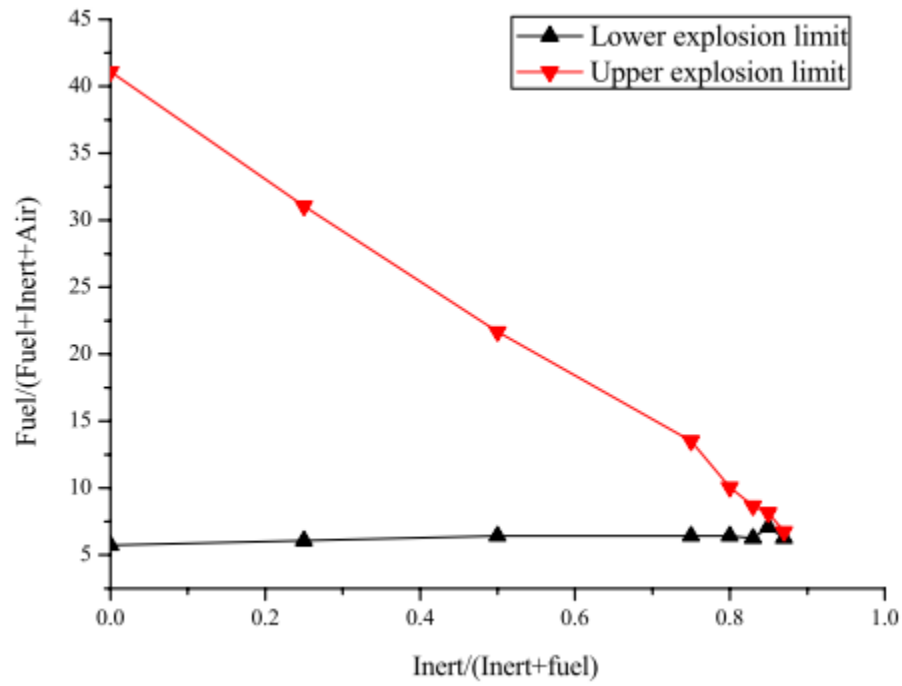


圖 3 水蒸氣惰化甲醇對爆炸界限造成之影響

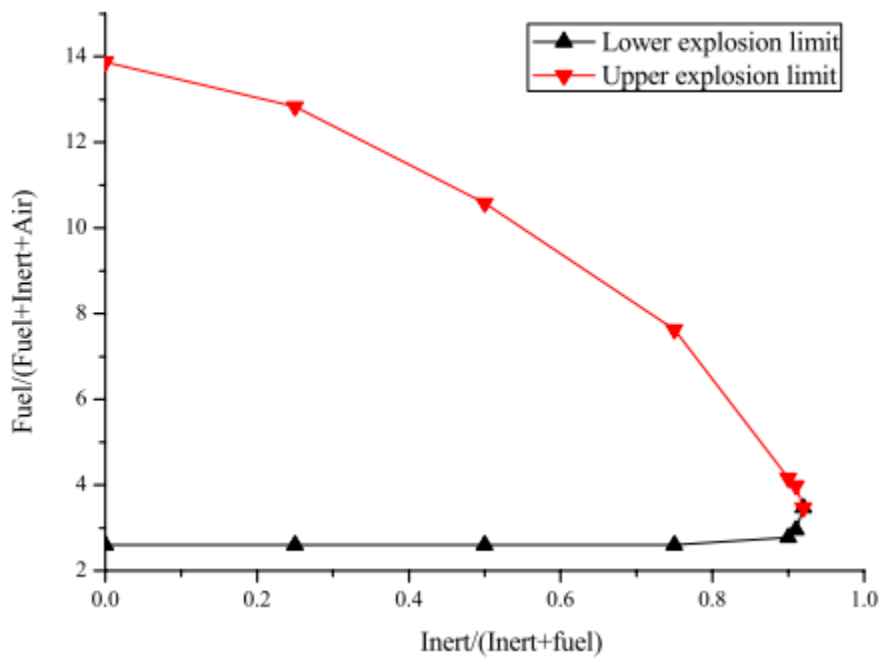


圖 4 水蒸氣惰化丙酮對爆炸界限造成之影響

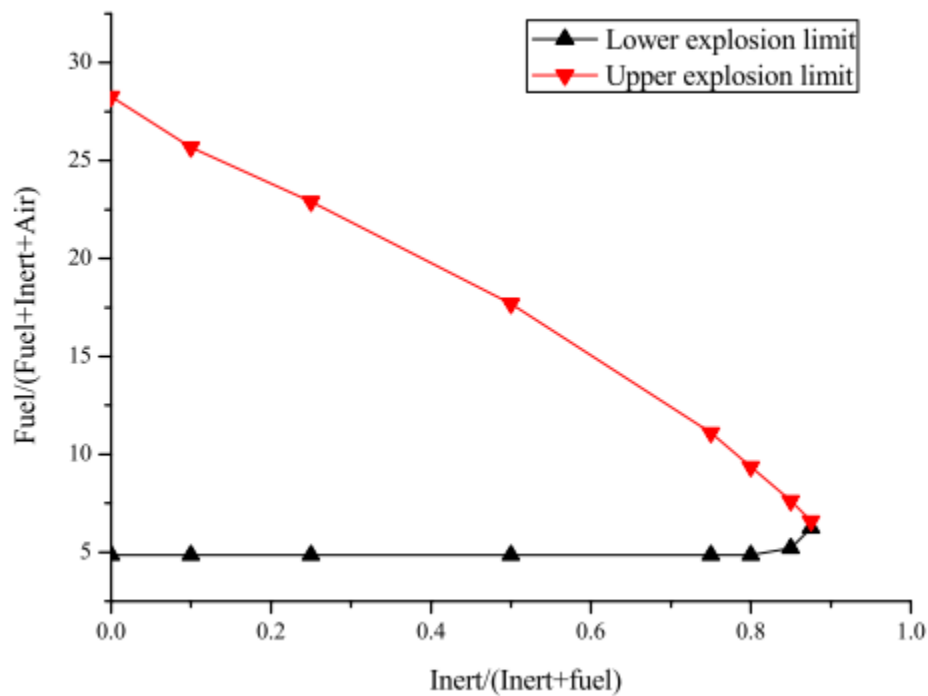


圖 5 水蒸氣惰化甲酸甲酯對爆炸界限造成之影響

圖 6-8 為水蒸氣惰化甲醇、丙酮以及甲酸甲酯爆炸上限迴歸結果，根據爆炸上限理論模式，將 $((1/U)-(1/U_1))$ 對 $((1/x)-1)$ 作圖，並將其強制通過原點可得一直線線性關係，其中實心點為實驗數據、紅色實線為迴歸線，甲醇、丙酮以及甲酸甲酯迴歸線 $r^2$ 直接大於 0.992，可看出三種含氧基碳氫化合物之爆炸上限有高度線性關係，因此式 14 可有效解釋水蒸氣惰化含氧基碳氫化合物對爆炸上限的影響與變化，表 6 為 3 種含氧基碳氫化合物爆炸上限迴歸結果與斜率值。

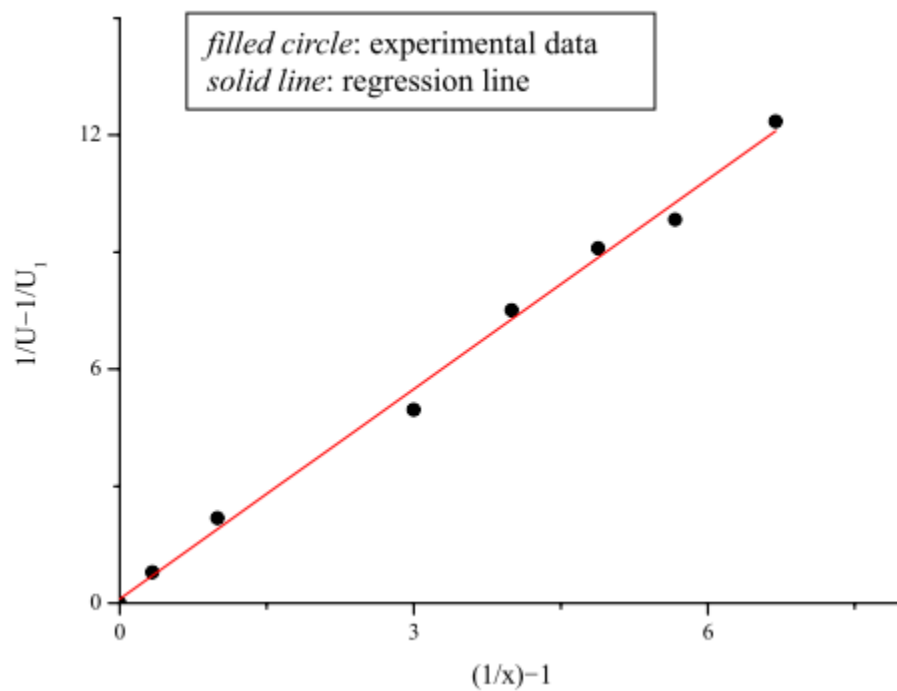


圖 6 爆炸上限水蒸氣惰化甲醇之迴歸結果

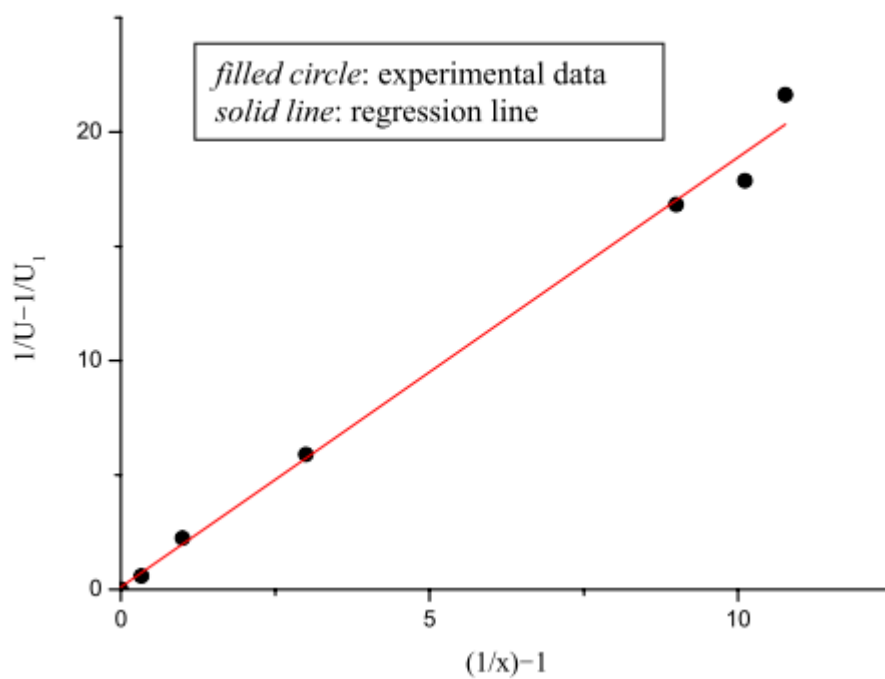


圖 7 爆炸上限水蒸氣惰化丙酮之迴歸結果

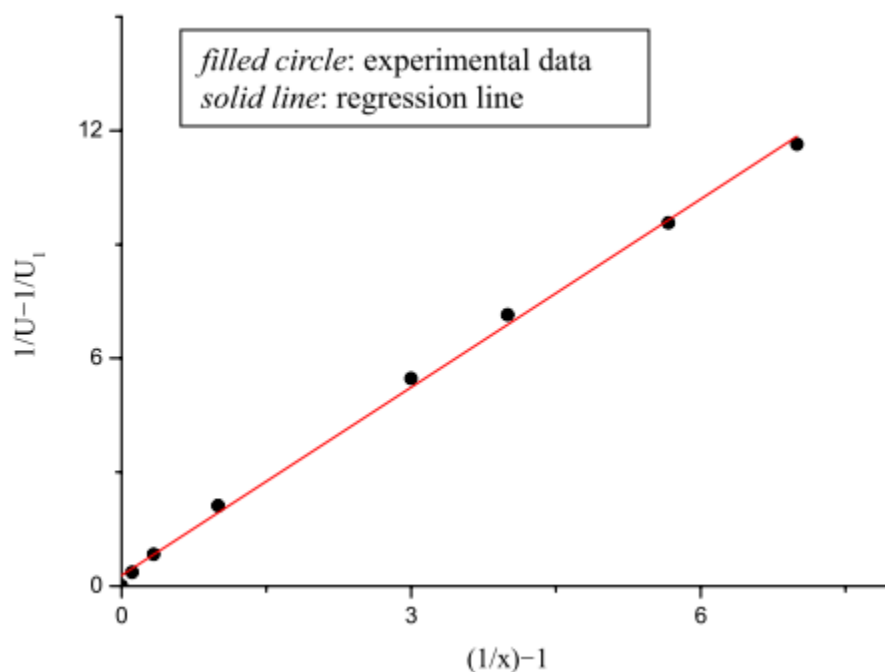


圖 8 爆炸上限水蒸氣惰化甲酸甲酯之迴歸結果

表 6 甲醇、丙酮以及甲酸甲酯於爆炸上限之迴歸數值

| 化合物名稱 | $R^2$  | 斜率 (實驗值) | 標準差    |
|-------|--------|----------|--------|
| 甲醇    | 0.9942 | 1.7623   | 0.0520 |
| 丙酮    | 0.9920 | 1.8801   | 0.0689 |
| 甲酸甲酯  | 0.9976 | 1.6520   | 0.0307 |

若提出的假設 $U_1 - U_3$ 能描述燃燒反應，模式可準確預測爆炸上限，在此假設下表 7 中斜率值應會與式 14 計算所得之結果相同，但實際觀察結果卻非如此。從文獻中可瞭解對於 $\phi_u$ 理論值與實驗落差之原因，因碳氫化合物之絕熱火焰溫度值尚未統一，有學者認為其溫度在 1,550 K[12]或 1,200 K[13]，也有學者認為落在 1,000–1,500 K之間[14]，而本研究將絕熱火焰溫度設為 1,400 K， $\phi_u$ 理論值與實驗所得知斜率如表 7，表 7 可看出在不確定絕熱火焰溫度的情況下，理論值與實驗值會有所落差。

表 7 甲醇、丙酮以及甲酸甲酯  $\phi_u$  理論值與實驗值之比較

| 化合物  | $\phi_u$ 實驗值 | $\phi_u$ 理論值 (式 14) |
|------|--------------|---------------------|
| 甲醇   | 1.7923       | 1.9126              |
| 丙酮   | 1.8801       | 2.6536              |
| 甲酸甲酯 | 1.6520       | 2.3690              |

表 8 則列出所有物質平均熱容量數值，依據文獻所提出之 1,000–1,600 K 絕熱火焰溫度，表中從本研究所設定之起始溫度 423 K 至表中所列之溫度，參考 DIPPR (Design Institute for Physical Property) 資料庫計算所得，除平均比熱容量之外，特定物質之絕熱火焰溫度用於  $\phi_u$  的計算也是不可少的一部分。

表 8 化合物於 423 K 治所列溫度之比熱容

| 化合物名稱 | 1,000 K | 1,100 K | 1,200 K | 1,300 K | 1,400 K | 1,500 K | 1,600 K |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 甲醇    | 12.4528 | 13.1309 | 13.8004 | 14.4506 | 15.0749 | 15.6702 | 16.2349 |
| 丙酮    | 31.9359 | 33.1061 | 34.1596 | 35.1089 | 35.9659 | 36.7415 | 37.4454 |
| 甲酸甲酯  | 14.9948 | 15.7994 | 16.5288 | 17.1917 | 17.7953 | 18.3464 | 18.8507 |
| 水     | 9.0122  | 9.1599  | 9.3082  | 9.4554  | 9.6011  | 9.7435  | 9.8821  |

$\phi_u$  理論值與實驗值之落差在於提出之假設與實際惰化情形有偏差所導致，從圖 3–5 也可看出當惰性氣體到一定量時，爆炸上限與下限會交於一惰化點，此點之情形即偏離原先假設，代表上下限較缺乏之物質已不同於假設之情形，因此建議以實驗數據決定  $\phi_u$  會較為妥當，進而準確預測惰化後之爆炸上限。從式 14 也可瞭解到當易燃性物質爆炸上限較高，惰化結果影響較小，即當爆炸上限越接近 1 時， $(1-U_1)$  則更趨近於 0，使  $\phi_u$  不受  $C_{p_{H_2O}}$  之影響，此結果也可從圖 6–8 觀察得知，也是造成計算之  $\phi_u$  與實驗所得之斜率偏差原因。

#### 四、結論

本研究結果顯示，以水蒸氣作為惰化劑可有效惰化含氧基碳氫化合物，使其燃燒爆炸界限範圍縮小，直到惰化點為止。

過往對於燃燒爆炸界限之估算相關研究中，惰化混合物的相關研究一直受關注，經理論分析可得知碳氫可燃物與惰性氣體混合物之燃燒上限的倒數與該混合物中碳氫化合物之莫耳分率倒數有線性關係。本研究以質能平衡關係，假設絕熱火焰溫度不變情況下，探討水蒸氣惰化對含氧基碳氫化合物（甲醇、丙酮以及甲酸甲酯）之爆炸界限之影響，結果發現在爆炸上限時，實驗數據迴歸之決定

係數皆大於 0.992 以上，由此可得知爆炸上限理論模式具有高度可信性。

## 五、參考文獻

1. Crowl, D.A. and J.F. Louvar, *Chemical process safety: fundamentals with applications*. 2012: Pearson Education.
2. Planas-Cuchi, E., J.A. Vilchez, and J. Casal, *Fire and explosion hazards during filling/emptying of tanks*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999. **12**(6): p. 479-483.
3. Lees, F.P., *Loss Prevention in the Process Industries*. 2 ed. Vol. 1. 2001: Oxford: Butterworth-Heinemann.
4. Vidal, M., et al., *A review of estimation methods for flash points and flammability limits*. Process Safety Progress, 2004. **23**(1): p. 47-55.
5. Kondo, S., et al., *Extended Le Chatelier's formula and nitrogen dilution effect on the flammability limits*. Fire Safety Journal, 2006. **41**(5): p. 406-417.
6. Kondo, S., et al., *Extended Le Chatelier's formula for carbon dioxide dilution effect on flammability limits*. J Hazard Mater, 2006. **138**(1): p. 1-8.
7. Le Chatelier, H., *Estimation of firedamp by flammability limits*. Ann. mines, 1891. **19**(8): p. 388-395.
8. E681-09, A. *Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapors and Gases)*. 2009. American Society for Testing and Materials West Conshohocken, PA.
9. E918-83, A. *Standard Practice for Determining Limits of Flammability of Chemicals at Elevated Temperature and Pressure*. 2011. American Society for Testing and Materials West Conshohocken, PA.
10. E2079-07, A. *Standard Test Methods for Limiting Oxygen (Oxidant) Concentration in Gases and Vapors*. 2013. American Society for Testing and Materials West Conshohocken, PA.
11. Kondo, S., et al., *Flammability limits of isobutane and its mixtures with various gases*. J Hazard Mater, 2007. **148**(3): p. 640-7.
12. Shebeko, Y.N., et al., *An analytical evaluation of flammability limits of gaseous mixtures of combustible-oxidizer-diluent*. Fire safety journal, 2002. **37**(6): p. 549-568.
13. Mashuga, C.V. and D.A. Crowl, *Derivation of Le Chatelier's mixing rule for flammable limits*. Process safety progress, 2000. **19**(2): p. 112-117.
14. Melhem, G., *A detailed method for estimating mixture flammability limits using chemical equilibrium*. Process Safety Progress, 1997. **16**(4): p. 203-218.

# 火災時人員疏散時間經驗公式之評估

## Evaluation of the empirical models for evacuation time in the event of fire

陳宇翔<sup>1</sup>、呂牧蓁<sup>2\*</sup>

Yu-Hsiang Chen, Mu-Chen Lu

弘光科技大學職業安全與防災研究所

Institute of Occupational Safety and Hazard Prevention, Hungkuang University,

Taiching, Taiwan

弘光科技大學環境與安全衛生工程系

Department of Safety, Health and Environmental Engineering, Hungkuang University,

Taiching, Taiwan

### 摘要

火災時，疏散時間的長短是決定人員是否能存活的重要關鍵，因此正確預估建築物的疏散時間變得非常重要。近年來有關於模擬人員運動之軟體發展迅速，模擬能力與正確性均大幅改善，並且經過嚴格驗證。然而早期緊急應變演練的疏散軟體並不盛行，因此需藉由疏散演練等方式來研究人員疏散所得到的數據來推導出不同的疏散時間經驗公式，但是這些公式的正確性或使用限制卻少有文獻探討。因此本研究採用美國國家標準局（National Institute of Standards and Technology）所研發出來的軟體--FDS+Evac 探討 SFPE 消防工程手冊中所列之 Melinek and Booth、Togawa 及 Pauls 等人所提出之三種理論公式的有效性。模擬案例為一座兩層樓及一座八層樓建築物，結果發現在高層建築物中，Togawa 理論式適用於低人口密度，Pauls 非線性理論室則適用於高人口密度，而 Melinek and Booth 則呈現一致性之偏差。

**關鍵字：**疏散、FDS+Evac、理論公式

### Abstract

In the event of fire, the length of time spent trying to escape is a significant determinant of survival. Therefore, it is important to correctly predict the required evacuation time for a building. Recently, simulation softwares of the movement of people have been thriving. These softwares have been improved significantly in capacity and validation under rigorous tests. However, evacuation softwares used in

---

<sup>1</sup>弘光科技大學職業安全與防災研究所，畢業生

<sup>2\*</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程系，助理教授

E-mail: muchen@sunrise.hk.edu.tw

emergency drilling had not been popular in early. Therefore, researchers usually conduct many drills to study evacuation.

Therefore, one of the supreme model—FDS+Evac, developed in the NIST, is used in our study to validate Melinek and Booth's, Togawa's, and Pauls' empirical models, which proposed in the SFPE handbook for fire protection engineering.

In our study, the simulated cases consist of a two-floor building and an eight-floor building. The results show that in the high rise building, Togawa's theoretic model predicts well for evacuation correct in low population density case, while Pauls' nonlinear theoretic model works better in the high population density case. Melinek and Booth's model shows similar results in either case.

Keywords: Evacuation, FDS+Evac, Theoretic formula

## 一、前言

火災時，疏散時間的長短是決定人員是否能存活的重要關鍵，因此正確預估建築物的疏散時間變得非常重要。由於早期科技發展之限制，因此對於研究人員疏散方面，各國學者皆是藉由多次觀察、演練以及問卷調查等方式，再從人員避難過程中所呈現出的行為反應，進而推導出多種不同的理論公式如與建築物出口、走廊通過流量及樓梯間流量等。而到至今為止這些理論公式仍然應用在建築設計上面。其中常使用到的理論公式為 SFPE 消防工程手冊所列之 Togawa、Melinek and Booth 及 Pauls 這三套公式。

在這當中 Togawa 主要針對人員從最遠的距離至最近的門口所計算出值作為總避難時間[1, 2]；Melinek 和 Booth 之理論公式則類似於 Togawa 之理論公式，主要不同的地方是此公式重點在高層建築物總疏散時間計算，但使用時需要符合兩項條件，分別為所有人員進入樓層到出口的流率時間超過在低人口建築物兩層樓之間所需的行進時間，以及較高樓層人員之建築物，人員從單一樓層進入流率時間超過樓層之間的行進時間[1, 2]；Pauls 則是以實證方式詳細記錄疏散人員當時情況以及數據，找尋出之間關聯性並且推導出來，之後從這當中提出一項人流之有效寬度觀念，這是指線性函數中扣掉每一側牆壁邊界（150mm 或 6in）或是每一邊扶手邊界（90mm 或 3.5in）。另外有效寬度模式會將人員左右晃動現象列入考慮，尤其是當人群緩慢行進下，不像傳統單位寬度模式是將人員以靜態方式呈現出來[1, 2, 3]。

由以上得知早期的理論公式有基本觀念，但是這些理論公式卻沒有詳加整理，也因為早期疏散軟體開發速度較為緩慢，因此沒有辦法與疏散軟體進行相關驗證，造成後人在使用疏散軟體驗證理論公式時卻無法找尋到最適當的公式，因此藉由 FDS+Evac 軟體整理，來探討各種理論模型之有效性。其研究目標為：FDS+Evac 軟體模擬不同樓層時，不同的出口寬度、樓層寬度及樓層等來探討三位學者提出

理論公式之有效性。

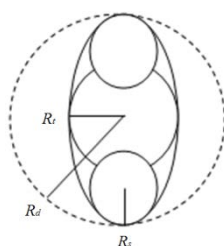
## 二、方法

### 2.1 軟體介紹

本研究採用美國國家標準局（National Institute of Standards and Technology）所研發之 FDS 軟體，此軟體發展至 5.0 版後，以加入 FDS+Evac 模組之社會力模式，因此可以單獨模擬火災情境，也能單一模擬人員避難逃生，特別之處就是人員能以獨立個體分別呈現，而且都能以自己的策略進行避難。因此在模擬疏散過程中可能會發生推擠、排隊甚至回堵等現象。人員身體呈現方式，此軟體是將人員簡化成如圖一之幾何形狀，並且有五種不同類型的成員，分別為成人、男性、女性、小孩及老人。每位成員類型皆各自擁有特定步行速度與身體尺寸，如表一[4]。人員之運動模式則是採用德國物理學家 Helbing 等人所發展出之社會力模式為起點，再藉由 Langston 等人所介紹之運動模式加以實現。每個人的運動由式 1 決定[5, 6, 7]：

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \zeta_i(t) \quad (1)$$

$x_i(t)$  為人員  $i$  在時間  $t$  的位置， $f_i(t)$  是環境對人施加的力量； $m_i$  是質量； $\zeta_i(t)$  指的是一個微小的擾動力。



圖一、建立人員尺寸之幾何形狀

表一 五種不同人員類型之步行速度與身體尺寸

| 人員類型 | 步行速度(m/s) | 身體尺寸(m)     |
|------|-----------|-------------|
| 成人   | 1.25±0.30 | 0.255±0.035 |
| 男性   | 1.35±0.30 | 0.270±0.020 |
| 女性   | 1.15±0.20 | 0.240±0.020 |
| 小孩   | 0.90±0.30 | 0.210±0.015 |
| 老人   | 0.80±0.30 | 0.250±0.020 |

### 2.2 理論公式

#### 2.2.1 Togawa 理論公式

在理論公式中，以日本學者Togawa所提出的避難時間公式較為廣泛使用[1, 2, 8]，若將人員從最遠門口之最短距離以 $k_s$ 表示，步行速度以 $v$ 表示，假如人員到達最遠門口時，此時後面人員流動情形也是連續性，其簡化公式如式（2）表示。

而此簡化公式適用於L形結構[9]：

$$T = \frac{N_a}{B' N'} + \frac{k_s}{v} \quad (2)$$

$T$  = 時間； $N_a$  = 逃生人員全部的數量； $B'$  = 第二個門口的寬度 (m)； $N'$  = 從第二個門口流出人員的數量 (persons/m · s)； $k_s$  = 逃生人員的前端至最遠門口的距離 (m)； $v$  = 人群走路的速度。

使用簡化公式計算時，主要分成兩個部分，第一部分為「瓶頸控制階段」，主要是將室內所有人員同時在出口處聚集，在同一個時間下往出口方向進行避難；第二部分為「距離控制階段」，主要是以人員從室內離出口可能的最遠距離，以數個 L 形的路徑來計算，之後再將瓶頸控制階段與距離控制階段兩者相加起來，以求出人員所需的總避難時間。

### 2.2.2 Melinek and Booth 理論公式

Melinek 和 Booth 理論公式與 Togawa 很類似，其差異性在於 Melinek 和 Booth 所提出最少總疏散時間之理論公式適用於高層建築物。因此計算時，首先假設所有人員最初在出口的樓梯處等待並且人員離開地面層時並不會減少上面樓層的流率[1, 2, 8]。假設：

$r$  層以上的人員應為：

$$= \sum_{i=r}^n Q_i \quad (3)$$

從  $r$  層進入樓梯進行下樓之人員最小時間：

$$= (\sum_{i=r}^n Q_i) / (N'' b_{r-1}) \quad (4)$$

最後人群到達地面層的最後時間：

$$= r t_s$$

(5)

然而從公式 (4) 及 (5) 可以結合出：

$$T_r = (\sum_{i=r}^n Q_i) / (N'' b_{r-1}) + r t_s \quad (6)$$

其中：

$Q_i$  = 第  $r$  層樓的人數

$b_r$  =  $r$  層樓和第  $r-1$  樓層之間的樓梯寬度

$N''$  = 下樓梯時每個單位寬度的人員流動速率

$t_s$  = 沿一個情況人群不受阻礙的成員向下的時間，通常約 16 秒

$T_r$ =從第 $r$ 層以上人員逃生時的最小時間。

從公式 (6) 中  $T_r$  得到  $n$  值 ( $r = 1$  to  $n$ )。然而最小避難時間  $T_e$ ，指的是整個建築物人員避難時間等於  $T_r$  的最大值。

### 2.2.3 Pauls 理論公式

Pauls 理論公式與前述 Togawa、Melink 和 Booth 理論公式不太相同，其原因 Pauls 是藉由觀察許多人員在高層建築物的避難演練，之後記錄每一次演練情況，並且藉由這些紀錄推導出有效寬度的觀念，而有效寬度中有另一個發現，即是平均疏散流量（每公尺的有效樓梯寬度）與疏散人口（每公尺的有效樓梯寬度）並以非線性方式變化[1, 2, 8]。此公式如下：

$$f = 0.206p^{0.27} \quad (7)$$

在這裡：

$f$ =每公尺有效寬度樓梯所能通過人員流量。

$p$ =每公尺有效寬度樓梯要疏散的人數。

在預測疏散時間上，式 (7) 只處理流率時間。有一個簡單方式預測需要建立一半流率之啟動時間。此經驗導出啟動時間，當增加流率時間時，是根據經驗確定平均流率，當 41 秒時 (0.68 分鐘) 會產生行進時間，而 41 秒的範圍是足夠取決於建築物居住者的經驗和疏散的方式。若在實際火災或其他緊急情況下時，則需要更長的時間進行疏散。

從 (7) 中啟動時間為 41 秒，並且推導出兩個預測公式，在預測方程式適用情況下，在這裡有效樓梯寬度以不超過 800person/m。

其中：

非線性公式：

$$T = 0.68 + 0.081p^{0.73} \quad (8)$$

線性公式：

$$T = 2.00 + 0.0117p \quad (9)$$

在這當中：

$T$ =最少時間，單位分鐘，完成由樓梯不受控制總疏散

$p$ =每公尺有效樓梯寬度的實際疏散人口，測量正上方水平流量出口

若當有效樓梯寬度超過 800person/m 時，此時則需使用下列方程式：

$$T = 0.70 + 0.133p \quad (10)$$

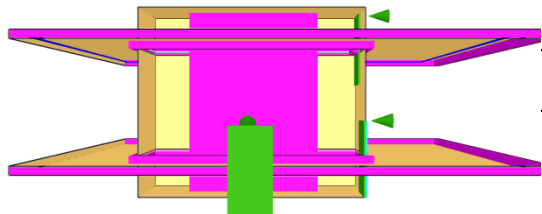
### 2.3 模擬案例

本研究是以一棟兩層樓場所作為模擬空間，假設發生地震，人員開始進行疏散，其避難的方向為最熟悉的出口，因此模擬空間僅設定一個樓梯進出口及逃生出入口，一、二樓面積大小皆為 12 m×12 m 之單一空間作為模擬現象。而且房間內不擺飾任何物品。藉由最空曠的條件下分別安置 100 人及 200 人，以這兩個基礎條件下帶入三位學者所提出之理論公式取得理論值，並與 FDS+Evac 軟體所計算出之模擬值進行探討，詳細模擬條件與情境參考表二、表三。

表二 模擬條件之基本設定

|                                |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| 房間：一、二樓各 12 m x 12 m           | 網格：一、二樓層各 3,600 個 |
| 人員尺寸：<br>0.44~0.58 m (肩寬)，均勻分布 | 人員是否熟悉出口位置：熟悉     |
| 人員速度：<br>0.95~1.55 m/s，均勻分布    | 人員類型：成人           |
| 出口及樓梯數量：各 1 個                  | 模擬次數：五次，並取平均值     |
| 模擬情境：地震                        |                   |

表三 單出口之案例規劃

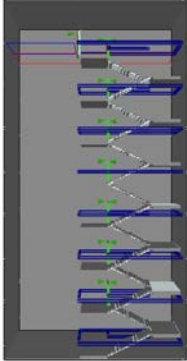
| 人<br>數          | 出口<br>位置 | 圖示                                                                                  | 樓梯寬度<br>(公尺) | 出口寬度<br>(公尺) |
|-----------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| 100<br>/<br>200 | 中間       |  | 0.8          | 1            |
|                 |          |                                                                                     | 1            | 1.2          |
|                 |          |                                                                                     | 1.2          | 1.6          |
|                 |          |                                                                                     |              | 2            |

為了確認 Melinek and Booth 以及 Pauls 是否適用高層建築物，因此另外假設一案例來進行誤差分析比較，並且將 Togawa 一同加入比較。此模擬空間為一棟八層樓之建築物，模擬樓層為 3 樓至 8 樓，每次模擬以單一樓層人員進行疏散為基準，並僅設立一座樓梯及逃生出入口，假設情境為地震且每層樓空間不擺飾任何物品，人員避難方向為最熟悉的出口，在最空曠條件下，在單一樓層中分別安置 50 人、100 人、150 人及 200 人進行不同樓層人員疏散時間之探討，詳細模擬條件與情境參考表四、表五。

表四 模擬條件之基本設定

|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 房間：<br>各樓層各 14.6m x 10 m，共 8 樓層 | 人員尺寸：<br>0.44~0.58 m (肩寬)，均勻分布 |
| 網格：每樓層各 4,300 個                 | 人員速度：<br>0.95~1.55 m/s，均勻分布    |
| 人員是否熟悉出口位置：熟悉                   | 人員類型：成人                        |
| 出口及樓梯數量：各 1 個                   | 模擬方式：<br>只限一個樓層進行人員避難          |
| 模擬情境：地震                         |                                |

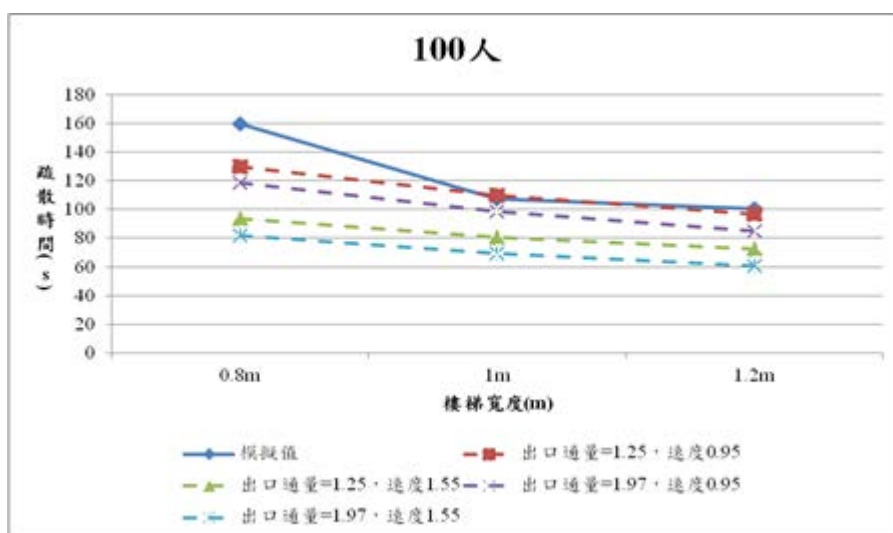
表五 高層建築物之案例規劃

| 人數                         | 出口位置 | 圖示                                                                                 | 樓梯寬度<br>(公尺) | 出口寬度<br>(公尺) |
|----------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| 50<br>/100<br>/150<br>/200 | 右側   |  | 2.3          | 2            |

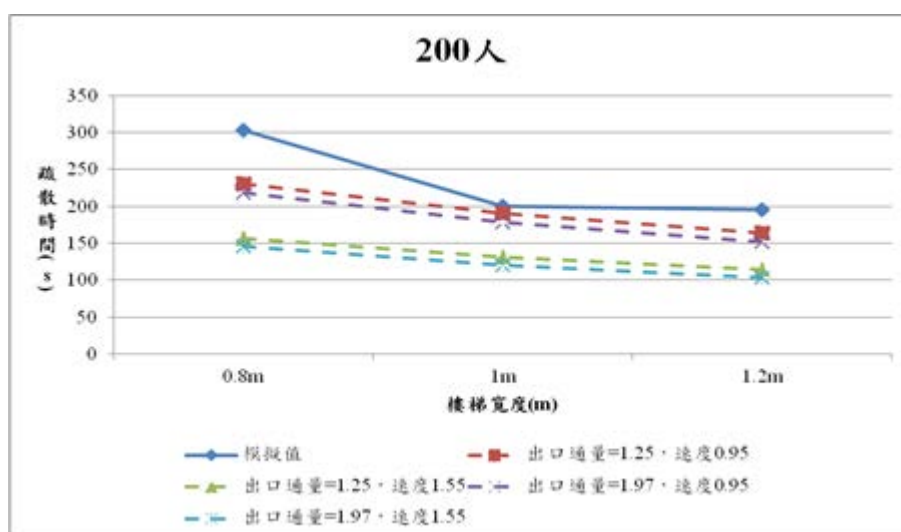
### 三、結果與討論

#### 3.1 Togawa 理論公式之有效性

由於 Togawa 理論公式之相關文獻對於樓梯計算的方式並沒有說明，故人員若能疏散至進入樓梯入口即是疏散完畢。由圖二 (A) (B) 結果顯示，當出口通量值為 1.25p/m/s 或是 1.97p/m/s，代入理論公式所計算出的值都低於模擬值，當速度越快時，模擬值與理論公式值之間差距則越明顯。另外樓梯寬度為 0.8 公尺時，其模擬值與理論值誤差較大，其原因可能是在設定模擬參數時，樓梯寬度為固定值，但是人員肩寬與速度是取隨機方式，因此造成誤差值較大。而人員速度確實會影響理論公式與模擬值之誤差，隨著速度越快，誤差越大。結果得知，當樓梯寬度為 1 公尺並且人員速度趨近於 1m/s 且通量為 1.25p/m/s 時，模擬值與理論估算值最為接近。因此 Togawa 之理論公式可能適用於 1 公尺寬度左右之出口。



(A) 100 人之疏散時間



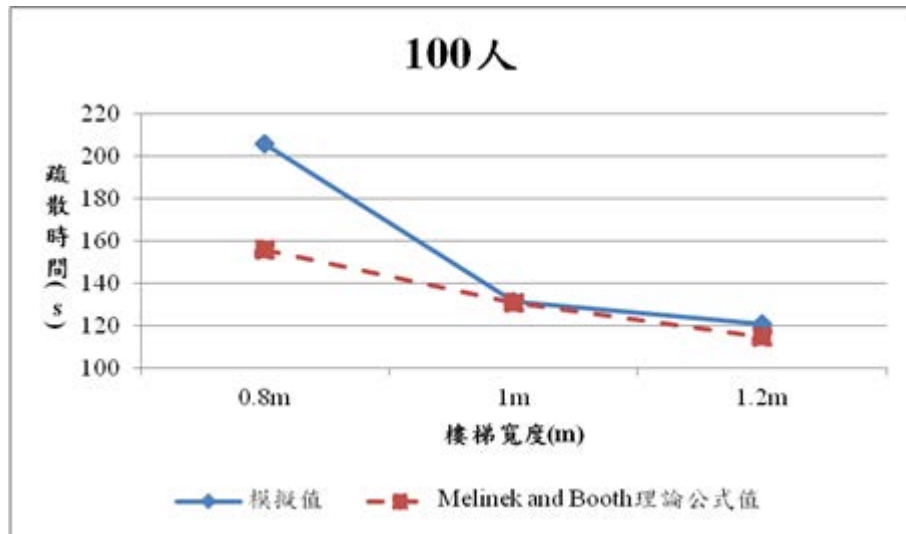
(B) 200 人之疏散時間

圖二、(A) (B) 模擬值與 Togawa 理論值之比較

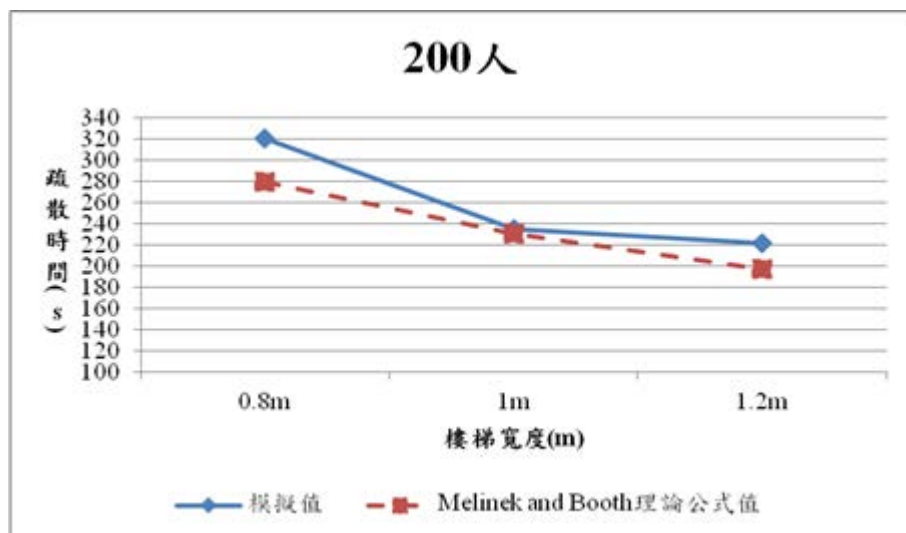
### 3.2 Melinek and Booth 理論公式之有效性

圖三 (A) (B) 結果顯示，當人數為 100 人或 200 人，理論估計值都低於模擬值，隨著樓梯寬度越小時，理論值與模擬值之間差距就更明顯。其原因可能是人員肩寬之問題，當人員肩寬越大，樓梯寬度越小的條件下，人員能夠同時進入樓梯的數量就隨之減少，因此增加模擬值高估的時間，而理論值在計算上則未考慮人員肩寬之問題，人員可能皆假設為單一尺寸，因此誤差才會較為明顯。但是當樓梯寬度為一公尺時，模擬值與理論值之間是最為接近，而這部分相似於上一小節所計算之其中一個理論值。這同時驗證文獻所提出 Melinek 和 Booth 與 Togawa 兩位學者之方法是很相似的。另外可以看到，理論公式得出之理論值皆是以線性方式下降，但模擬值卻不是以線性方式降低，這顯示出樓梯（或出口）

寬度與人員尺寸對於模擬值是有密切關係。



(A) 100 人之疏散時間



(B) 200 人之疏散時間

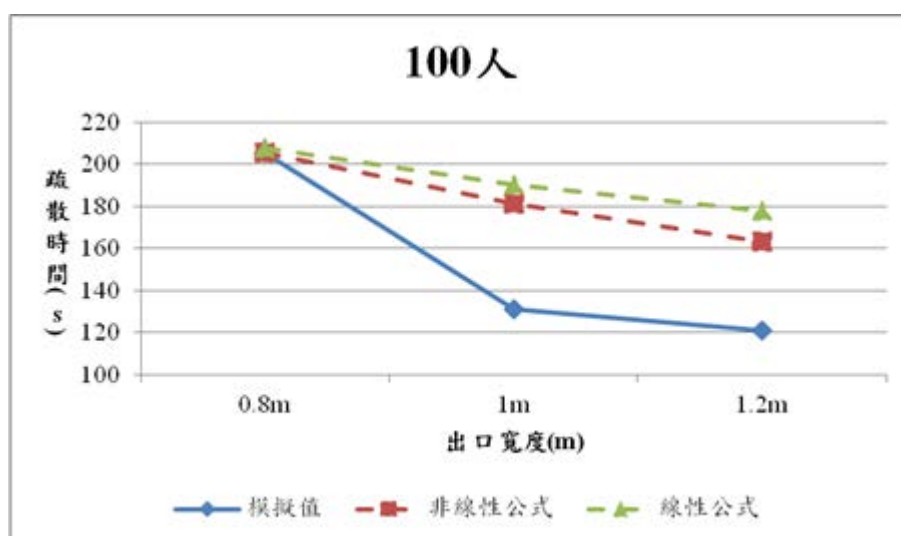
圖三、(A) (B) 模擬值與 Melinek 和 Booth 理論值之比較

### 3.3 Puals 理論公式之有效性

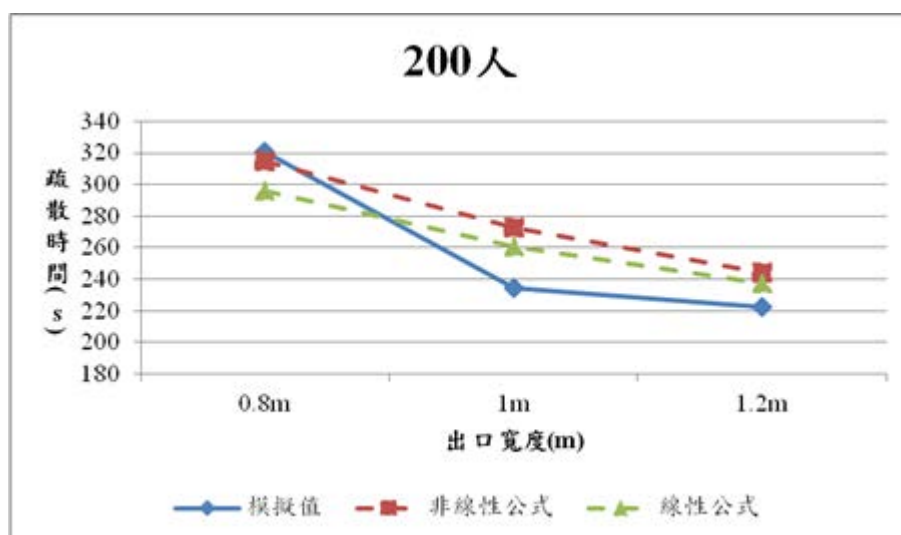
由圖四 (A) (B) 結果顯示，從理論公式中，無論是線性公式或是非線性公式，人員疏散時間皆是隨著樓梯寬度的增加而逐漸降低。當樓梯寬度最小、人數為 100 人時，模擬值與理論值最為接近，可是當樓梯寬度增加至 1 公尺時，卻發現模擬值與理論值之間差距盛大，原因則可能與人員肩寬有關，當樓梯寬度為 0.8 公尺時，對於模擬值的疏散人員卻只能一次通過一位，可是當寬度增加至 1 公尺時，一次卻能使人員通過一至兩位，但是理論公式卻沒有考慮過人員肩寬之問題，另一個因素則是理論公式是以「演習」的方式推導出來，人員可能保持著

平常心的心態行走，因此才會與模擬值有較大之差距；但是當人數為 200 人時，模擬值與理論值卻較為接近，原因可能是人員數量增加，樓梯寬度較小，使得人員開始避難時，一時之間樓梯口無法以最快速度將人員疏散，使得擁擠現象更為嚴重，疏散時間也跟著增長，但理論公式可能沒考慮到人員擁擠現象，人員在疏散過程中可能皆是以流暢方式行走，另外理論公式上也沒有提出人員尺寸的問題，因此理論估算值並沒有像模擬值下降的變化這麼大。

另外可以發現到，圖四（A）及圖四（B）非線性公式與線性公式所呈現的曲線是不太相同，當人數較少時，線性公式的值高估於非線性公式；但是當人數增加時，則是非線性公式的值高估於線性公式。



（A）100 人之疏散時間



（B）200 人之疏散時間

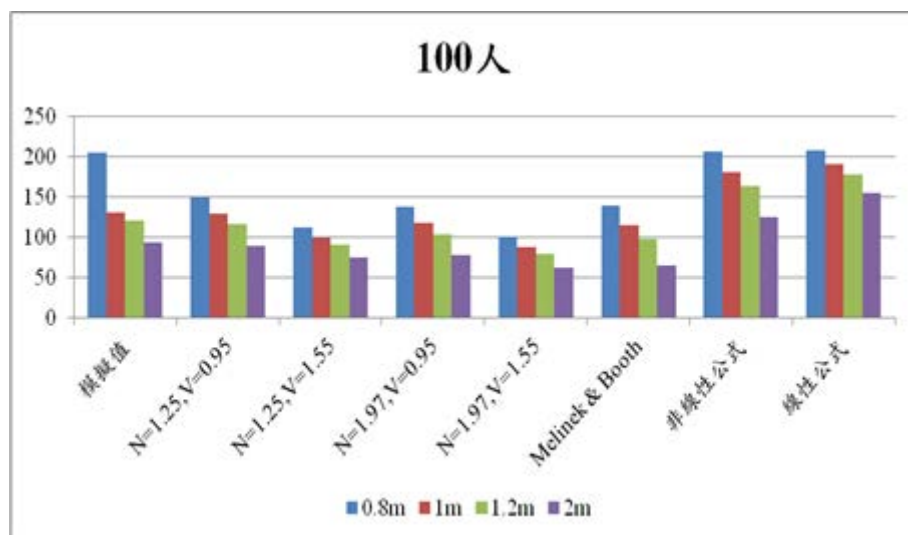
圖四、（A）（B）模擬值與 Puals 理論值之比較

### 3.4 模擬值與理論公式之有效性比較分析

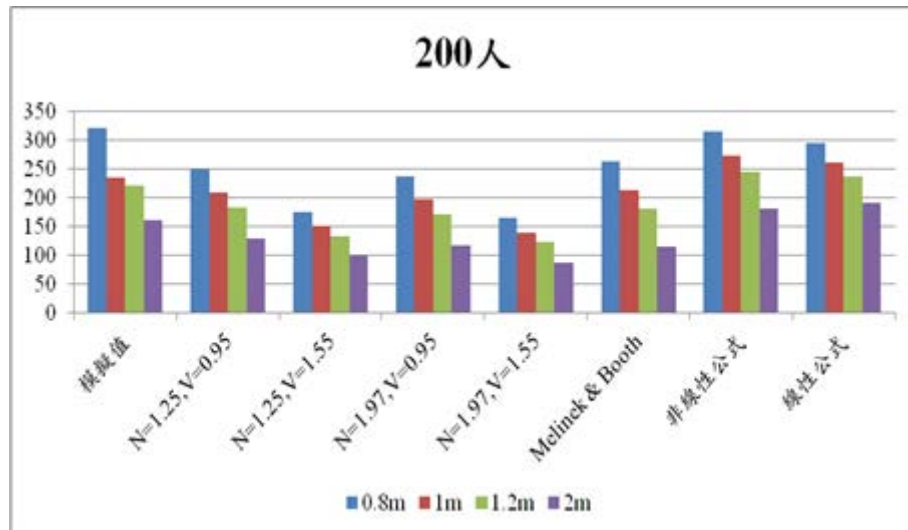
為了分類出各種理論公式之適用性與優劣性並且和模擬值進行綜合比較。但只有 Melinek and Booth 以及 Pauls 之理論公式提出與樓梯相關的計算參數。然而 Togawa 理論公式並沒說明人員下樓梯時所需要的時間，因此本研究使用距離除以人員速度等於時間之觀念來估算人員下樓梯所需的疏散時間，而此疏散時間指的是疏散流暢下。本研究設置為 1 個平台及 2 段樓梯，經過計算後得出樓梯整體長度為 14.08 公尺，假設人員下樓梯速度為 0.75m/s，經計算得出所需時間為 18.77 秒，相加即能取得理論值，這樣就能與 Melinek and Booth 及 Pauls 進行比較分析，如圖五、圖六所示。

經圖五、圖六顯示，在 2 樓時，當為 100 人或 200 人情況下，模擬值及理論值疏散時間皆是隨樓梯寬度的增加而逐漸降低，當樓梯寬度為 0.8 公尺時，模擬值與 Pauls 理論值較為接近，但是當樓梯寬度增加至 1 公尺以上後，此時模擬值與 Togawa ( $1.25p/m/s$ 、 $0.95m/s$ ) 及 Melinek and Booth 之理論值較為接近。

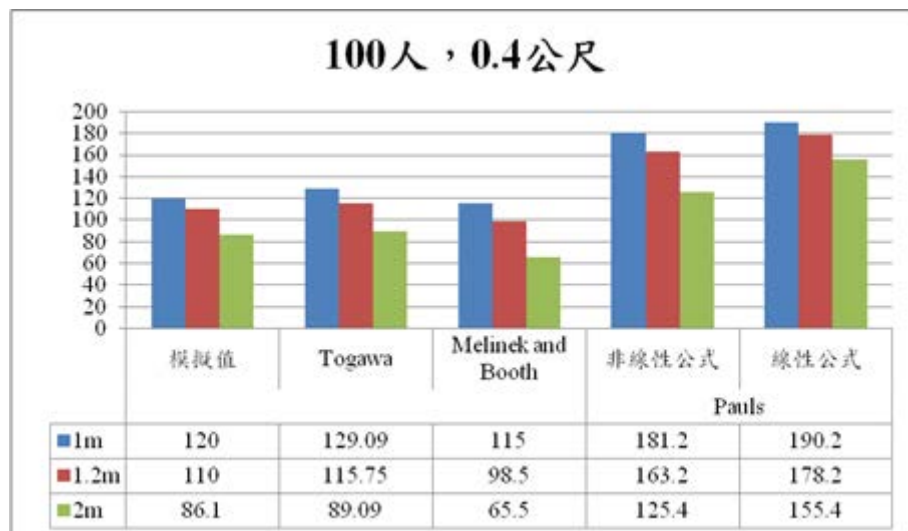
由以上模擬值與三個理論式比較後發現到（可參照圖七至圖十），當每位人員肩寬皆為 0.4 公尺且樓梯寬度較小時，模擬結果與 Togawa、Melinek and Booth 理論式較為接近，而 Pauls 理論式之線性公式及非線性公式，其值皆與模擬值有明顯差距；反之當每位人員肩寬變更為 0.6 公尺時且人員數量較多時，模擬值與 Togawa、Melinek and Booth 理論式之間就有明顯差距，而 Pauls 理論式之線性公式及非線性公式的預測值與模擬值就較為接近。因此人員肩寬的參數設定對於疏散有一定的影響。



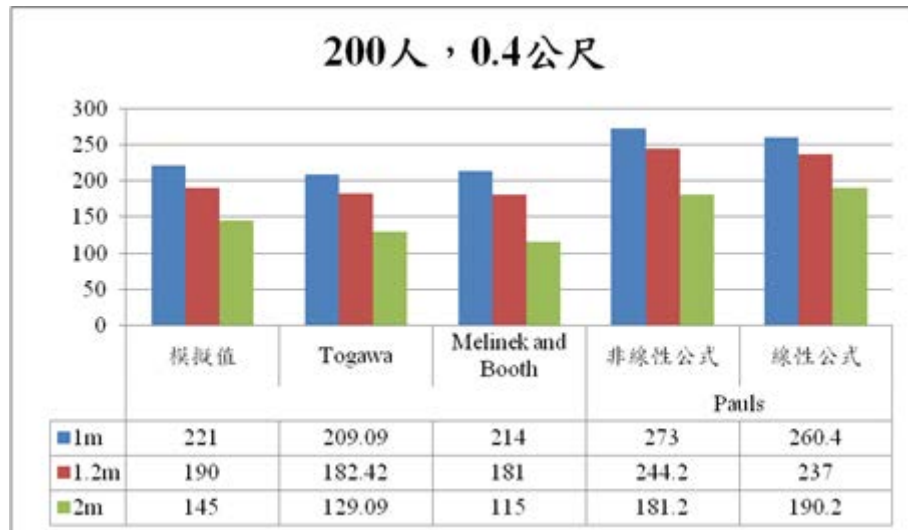
圖五、100 人情況下模擬值與各理論值之比較



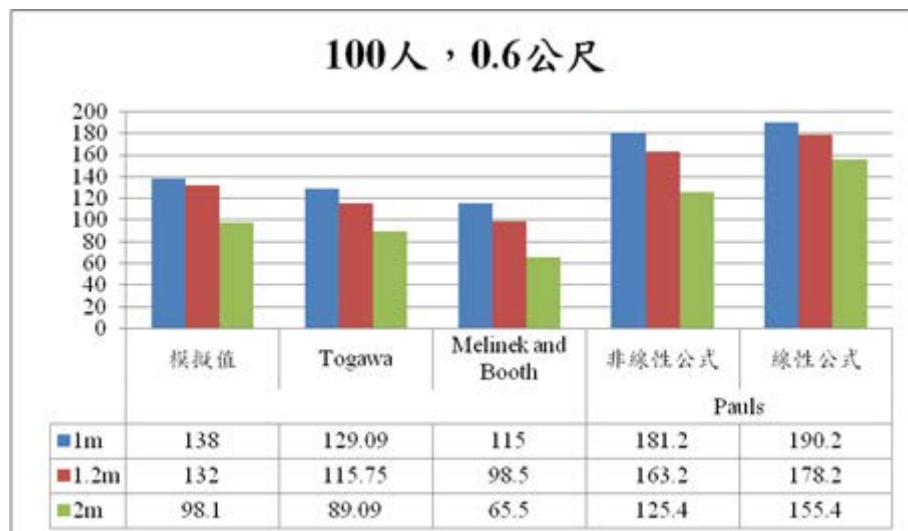
圖六、200 人情況下模擬值與各理論值之比較



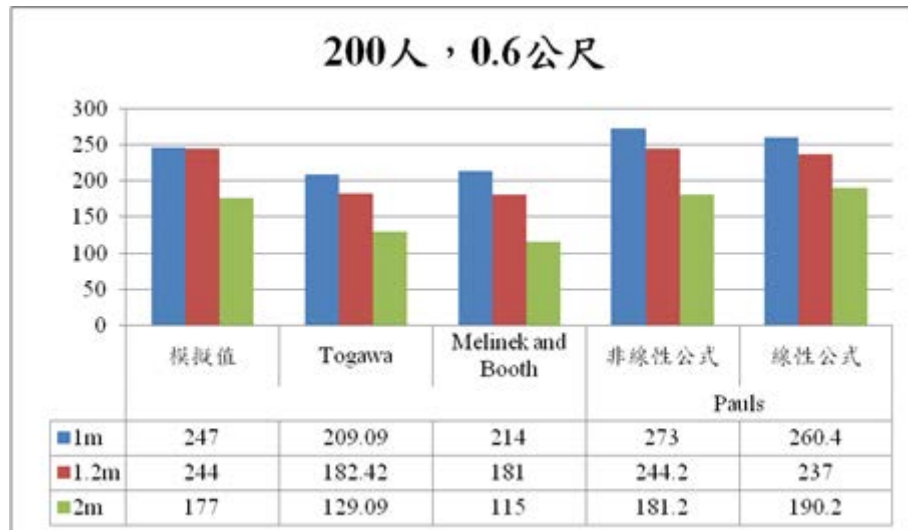
圖七、模擬值與理論值比較（100 人，肩寬 0.4m）



圖八、模擬值與理論值比較（200 人，肩寬 0.4m）



圖九、模擬值與理論值比較（100 人，肩寬 0.6m）

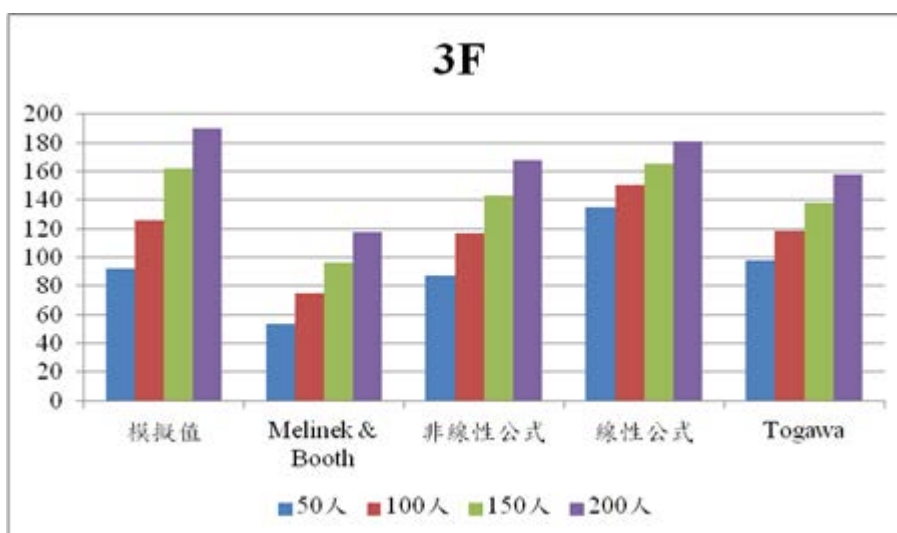


圖十、模擬值與理論值比較（200 人，肩寬 0.6m）

### 3.5 高層建築物之比較分析

經模擬結果顯示（可參照圖十一至圖十六及表六至表十一），發現到不管人員在哪樓層進行疏散，Melinek and Booth 理論式與模擬值之間的誤差皆維持在約 40% 左右。Pauls 理論式非線性公式與線性公式隨著樓層增加，與模擬值之間的誤差也隨著增加，但是當樓層越高且人員密度越高時，其非線性公式計算出來誤差值也逐漸降低；反之與線性公式計算出來誤差值卻是逐漸增加，從這當中可以看出非線性公式優於線性公式。而 Togawa 理論式不管人員在哪一樓層進行疏散，皆能看出隨著人員的增加，理論值與模擬值之間的誤差就逐漸增加，但是當人員低密度時，其誤差卻是比 Melinek and Booth 以及 Pauls 的理論值低，其原因可能是因為人員數量較少，在行進疏散過程中較為流暢，而本研究 Togawa 下樓梯時間計算也是以流暢之情況進行，因此才會與模擬值之間的誤差較小，同時也證實人口密度高低皆有一定的正確性，當高密度時選擇 Pauls 的非線性理論式，低密度選擇 Togawa 理論式。

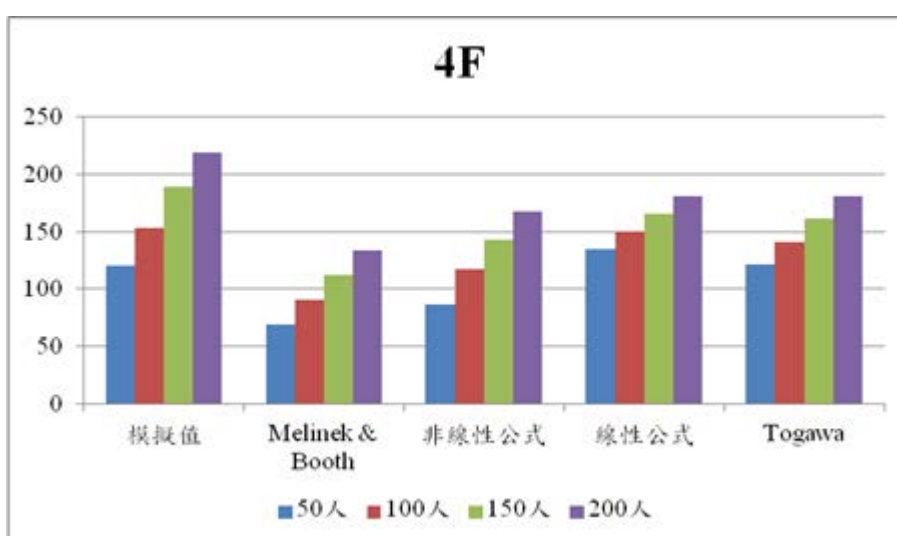
另外也可以發現到，Pauls 非線性公式在中間樓層時（5 樓及 6 樓），計算出來之誤差值與 Melinek and Booth 的誤差值較為接近，因此 Pauls 非線性公式適用於高層建築物計算。



圖十一、人員從 3 樓疏散時模擬值與各理論值之比較

表六 人員從 3 樓疏散時各理論值與模擬值之間誤差

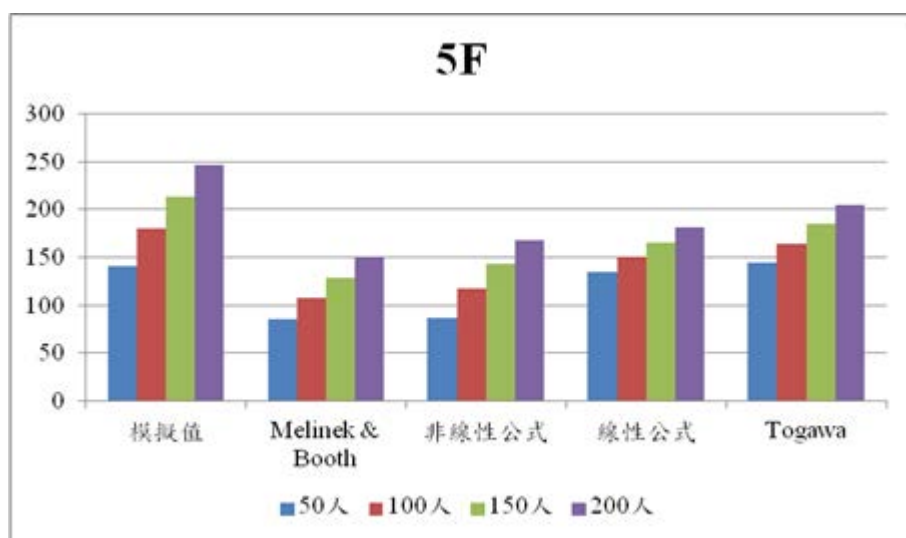
| 公式    | (模擬值-理論值)/模擬值<br>誤差值(%) |       |      |        |
|-------|-------------------------|-------|------|--------|
|       | Melinek & Booth         | Pauls |      | Togawa |
|       |                         | 非線性公式 | 線性公式 |        |
| 50 人  | 42%                     | 6%    | -47% | -7%    |
| 100 人 | 40%                     | 7%    | -20% | 7%     |
| 150 人 | 40%                     | 11%   | -2%  | 15%    |
| 200 人 | 38%                     | 12%   | 5%   | 17%    |



圖十二、人員從 4 樓疏散時模擬值與各理論值之比較

表七 人員從 4 樓疏散時各理論值與模擬值之間誤差

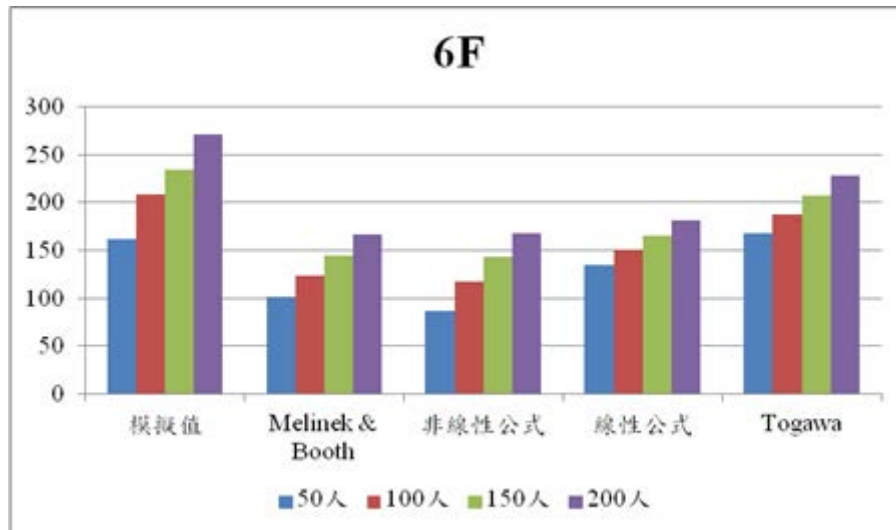
| 公式    | (模擬值-理論值)/模擬值   |       |      |        |
|-------|-----------------|-------|------|--------|
|       | 誤差值(%)          |       |      |        |
|       | Melinek & Booth | Pauls |      | Togawa |
|       |                 | 非線性公式 | 線性公式 |        |
| 50 人  | 42%             | 28%   | -11% | -2%    |
| 100 人 | 41%             | 24%   | 2%   | 8%     |
| 150 人 | 40%             | 24%   | 12%  | 15%    |
| 200 人 | 39%             | 24%   | 17%  | 17%    |



圖十三、人員從 5 樓疏散時模擬值與各理論值之比較

表八 人員從 5 樓疏散時各理論值與模擬值之間誤差

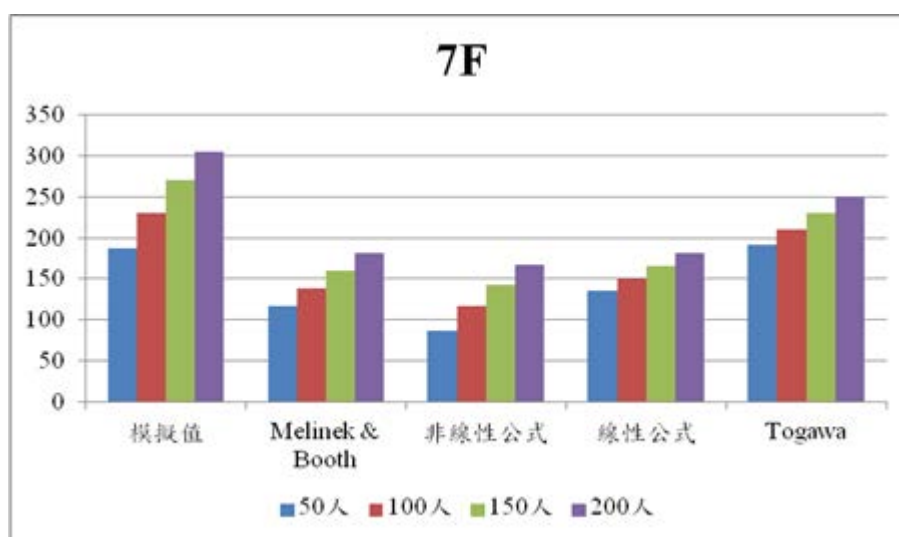
| 公式    | (模擬值-理論值)/模擬值   |       |      |        |
|-------|-----------------|-------|------|--------|
|       | 誤差值(%)          |       |      |        |
|       | Melinek & Booth | Pauls |      | Togawa |
|       |                 | 非線性公式 | 線性公式 |        |
| 50 人  | 39%             | 38%   | 4%   | -3%    |
| 100 人 | 41%             | 35%   | 16%  | 9%     |
| 150 人 | 40%             | 33%   | 23%  | 14%    |
| 200 人 | 39%             | 32%   | 27%  | 17%    |



圖十四、人員從 6 樓疏散時模擬值與各理論值之比較

表九 人員從 6 樓疏散時各理論值與模擬值之間誤差

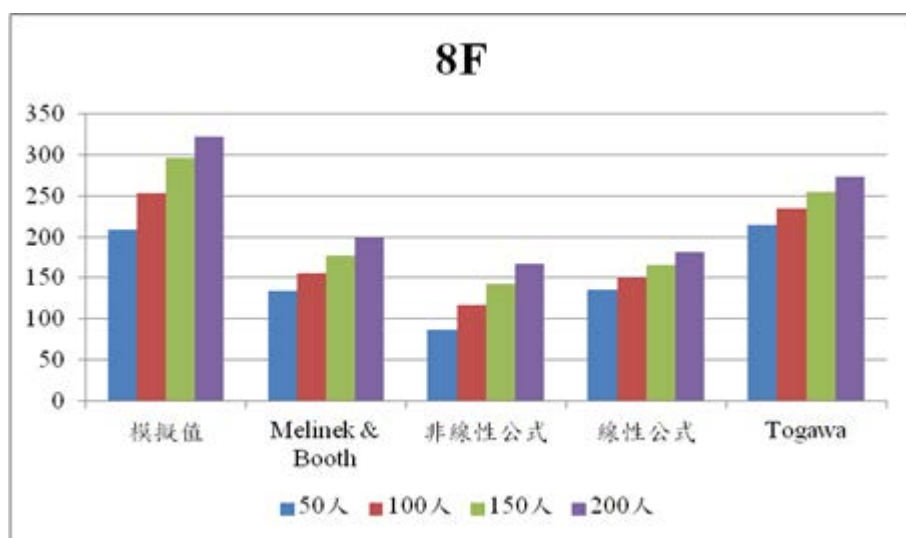
| 公式    | (模擬值-理論值)/模擬值<br>誤差值(%) |       |      |        |
|-------|-------------------------|-------|------|--------|
|       | Melinek & Booth         | Pauls |      | Togawa |
|       |                         | 非線性公式 | 線性公式 |        |
| 50 人  | 37%                     | 46%   | 17%  | -4%    |
| 100 人 | 41%                     | 44%   | 28%  | 10%    |
| 150 人 | 38%                     | 40%   | 30%  | 12%    |
| 200 人 | 40%                     | 38%   | 33%  | 16%    |



圖十五、人員從 7 樓疏散時模擬值與各理論值之比較

表十 人員從 7 樓疏散時各理論值與模擬值之間誤差

| 公式    | (模擬值-理論值)/模擬值   |       |      |        |
|-------|-----------------|-------|------|--------|
|       | 誤差值(%)          |       |      |        |
|       | Melinek & Booth | Pauls |      | Togawa |
|       |                 | 非線性公式 | 線性公式 |        |
| 50 人  | 38%             | 54%   | 28%  | -2%    |
| 100 人 | 40%             | 49%   | 35%  | 8%     |
| 150 人 | 41%             | 47%   | 39%  | 14%    |
| 200 人 | 40%             | 45%   | 41%  | 18%    |



圖十六、人員從 8 樓疏散時模擬值與各理論值之比較

表十一 人員從 8 樓疏散時各理論值與模擬值之間誤差

| 公式    | (模擬值-理論值)/模擬值   |       |      |        |
|-------|-----------------|-------|------|--------|
|       | 誤差值(%)          |       |      |        |
|       | Melinek & Booth | Pauls |      | Togawa |
|       |                 | 非線性公式 | 線性公式 |        |
| 50 人  | 36%             | 58%   | 35%  | -2%    |
| 100 人 | 39%             | 54%   | 40%  | 7%     |
| 150 人 | 40%             | 52%   | 44%  | 14%    |
| 200 人 | 39%             | 48%   | 44%  | 15%    |

#### 四、結論

本研究結論如下：

1. 由 Togawa 理論公式結果顯示，當出口通量為最大值或最小值時，其理論值皆小於模擬值，但是當樓梯寬度為 1 公尺、人員速度為 1m/s 且通量為 1.25p/m/s 時，其理論值與模擬值最為接近，因此 Togawa 理論公式可能較適於 1 公尺左右之寬度。
2. 由 Melinek 和 Booth 理論公式結果顯示，理論值皆低於模擬值，尤其樓梯寬度越小則越明顯，而在樓梯寬度為 1 公尺時，理論值與模擬值最為接近。
3. 由 Pauls 理論公式結果顯示，無論是非線性公式或是線性公式，人員疏散時間皆隨著樓梯寬度的增加而逐漸降低，另外也發現當人數較少時，線性公式則高估於非線性公式；反之，當人數較多時則是非線性公式高估於線性公式。
4. 從三個理論公式與模擬值探討後發現到，這之間最大差異在於人員尺寸的參數設定，當人員肩寬皆為 0.4 公尺時，Togawa、Melinek and Booth 理論值與模擬值相近；但是當人員肩寬皆為 0.6 公尺時，則是 Pauls 的非線性公式與線性公式理論值與模擬值相近。
5. 從高層建築物看人員疏散時間分析並整理後，歸納出一些建議：
  - A. 當人口密度低時，Togawa 理論式較適合使用
  - B. 當人口密度高時，則 Pauls 非線性理論式較適合使用。
  - C. 不管人員密度高低以及在哪一樓層進行疏散，Melinek and Booth 理論式與模擬值之間誤差皆維持一致性，因此若要初步估計高層建築物對於人員疏散時間及效率時，此公式較適合使用。

#### 五、參考文獻

1. J. Pauls, *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 3-269-3-273, 2002.
2. 沈子勝，*避難設計與專題*，鼎茂圖書，臺北，pp. 106-117，1996。
3. J. Pauls, Effective-Width Model for Evacuation Flow in Buildings *Proceedings of the Engineering Applications Work-shop, Society of Fire Protection Engineers*, 1980.
4. 黃尊澤、李訓谷、樊國恕，火災避難逃生軟體 FDS+EVAC 應用在地下車站之適用性評估，*中華民國環境工程學會 2009 公安衛及防災研討會*，雲林，pp. 635-644，2009 年。
5. K. Timo and H. Simo, Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. *VTT Technical Reference and User's Guide*, 2010.
6. 孟宏濤，FDS+EVAC 在建築火災疏散研究中的應用，*安徽建築工業學院學報*，第 18 卷，第 2 期，pp. 21-24，2010。

7. K. Timo and H. Simo, FDS+Evac: Evacuation module for fire dynamics simulator, *Conference on Fire Science and Engineering*, pp. 3-5, 2007.
8. 方正、盧兆明，試論建築物人員疏散的量化研究，*武漢大學學報*，第 35 卷，第 2 期，pp. 71-75，2002。
9. 周愛桃、景國勛、魏平儒、段振傳，L 型房間單元人員疏散探討，*中國安全科學學報*，第 16 卷，第 8 期，pp. 28-31，2006。

# 運用 FDS 電腦模擬程式重建一個住宅火災事件

## Using computer simulation program FDS to reconstruct a residence house fire incident

許育彰<sup>1</sup>、紀人豪<sup>2</sup>、賴冠廷<sup>3</sup>

Yu-Zhang Xu, Jen-Hao Chi, Crown-Ting Rely

吳鳳科技大學消防系(所)

Department of Fire Science, Wu Feng University, Chiayi, Taiwan

### 摘要

台灣經濟雖然發展迅速，但目前在鄉鎮市中林立很多改建或增建的獨立住宅，因本身未做整體規劃設計，致使常因用電不慎、亂丟菸蒂、燃燒金紙、玩火疏失、煮飯炊事、人為縱火或其它(天災、地震、戰爭)等因素，導致經常發生震撼人心的重大火災。參酌內政部消防署最新火災資料統計，台灣在 2009 年至 2013 年建築物火災中以獨立住宅火災最多，集合住宅次之。如在 2013 年，火災發生約為 1,109 件，其中獨立住宅火災就佔有 476 件，比率高達 42.9%。因此在火災發生時，火勢發展對人員避難逃生及消防單位救援影響很大，除了火源本身所造成的傷亡外，另外一個最危險的因素就是“煙”，根據國內外發生的建築火災當中，約有 60%~80% 的人員是因為煙流的危害而死亡。有鑑於此，本研究以蒐集新竹新埔火災現場勘查資料、照片，並以美國國家標準局(National Institute of Standards and Technology, NIST)所開發的電腦模擬程式(FDS+EVAC) 進行火災現場重建模擬，以了解該住宅火災之火流分布、濃煙流動、溫度分佈及上層溫度、CO 及 CO<sub>2</sub> 濃度之變化、O<sub>2</sub> 濃度之變化、煙層高度等火災危害因子之變化情形，將分析結果與消防局火災調查科的火災調查鑑定資料相互印證，進而提出防火對策，以作為相關單位爾後改善該類住宅之參考，以期能降低住宅火災所造成的人命傷亡和財物損失。

**關鍵字：**電腦模擬程式、住宅火災、煙

### Abstract

Despite the rapid development of Taiwan's economy, but many lined residential alterations or additions in separate townships, because without making the overall planning and design, resulting in often due to electricity carelessly, throw cigarette butts, burning paper money, playing with fire, negligence, cook rice cooking, arson

---

<sup>1</sup>吳鳳科技大學消防系(所)，碩士研究生，E-mail: [g110026@yahoo.com.tw](mailto:g110026@yahoo.com.tw)

<sup>2</sup>吳鳳科技大學消防系(所)，教授，E-mail: [chi.jen-hao@wfu.edu.tw](mailto:chi.jen-hao@wfu.edu.tw)

<sup>3</sup>吳鳳科技大學消防系(所)，大專學生，E-mail: [c8805122002@gmail.com](mailto:c8805122002@gmail.com)

or other (natural disasters, earthquakes, wars) and other factors, led to a major fire occurs frequently stirring . Ministry of Interior deliberate latest fire statistics, Taiwan in 2009 to 2013 in separate residential building fire in a fire at most , a collection of residential second. As in 2013 , the fire broke out around 1,109 , which occupies a separate house fire on 476 , the ratio of up to 42.9%. So the fire, the fire developed a great escape for personnel evacuation and fire rescue units affected, in addition to injuries caused by the fire source itself , another one of the most dangerous factor is the " smoke" , according to the building fire occurred at home and abroad , about 60% to 80 % of the staff because of the smoke stream harm and death . Therefore, this study collected data Hsinchu Sinpu fire scene investigation , photos, and the U.S. National Bureau of Standards (National Institute of Standards and Technology, NIST) have developed a computer simulation program (FDS + EVAC) conducted simulated fire scene reconstruction to understand the flow of fire in the distribution of residential fires , smoke flow and temperature distribution in the upper temperature changes ,, CO , and CO<sub>2</sub> concentration , changes in the concentration of O<sub>2</sub> , smoke layer height and other factors in the case of a fire hazard changes , will analyze the results and fire Department fire Investigation fire investigation Division identified data confirm each other , and then fire prevention measures proposed to serve as a reference for the relevant units of such housing improvement thereafter , in order to reduce casualties and property losses caused by residential fires .

Keywords: Computer simulation programs FDS, Residence house fire accident, Smoke.

## 一、前言

面臨科技進步、都市人口快數成長的時代，住宅類建築物逐漸邁向高密度化、集合化，以及設備複雜化的發展。依照「消防法第十條」及「供公眾使用建築物之範圍」認定，只有在都市計畫區 6 層以上的集合住宅，才需依規定辦理審(勘)作業規範。所以目前國內中許多低層集合住宅，特別是 5 層以下之集合住宅，存在許多問題，雖然在「消防法第六條」規定，住宅類中如未設有火警自動警報設備者，應設置住宅用火災警報器，但此法規卻還在宣導改善期間，對於住宅類是沒有任何的強制力可言，以造成許多「合法但不安全」的案例，以致一旦發生火災將造成嚴重人員傷亡與財物損失。另外也歸究於住宅內部建築裝潢及消防安全設備缺乏、電器老舊或超載使用、管線老舊、設置鐵窗、巷道狹窄、違建加蓋、逃生梯堆積雜物等情形，增加住宅火災危險性等等問題存在，常是造成火災無法立即撲滅以及造成人命傷亡的主要因素，亦是造成延燒擴大的主因。因此不論是人為或自然因素，火災所造成的危害是消除的[4]，雖然在偏遠鄉鎮的老舊住宅較沒有搶救不易以及巷道狹小的問題，但是在偏遠地區的救災資源相對較少的情況下，火災的預防工作以及自主避難逃生的規劃也是有相當的重要性[5]。有鑑

於此，本文將收集新竹新埔住宅火災資料，並採用電腦模擬程式(FDS+EVAC)進行火場重建之作業。

## 二、火災情境案例說明

2013 年 1 月 15 日晚間七時左右，位於新埔鎮育賢街的一間民宅(圖一、二)發生火災，火勢疑由死者的兒子於客廳沙發附近縱火。在火災發生當下，因內部大多堆放或擺設沙發、床或鞋櫃等一些可燃性之物品，以致於火勢由屋內前客廳快速往後延燒，而在建築物內之林姓老翁為了躲避火勢，就逃至後方陽台走道，打開鐵窗高喊救命(圖三、圖四)，但最終還是不幸身亡。由此可知在火災發生當時，林姓老翁未在第一時間就察覺火災，以有效進行滅火或避難逃生，以致造成人命之傷亡。其燃燒現場相關位置圖與各處所損失程度照片圖，如圖五。

而本研究是以 2013 年 1 月 15 日發生於新竹縣新埔鎮發生住宅火災為案例，用電腦模擬程式(FDS)為工具，並依照 NFPA921 重建火災情境，以了解火災發生時，建築物內部的溫度、煙層高度等火災危害因子之變化情形。並將前述各項的模擬結果與現場勘查等相關資料，進行比對分析後，驗證電腦模擬結果的可靠度，以判斷案例火災造成人員重大傷亡的原因。



圖一、外觀圖(a)



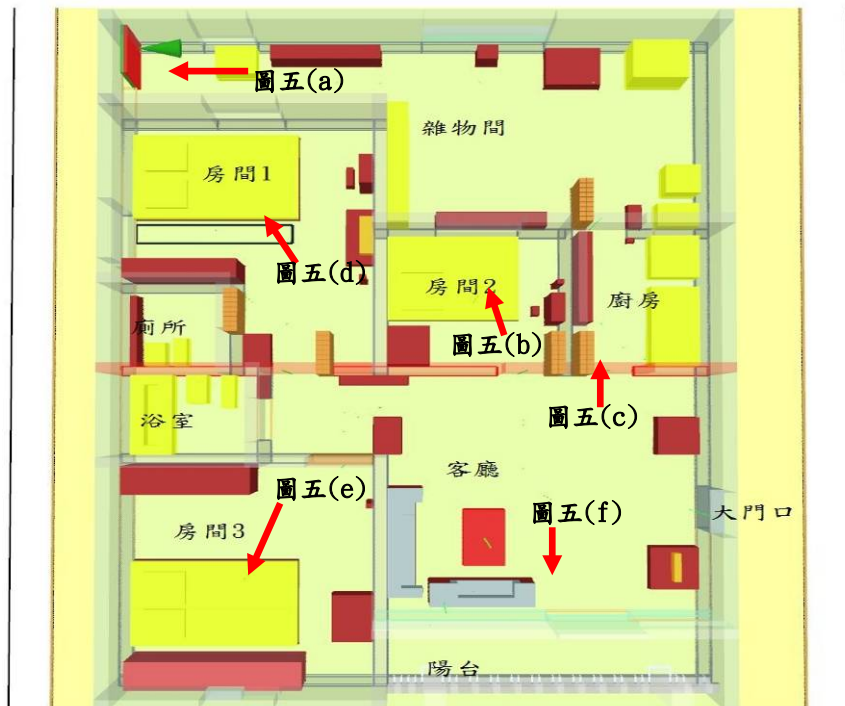
圖二、外觀圖(b)



圖三、老翁逃生至鐵窗圖位置圖(a)



圖四、老翁逃生至鐵窗圖位置圖(b)



圖五、燃燒現場相關位置圖(本研究整理)



圖五(a)、廚房火災損失程度照片圖



圖五(a)、房間 2 火災損失程度照片圖



圖五(c)、廚房火災損失程度照片圖



圖五(d)、房間 1 火災損失程度照片圖



圖五(e)、房間 3 火災損失程度照片圖



圖五(f)、客廳火災損失程度照片圖

### 三、電腦模擬分析與討論

#### 3.1 火災動態模擬器模組介紹

由 2000 年 2 月美國國家標準局(National Institute of Standards and Technology,NIST)所公開發表第一版的 FDS 火災電腦模擬程式[6]，乃是利用流體力學計算(CFD:Computational Fluid Dynamic)方法建立火災火災數值模型，以方程式與混合分量燃燒模式來計算火災高溫濃煙對建築物空間之熱流場變化，可採用大渦流模擬 LES(Large Eddy Simulation)或直接數值模擬 DNS(Direct Numerical Simulation)的方式來計算火災動態行為[7]。

火災動態模擬器(FDS)是運用三維空間運算模擬，並利用數值方式遵循能量守恆、質量守恆及動量守恆等原則予以重複的疊代計算模擬，最後求得火場溫度、煙層流動、氣流速度、熱傳變化、各種粒子等各種物理量之數據。在重建火災事故現場及防火工程研究上可以提供許多火災危害因子的量化資訊，且針對火勢的延燒、火源的成長、濃煙的擴散及流動、氧氣濃度、一氧化碳濃度、二氧化碳濃度、燃料或牆壁表面熱傳、煙控排風機、各式探測器及撒水系統及各種火災危害因子切面變化等都有許多紀錄資料，故在消防安全工程上可以運用火災動態模擬器(FDS)作為許多建築物防火設計及探討[8]。

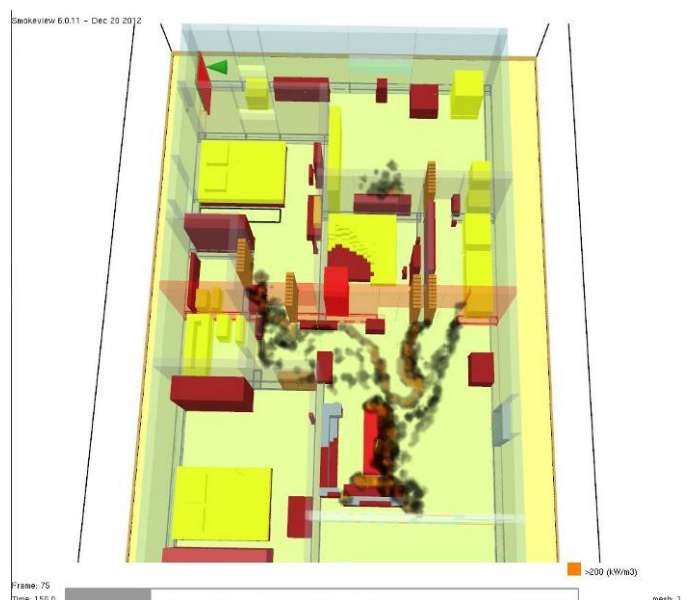
#### 3.2 火災動態模擬器避難模組介紹

由美國 NIST 與芬蘭 VTT 技術研究中心合作發展 FDS 軟體之避難模組，其每位避難人員均可設定心裡、生理及對災害發生時之避難策略，目前僅可計算人員由房間、走廊、樓梯至出口避難所需的時間。FDS+EVAC 為結合火災煙流動態模擬軟體，以及人員避難模擬之運算，並當計算完成後透過後處理程式 Smokeview 軟體以 2D 圖形及 3D 動畫的效果，將空間狀況與模擬結果輸出至螢幕上，以方便使用者可以從螢幕上清楚的了解整體火災發展與人員避難之過程[9]。

#### 3.3 電腦模擬結果分析

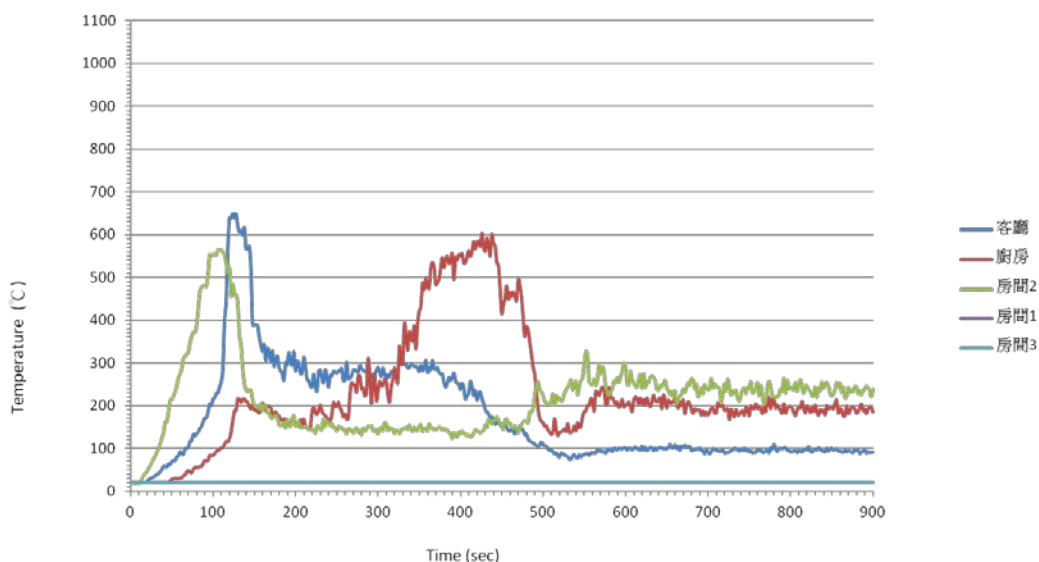
本研究收集新竹新埔火災資料，並運用(FDS+EVAC)程式 5.5.3 版建立數值模型，利用全尺度的熱煙模擬方式且可信度較高的電腦模擬情境，以獲得較接近於火災現場狀況，其本案的火災模擬情境圖[10]，如圖六。其模擬結果分析如下：

(一)完成新埔火災電腦模擬模型建置，並以 FDS 電腦程式完成火災現場重建作業(火災+避難)，其各項模擬結果相當接近火災調查報告之陳述。



圖六、FDS 電腦程式重建本案的火災模擬情境圖(本研究整理)

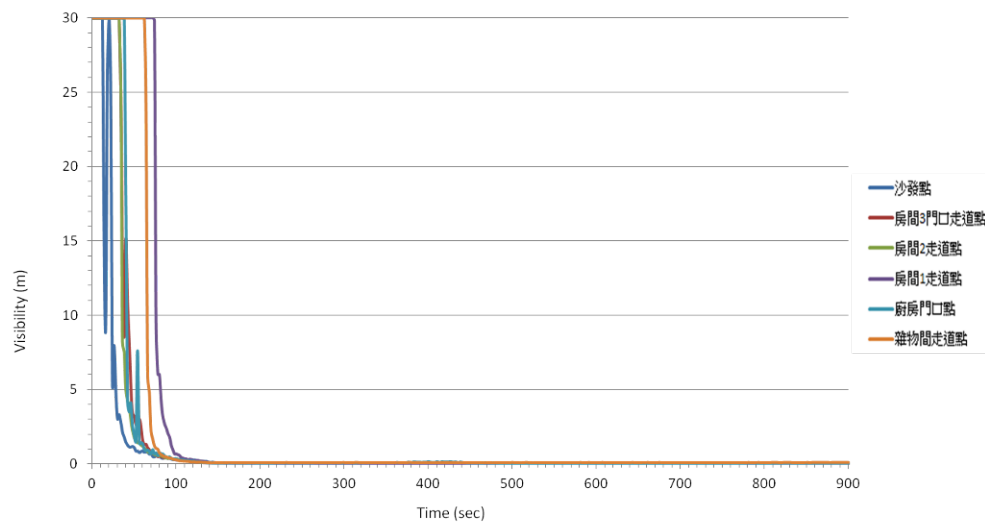
(二)根據電腦模擬結果得知，約 100 秒~110 秒其客廳、房間 2 之上層溫度，已經達到  $550^{\circ}\text{C}$ ~ $650^{\circ}\text{C}$  左右，而廚房之上層溫度約在 430 秒達最大釋熱率，約  $600^{\circ}\text{C}$  左右，使避難人員受到相當大的危害如圖七。



圖七、住宅各點上層溫度分佈圖(本研究整理)

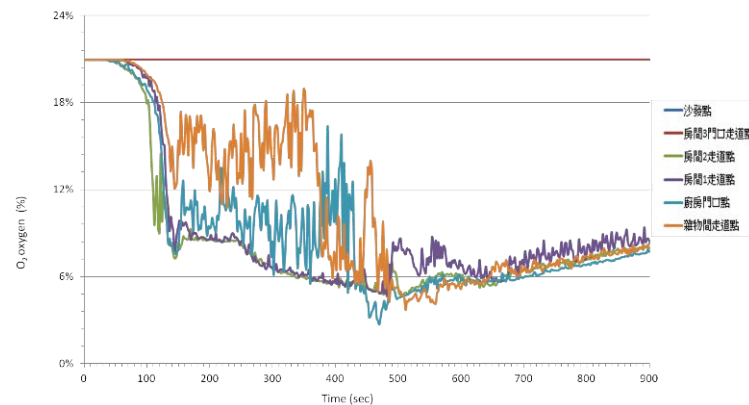
(三)根據電腦模擬結果得知，客廳在約 20 秒時，其能見度達 10m 以下；其餘模擬之廚房、房間等在約 70 秒內，其能見度也達 10m 以下，易造成無法判別

其避難路徑，致使人員逃生受到相當大的危害，如圖八。

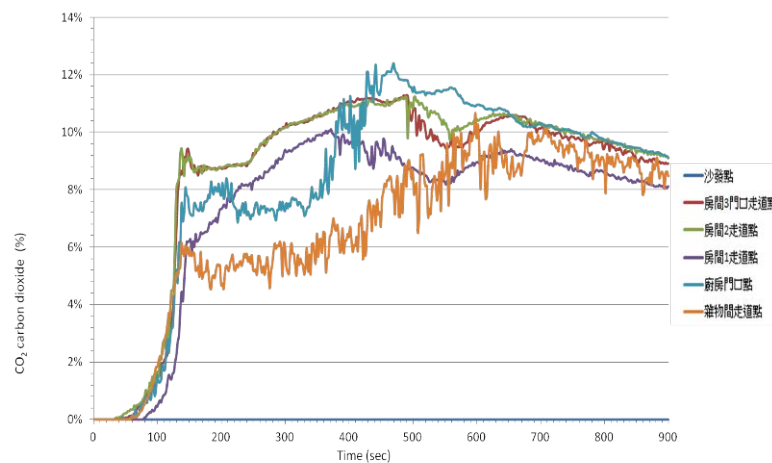


圖八、住宅各點能見度分佈圖(本研究整理)

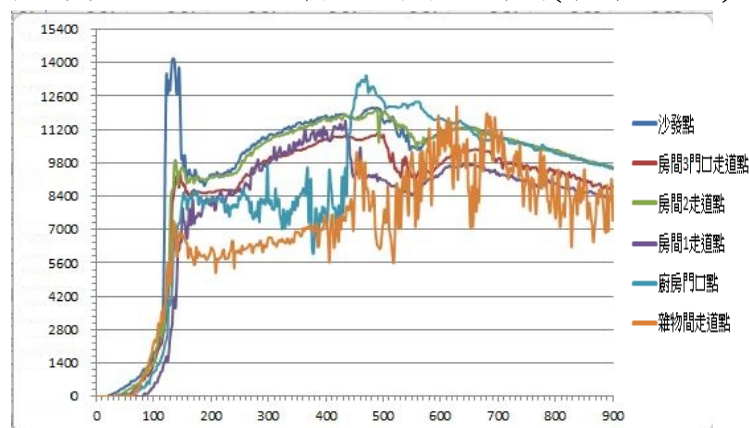
(四) 根據電腦模擬結果得知，於 110 秒時客房間 2，其氧氣含量已以降至 12 % 以下，如圖九(a)。於 130 秒時，各模擬位置二氧化碳含量均以在 5 % 以上，如圖九(b)。於 130 秒時，其沙發處之一氧化碳含量以達 1400PPM，如圖九(c)。由上述各模擬參數，可得知約在 130 後將會影響人員之避難逃生。



圖九(a)、住宅各點氧氣含量分佈圖(本研究整理)

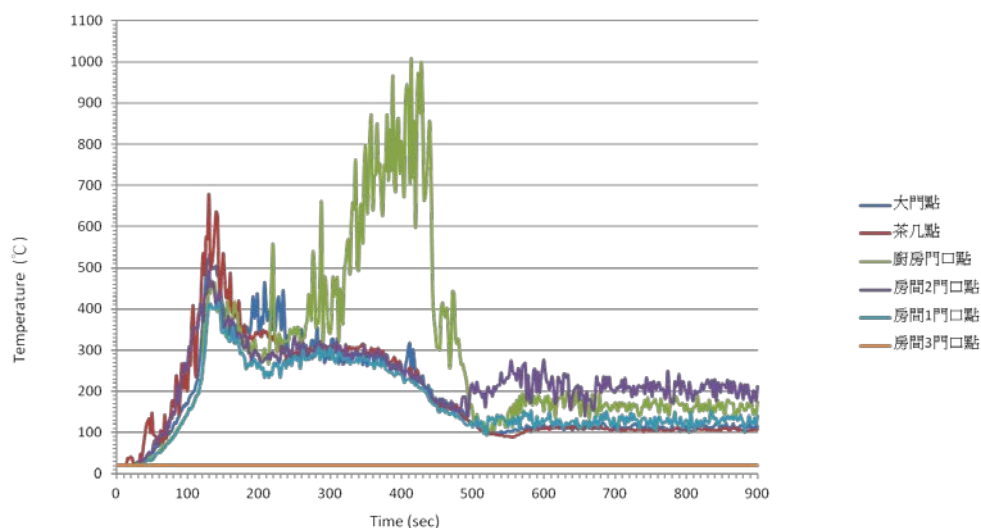


圖九(b)、住宅各點二氧化碳含量分佈圖(本研究整理)



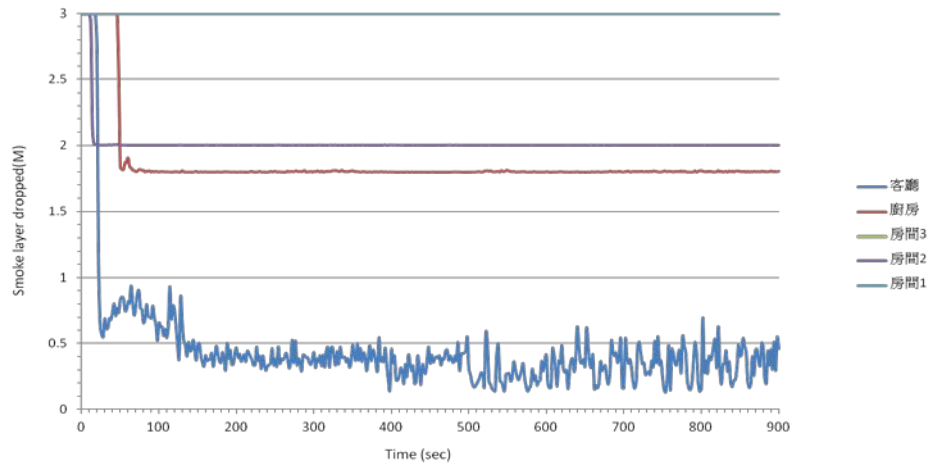
圖九(c)、住宅各點一氧化碳含量分佈圖(本研究整理)

(五)根據電腦模擬結果得知，於 130 秒時客廳沙發處，其溫度已經達  $690^{\circ}\text{C}$  以上，而在 400 秒時，其廚房門口處更是達到  $1000^{\circ}\text{C}$  左右，由此可得知其大廳處燒得的最嚴重，如圖十。



圖十、住宅各點延燒後在高度 1.8 之溫度分佈圖(本研究整理)

(六)根據電腦模擬結果得知，在客廳處約 20 秒後，煙以下降至 0.5 公尺左右；其他處所約 50 秒後，煙以下降至 1.8 公尺左右。此時人員逃生以相當困難，隨著火勢逐漸擴大，人員未及時逃生或避難，易造成受困命喪火場，如圖十一。



圖十一、住宅各點煙層下降狀態(本研究整理)

(七) 根據電腦模擬結果得知，其老翁再 54 秒時查覺火災，如圖十二(a)；而在 59 時開始依避難逃生路線圖開始避難，如圖十二(b)、(e)；於 99 秒時到達鐵窗處等待救援，如圖十二(c)；但是由於在避難逃生時未將門關閉，且內部又存放可燃性物質，造成火勢延燒迅速，再 204 秒時造成老翁死亡，如圖十二(d)。



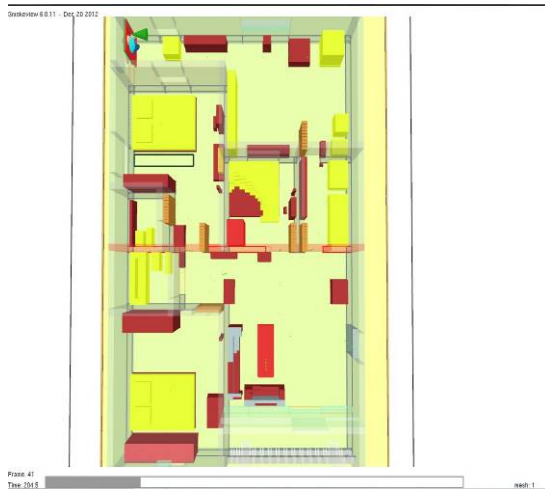
圖十二(a)、模擬老翁察覺火災時間點



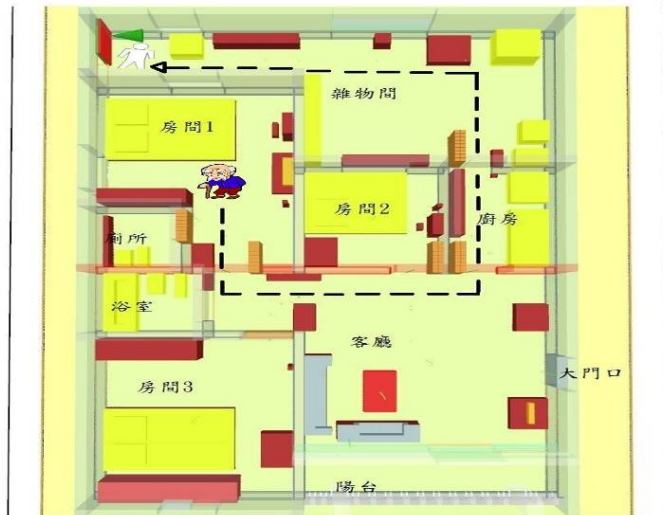
圖十二(b)、模擬老翁開始避難時間點



圖十二(c)、模擬老翁避難至鐵窗處



圖十二(d)、模擬老翁死亡時間點



圖十二(e)、老翁避難逃生動線圖(本研究整理)

#### 四、結果與建議

獨立住宅是人們最常時間所居住和休憩之場所，亦是人們警覺性較低的時候，尤其在夜間發生住宅火災時，往往來不及作初期的滅火或避難逃生行為。但在現行消防法令中，獨立住宅卻只有住宅用火災警報器之規範，且該法又分兩階段推動實施，第一階段針對未設置火警自動警報設備的旅賓館及收容照顧避難弱者之機構，要求100年12月31日前裝設住宅用火災警報器，第二階段才是針對未設置火警自動警報設備之住宅於106年12月31日前裝設住宅用火災警報器，致使人們在這段空窗期當中，常常疏於防範和注意，以致火災發生時常造成許多傷亡。以下就住宅類之防火對策提出建議，以減少災害發生人命傷亡和財產損失：

一、根據研究顯示，住宅火災之死亡原因大多是由於延遲避難，所以在歐美國等先進國家中發現住戶如裝有住宅用火災警報器，因可有效極早察覺火災發生並發出警報聲響，可大幅降低火災時人員傷亡。故政府機關應多加推廣並宣導住宅用火災警報器(獨立式偵煙探測器)，以提升該住宅偵測火災能力，並於火災初期發出警報，讓就寢者、高齡長輩、幼童、孕婦及身障者等避難能力較弱者，能夠及早預警、避難。

二、加強避難逃生器具及緊急照明之設置和宣導使用，使軟硬體資訊設備能同時提升，才能增加一般住宅類居民安全逃生機會。

三、推動住宅防火診斷及宣導消防常識。由政府機關利用住宅防火診斷之軟體，進行訪視、診斷，以直接向民眾提出防火改善建議。並以居家安全用電為原則，進行各項火災預防措施和緊急應變常識之宣導。

四、宣導使用防焰物品之窗簾、地毯、布幕等裝飾物品，以防止因微小火源，而起火或迅速延燒。其為能有效進行初期滅火應變，應加強宣導民眾設置及使用滅火器。

五、進行住宅類建築物「防火避難性能設計評估」，以衡量住宅於居住者生活使用機能中所達到之安全程度，保障人命安全及抑制財務損失之性能。

六、依「各類場所消防安全設備設置標準」第 17 條規定，在 5F 以下集合住宅是屬於免設自動撒水設備之場所。但住戶內含有高火災潛在危險空間(如廚房)，可在其天花板設置簡易撒水頭(小區劃型或側壁型)進行防護，以有效抑制火災初期和滅火之要求[11]。

七、民眾購屋後常常會依居住需求在進行室內裝修，目前針對裝修材料並未規定耐燃或不燃材料，建議住宅類部分可以用推廣的方式宣導民眾使用耐燃或不燃材料裝修[12]。

八、對於家中有行動不便或老弱者，應在家中設置照護用專用設備，並建立緊急避難逃生計畫和手冊[13]。

九、在緊急避難逃生時，應將其逃生門順手關閉，以防止火的延燒及避免煙的侵襲，確保避難逃生通道的安全，以增加受困人員存活之機率。

## 五、參考文獻

1. 內政部消防署網站資料，<http://www.nfa.gov.tw/main/index.aspx>.
2. 黃惠靖，元智大學機械工程學系學位論文，2007.
3. FDS 火災電腦模擬程式網站資料，<http://www.vtt.fi/proj/fdsevac/?lang=en>
4. Rowe W.D., "Assessing the Risk of Fires Systemically", Fire Risk Assessment, ASTM STP 762, P3, 1985
5. 陳昱維，火災模擬(FDS)應用於老舊住宅防火對策之研究，2009.
6. McGrattan Kevin, McDermott Randall, Hostikka Simo, Floyd Jason, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, 2010
7. McGrattan Kevin, Hostikka Simo, Floyd Jason, Baum Howard, Mell William, McDermott Randall, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model", NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, 2010
8. 簡漢良，運用火災調查技術與 FDS 電腦模擬程式重建一個夜店火災情境，pp.22-23，2012.
9. 紀人豪、沈子勝、徐一量、陳政洞，原有合法小規模旅館建築物防火避難改善方案之實驗驗證及電腦模擬分析，內政部建築研究所委託研究報告，pp.54，99 年 12 月。
10. 紀人豪、吳勝宏、蘇慶昌、簡漢良、吳永延，鉅豐倫企業有限公司火場重建分析研究，吳鳳科技大學專案研究計畫成果報告，pp. 8，2012.
11. 陳建忠、紀人豪、陳政洞、吳秉宸、翁閔政、李靜君，住宅類建築物防火安全性能驗證之研究，內政部建築研究所研究報告，pp.96，97 年 12 月
12. 沈鈺棠，集合住宅火災模擬分析-以台北縣新莊鈴木華城集合住宅為例，pp.170，2008.
13. Ai.sekizawa, "How to Reduce Fire Fatalities in Residential Occupancies: Who Are Vulnerable to Fires and What Care Is Needed For Their Fire Safety?", Board member of SFPE Janpan Chapter, University of Tokyo, Japan



## 增程式電動機車研發及性能發展

### R &D and performance development of a range-extended electric motorcycle

朱力民<sup>1</sup>、張崴縉<sup>1\*</sup>、李卓昱<sup>1</sup>、許哲嘉<sup>1</sup>

L.M. Chu<sup>1</sup>, W.C. Chang<sup>1</sup>, C.Y. Lee<sup>1</sup>, J.J. Sheu<sup>1</sup>

南台科技大學機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

吳正豐<sup>2</sup>

C.F. Wu<sup>2</sup>

義守大學機械與自動化工程系

Department of Mechanical & Automation Engineering, I-Shou University

### 摘要

本研究先將 TGB Tapo 二行程機車，修改為電動機車，再使用 SHX1000 發電機，將其與電動機車串聯，目標在研發出一台增程式電動機車。本實驗使用電動機車低速及高速檔進行底盤動力計及道路實測耐久測試，其結果顯示：在低速檔使用底盤動力計測試，時速可達 33km/hr，使用 3A 充電器，可增程 15km，發電機耗油量為 511cc，使用 6A 充電器，可增程 45km，發電機耗油量為 944cc。在高速檔狀況下，時速可達 43km/hr，使用 3A 充電器，可增程 2km，發電機耗油量為 265cc，使用 6A 充電器，可增程 5km，發電機耗油量為 375cc。在低速檔進行道路實測耐久測試，時速可達 33km/hr，使用 3A 充電器，可增程 10km，使用 6A 充電器，可增程 40km。在高速檔狀況下，時速可達 42km/hr，使用 3A 充電器，可增程 2km，使用 6A 充電器，可增程 5km。低速檔增程效果較佳。使用 6A 充電器可得到較佳的增程效果，但其油耗量相對提高。此項技術之研發可達電動增程的目的。

**關鍵字：**電動機車、增程型裝置、串聯式油電混合系統

---

<sup>1</sup> 南台科技大學機械工程學系，教授、副教授，E-mail: wcchang@mail.stust.edu.tw

<sup>2</sup> 義守大學機械與自動化工程學系，研究生

## Abstract

This research converted a TGB Tapo two-stroke engine motorcycle into an electric bike, and then used an SHX1000 generator to connect with batteries, aimed to form a range extended series hybrid motorcycle. By choosing low or high speed gear setup, the endurance tests were conducted both on a chassis dynamometer and real road. The results showed: on the dynamometer tests, at low speed gear the max. speed can reach to 33 km/hr. With a 3A charger, the cruise range increased 15 km and the fuel consumption of generator was 511 cc. With a 6A charger, the range increased 45 km and the fuel consumption was 944 cc; at high speed gear the max. speed can reach to 43 km/hr. With a 3A charger, the cruise range increased 2 km and the fuel consumption of generator was 265 cc. With a 6A charger, the range increased 5 km and the fuel consumption was 375 cc. On the road tests, at low speed gear the max. speed can reach to 33 km/hr. With a 3A charger the cruise range increased 10 km, the 6A charger increased 40 km range. At high speed gear the max. speed can reach to 42 km/hr. With a 3A charger the cruise range increased 2 km, the 6A charger increased 5 km range. At low speed gear setup a better range extension was gained. 6A charger provided longer cruise range but consumed more fuel. This technology can be applied to extend the cruise range of an electric motorcycle.

Keywords: electric motorcycle, extended-cruising-range package, serial hybrid system

## 一、前言

目前全球汽車總量近 6 億輛，不僅消耗大量的石油資源，而且環境污染也日益嚴重，大量的溫室氣體二氧化碳排向地球大氣層造成全球氣候暖化現象，為因應全球暖化、能源短缺造成高油價時代來臨，節能減碳儼然成為全球共識。又由於地球暖化問題受到重視，在全球油價上漲及京都議定書廢氣減量之壓力下，未來將更使得傳統石油用量受到限制。

據統計 63% 的石油資源用於汽車運輸，42% 的大氣污染來自於燃油汽車廢氣排放，如何解決能源危機和保護生態環境已成為當今世界兩大問題。再者車輛的污染乃為都會區的主要空氣污染源，故能源的有效利用與污染排放的減量，乃為改善都會區空氣污染的最有效方法。目前機車為台灣地區最普遍的個人交通工具。根據交通部統計資料顯示，台灣地區的機車數量至 2012 年 12 月底為止，總數為 1513 萬 9628 輛，密度很高，所以機車在台灣人的生活中佔有極重大的地位，但是機車所排放的一氧化碳、碳氫化合物與氮氧化物，歷年來均佔總排放量的五成以上，是造成空氣污染的主要活動污染源，隨著全球人口的增加與都市化，日後對能源與各項資源的需求也勢必更加熱切，因而產生的各類污染物也將隨之遽增。

因此必須及早開發新技術減少因燃燒行為所產生的空氣污染量，而發展沒有廢氣排放、低噪音以及廢氣電池可回收的電動車輛，取代以化石燃料為主的汽機車，成為現今解決廢氣排放量過高的重要方案之一。

電動車雖然被預期在本世紀深具發展潛力，其中結合了傳統機械、馬達[1]、驅動控制系統[2,3]、車輛動力系統[4,5]、電池化學[6]和電力電子[7]等相關研究領域。但不可否認的，目前電動車仍然面臨許多問題，如續航力不足、電動車極速低、加速性能不佳、爬坡力欠佳、價格過高、電池效率不佳、充電站不普及……等等。這也是電動車至今仍無法普及的主因。為了改善電動機車及內燃機車兩者各別之缺點，因而產生了混合動力車輛(Hybrid Electric Vehicle, HEV)。混合動力機車同時使用傳統內燃機引擎以及電動馬達兩種動力來源，其中引擎為車輛之主要動力來源，馬動主要提供輔助動力，以便使引擎在各種負載條件下，均能在最低油耗、最低排污之情況下運轉。

最近因市售的電動車及油電混合車技術上遇到瓶頸，因此各大廠現皆朝向增程式電動車(Range Extended Electric Vehicle, REEV)開發，增程式電動車的引擎只用在發電，驅動車輛完全靠電動馬達，可增加行駛續航力，增程式電動車更為環保、省油，許多車廠將其視為解決目前電動車續航力不足問題的短期替代方案。

Toyota Prius Hybrid，是日本豐田汽車於 1997 年所推出世界上第一個大規模生產的混合動力車輛車款[8]，隨後在 2001 年銷往全世界 40 多個國家和地區。2008 年Honda公佈了Insight二代新車型為五門油電車[9]。英國公佈的測試為 100 公里 3.663 升以及CO<sub>2</sub>排放 101g/km，幾乎是全英國最低。三菱將混合動力系統搭載在SUW ADVANCE上，並將其稱為GDI-HEV[10]，其採並聯方式前輪驅動，動力裝置由引擎、驅動用馬達與CVT構成，引擎驅動力的輸出端和CVT的輸出端都設有離合器。NISSAN於 2000 年 4 月推出限量的Hybrid車型Tino[11]，搭載直列四缸DOHC噴射引擎與電動馬達組合，並附上兩個鋰電池。

現市面上的增程型電動系統有 Chevrolet Volt[12]及 Opel Ampera[13]，Chevrolet Volt 的核心技術乃是一套名為 Voltec 的動力系統，車內的動力儲存媒介乃是特製的鋰離子電池，驅動車輛則藉由動力輸出 150hp/37.8kgm 的電動馬達，車上裝有一具小型內燃機引擎，但這具排氣量 1.0 升的三缸渦輪增壓引擎的動力輸出並不使用於推動車輛，而僅供應發電機使用。將 Volt 車上的電池充滿，可讓車輛具備 64km 的續航距離，而在電池耗盡之前，車上的內燃機引擎會啟動，推動輸出 53kW 的發電機對電池進行充電，讓車輛繼續以電力推動前進。根據 GM 集團所提供的技術資料指出，Voltec 系統會在電池蓄電量低於 30%之前開始充電，當電池蓄電量達到 80%之後停止內燃機引擎，避免過充過放對車上的鋰離子電池造成損害。

Opel Ampera 是一輛不用充電的電動車款，其搭載一具功率 16kWh 的先進鋰電池模組，電力傳動系統則擁有 150hp 的輸出，在電力充滿的情況下，依照路況、駕駛人習慣、與氣溫的不同，Ampera 能在純電力驅動模式下行駛 40 至 80 公里

不等的距離。在續航距離延長模式下，假設鋰電池模組現存電力含量所剩無幾，一具由汽油引擎驅動的發電機，會將電力無縫地再回充至電力傳動系統，這使得 Ampera 在油箱加滿、且不補充燃油的狀態下，續航距離能突破 500 公里。Ampera 的電力傳動系統最大可輸出 37.73kg-m 的扭力，這使得其 0-100km/h 加速不用 10 秒，極速更可達到 161km/h。

Audi 的 A1 e-tron 概念車[14]，其動力系統除了一具可產生 7.5 萬瓦電力的電動馬達外，另外還搭配了一組蓄電量每小時可達到 1.2 萬瓦的鋰電池組，而此電池組則可提供此車「純電力」行駛距離約 50 公里，足以負擔市區使用。此外，在 A1 e-tron 身上還配置有一具排氣量僅 254c.c.的轉子引擎與 12 公升的油箱，而這具引擎最要目的就是用來幫電池組充電的，讓此車在行駛的同時也能充電，使其最大行駛距離可來到 200 公里。

裕隆集團[15]研發增程式電動車兼具有插電式（plug-in）充電的功能，單趟最長行駛里程數高達 600 公里，是純電動車的 1~3 倍。相較於目前市售主流的傳統油電混合動力車，其燃油引擎是用於驅動車輛，增程式電動車的引擎只用在發電，驅動車輛完全靠電動馬達，增程式電動車更為環保、省油，且發展上，較不受其他車廠專利的限制。

電動機車已列入我國「汽車工業發展策略」之重點發展項目，其發展不但是政府既定的政策，也會是未來大眾運輸交通工具的主流。在未來石油短缺及節能減碳的時代中，研究發展電動車為必要途徑，但電動車的續航力至今一直是一個挑戰。本研究使用發電機作為電動機車的輔助能量來源，研發一台可增加行駛里程數之油電混合動力車，利用鋰鐵電池、輪轂馬達、汽油發電機組成串聯式油電混合動力車以增加其行駛里程，並運用底盤動力計及實走測試量測其性能。

## 二、研究方法

本研究先將原車 TGB Tapo，修改為電動機車，並使用 SHX1000 發電機為發電設備，將其串聯，再進行底盤動力計測試及實車走行測試，來驗證其數據之正確性與實際用車狀況下此概念是否可以達到增程之目標與效果。

### 2.1 電動機車之製作

將原車 TGB Tapo，如圖 2-1 及表 2-1 所示，修改為電動機車，此電動機車所搭載之電池為鋰鐵電池(LiFePO<sub>4</sub>)，其額定電壓為 48V，電量為 24Ah，充電飽和電壓為 57V；所搭載之馬達為輪轂式直流無刷馬達，額定消耗功率為 800W，瞬間消耗功率可達 1.2kw，如圖 2-2 所示，其控制器如圖 2-3 及表 2-2 所示。本次實驗採用充電方法，係利用充電器與插座接合，電動機車在行駛下進行充電，此種方式稱為插電式電流回充系統。而本實驗採用此方式，利用插電式電流回充與發電機結合進行充電，達到行駛時亦可達成充電的功效，為顯示功效，本次實驗選用市售充電器兩種規格進行測試分別為：48V6A(6A)及 48V3A(3A)作對比，進行實驗以利於比較差異性，如圖 2-4 所示。製作完成之電動車如圖 2-5、圖 2-6、

表 2-3 所示。



圖 2-1 TGB Tapo 原車



圖 2-2 直驅式輪轂馬達



圖 2-3 控制器



圖 2-4 為 48V3A 及 48V6A 市售充電器

表 2-1 性能諸元

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| 車型編號 | TGB Tapo                      |
| 車體尺寸 | 長 1780mm, 寬 650 mm, 高 1075 mm |
| 輪胎尺寸 | 120(mm)寬度單位公釐                 |
| 前(後) | 70 扁平比(%)                     |
|      | 12RIM 外徑(輪胎內徑)單位英吋(inch)      |
| 車重   | 94KG (含電池)                    |
| 引擎   | 49.3cc                        |
| 冷卻方式 | 氣冷式                           |
| 油箱   | 6.8(L)                        |

表 2-2 控制器諸元表

|         |              |
|---------|--------------|
| 額定電壓    | 直流電<br>(48V) |
| 限制最大電流  | (33A)        |
| 可承受最高溫度 | (120 度)      |



圖 2-5 支撐架與輪鼓馬達結合



圖 2-6 完成後 TGB Tapo

表 2-3 TGB Tapo 改後電動車性能諸元

|                                            |                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| 車型編號                                       | TGB Tapo                          |
| 車體尺寸                                       | 長 1780mm                          |
|                                            | 寬 650 mm                          |
|                                            | 高 1075 mm                         |
| 輪胎尺寸<br>前                                  | 寬度 120 (mm)                       |
|                                            | 70 扁平比 (%)                        |
|                                            | 輪框外徑 12 英吋 (inch)                 |
| 輪胎尺寸<br>後                                  | 寬度 88.9 (mm)                      |
|                                            | 100 扁平比 (%)                       |
|                                            | 輪框外徑 10 英吋 (inch)                 |
| 車重                                         | 50KG (含電池)                        |
| 馬達型式                                       | DC48V 無刷馬達 800W                   |
| 電池型式                                       | 鋰鐵電池(LiFePO <sub>4</sub> )48V24AH |
| 充電器                                        | 輸入 AC 110V (50/60Hz)              |
|                                            | 輸出 DC 58.5V 3.0A 6.0A             |
| 續航里程                                       | 50km                              |
| ※註:續航里程會隨路況、騎乘者體重、騎乘習慣，與電機、電池之機電系統狀況而有所改變。 |                                   |

## 2.2 發電機

本研究不開發自製發電機，所以使用目前市售現有之 SHX1000 發電機為發電設備，如表 2-4 及圖 2-7 所示，並外加一燃油消耗量測設備，如圖 2-8 所示，電壓與電流錶，如圖 2-9、2-10 所示以隨時監看充電電壓與電流，由於考量到此電動機車所搭載之電池為鋰鐵電池(LiFePO<sub>4</sub>)，並非能以大電流充電，而此實驗設計乃以最為簡單之方式來驗證其可行性與效能，固使用原車所配置之充電器，以確保電池與實驗安全。



圖 2-7 發電機

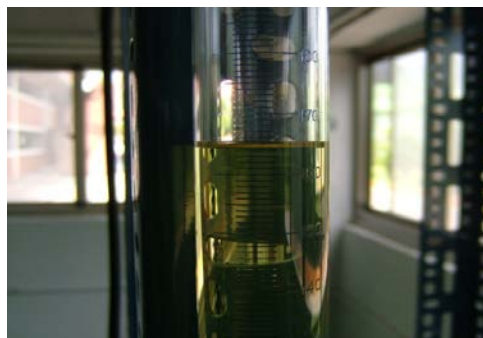


圖 2-8 燃油玻璃管液位計



圖 2-9 電壓錶



圖 2-10 電流錶

表 2-4 SHX1000 主要諸元

|      |                      |
|------|----------------------|
| 型號   | ELEMEX SHX1000       |
| 體積   | 長 600mm              |
|      | 寬 300mm              |
|      | 高 350mm              |
| 重量   | 15Kg (不含汽油)          |
| 燃油   | 92 無鉛汽油              |
| 油箱容量 | 3.8L                 |
| 引擎型式 | HONDA GX50 49.4cc 4T |
| 噪音   | 58dB                 |
| 輸出   | AC 120V (60Hz) 7.5A  |
|      | DC 12V 8.3A          |

### 2.3 底盤動力計系統

機車底盤動力計是將受測車輛設置於動力計上，模擬車輛行車情況，經由動力計量測行駛速度或部份負荷等，經由資料擷取得知馬力、扭力、溫度、馬達轉速等，機車使用修改之 TGB Tapo 電動車作為本次實驗主體，如圖 2-11 所示，系統配置主要包括控制箱主體：馬達轉速及溫度訊號孔、手持式控制面板、紅外線車速感知器、引擎數據擷取畫面、如圖 2-12、圖 2-13 及圖 2-14 所示。



圖2-11 動力計



圖 2-12 手持式控制面板



圖 2-13 紅外線測速感知器

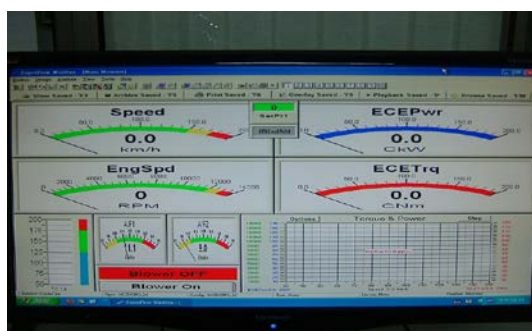


圖 2-14 引擎數據擷取畫面

## 2.4 GPS

本實驗採用智慧型手機，安裝於電動機車上，運用手機內建 GPS 程式，測量電動車於實際道路行駛時之里程及時速數據，由於定位方式為衛星定位，故準確性較高，以利進行實驗。如圖 2-15 智慧型手機 GPS 定位系統：



圖2-15 手機GPS定位系統

## 2.5 道路實測

實施道路實際測主要目的為了解電動機車於道路行駛時電流的消耗情況及環境對電動車影響。測試(1)一般道路測試 (2)加裝發電機發電再利用插電式電流回充進行測試，並尋找出差異性並和動力計測得之相關數據互相比較。

## 2.6 實驗方法與步驟

實驗設計目標是以發電機串聯電動車以增加行駛里程數，故實驗由一現成汽油發電機為電力補充來源，並使用原車所附贈之充電器為電力轉換來源。

首先於一般道路行駛，了解此電動機車性能及路面狀況，並紀錄實際騎乘所得相關數據，將電動機車架於底盤動力計，並依照一般道路行駛時所取得之數據設定與矯正相關參數，以便量測電動機車性能及特性。

在線路方面，為了能記錄電壓、電流等數據，於是在電動機車上製作連結線路，而為了使發電機能給於電動機車補充電能，特製作延長轉接頭，用於發電機發電時充電器之連結。

完成以上前置作業後，將電動機車架設於底盤動力計上，連結線路後，即可進行實驗，本實驗以高速檔及中速檔在動力計上進行測試，另外也於一般道路進行測試，最後在動力計上及一般道路上掛載發電機做測試，經過多次測試後，將所有取得之數據相互比較，驗證其差異及效益。

# 三、實驗結果與討論

本實驗針對研發改裝後電動車 TGB Tapo 進行原車性能測試如：給定路阻模式測試高、低速進行比較轉速、電壓、時速、里程、扭力、功率輸出、功率輸入等。道路實測進行耐久測試，電壓、電流、電腦里程、時速等，使用不同充電器均給予充電、0A(未加發電機)、3A 充電器(3A)、6A 充電器(6A)進行交叉分析各種不同數據，以增加實驗可靠性。

## 3.1 TGB Tapo 動力計耐久測試

本實驗測試電動車外加發電機經由底盤動力計測試得知相關數據，以做比較，比較結果如下：圖 3-1 為動力計耐久低速測試之電壓與時間關係圖，圖中顯示 0A 於第 2 分鐘後開始衰退，3A 於第 35 分鐘開始衰退，惟 6A 維持於第 85 分鐘後電流開始衰退，測試時間可比較出其優異性能，很明顯 6A 皆優於 3A 及 0A。圖 3-2 為動力計耐久低速測試之電流與時間關係圖，圖中顯示 0A、3A、6A 均開始衰退，測試時間可比較出較優異性能，且 6A 因測試時間較長輸出電流較為穩定，很明顯 6A 皆優於 3A 及 0A。

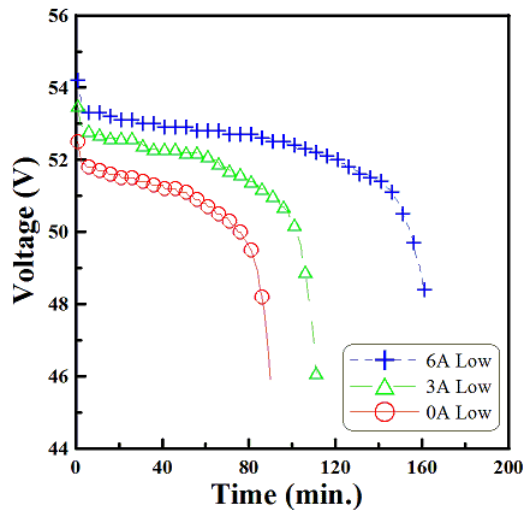


圖 3-1 低速測試之電壓與時間關係圖

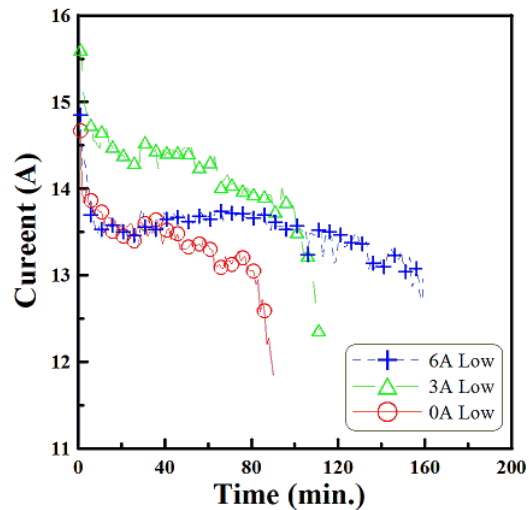


圖 3-2 低速測試之電流與時間關係圖

圖 3-3 為動力計耐久低速測試之時速與時間關係圖，圖中顯示 0A 於第 30 分鐘後開始衰退，3A 於第 50 分鐘後開始衰退，惟 6A 維持於第 100 分鐘後速度開始衰退，因此 6A 優於 3A 及 0A。圖 3-4 為動力計耐久低速測試之油耗與時間關係圖，圖中顯示使用 3A 充電器，發電機耗油量為 511cc，使用 6A 充電器，發電機耗油量為 944cc。6A 雖然耗油量比 3A 多，但因為 3A 只能測試至第 110 分鐘增程效果無法像 6A 高達到 170 分鐘左右，故以增程效果來看 6A 仍優於 3A。

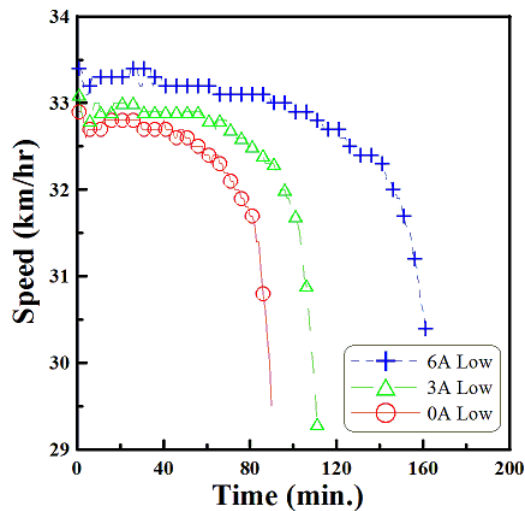


圖 3-3 低速測試之時速與時間關係圖

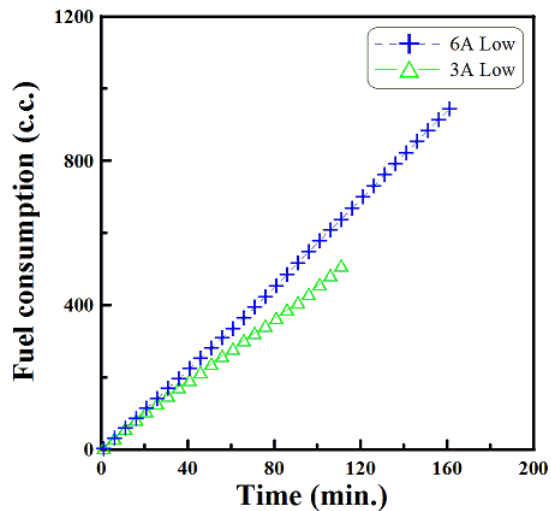


圖 3-4 低速測試之油耗與時間關係圖

圖 3-5 為動力計耐久低速測試之里程與時間關係圖，圖中顯示 0A 於第 85 分鐘行駛 45 公里後無法測試，3A 於第 120 分鐘行駛 60 公里後無法測試，惟 6A 仍維持至 170 分鐘行駛 90 公里後無法測試，故 6A 仍優於 3A 及 0A。

圖 3-6 為動力計耐久高速測試之電壓與時間關係圖，圖中顯示 0A 於第 20 鐘後開始衰退，3A 於第 25 鐘開始衰退，惟 6A 維持於第 38 分鐘後電流開始衰

退，因此 6A 優於 3A 及 0A。

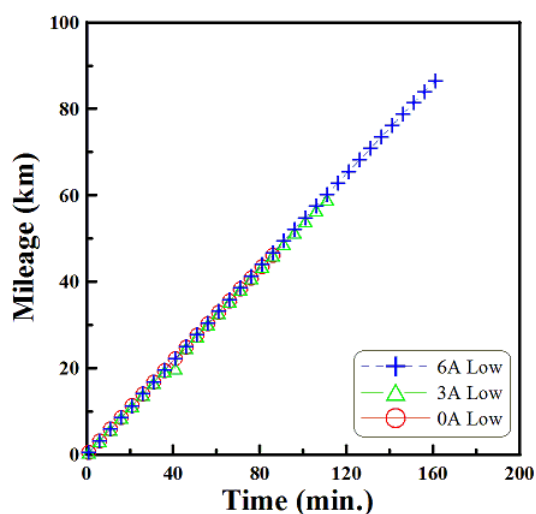


圖 3-5 低速測試之里程與時間關係圖

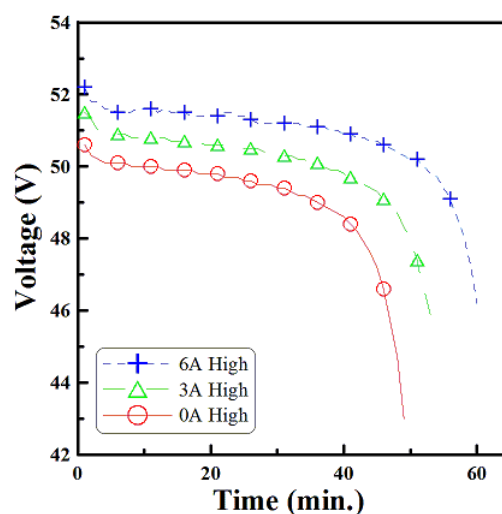


圖 3-6 高速測試之電壓與時間關係圖

圖 3-7 為動力計耐久高速測試之電流與時間關係圖，圖中顯示 0A 於第 50 分鐘後開始衰退，3A 於第 55 分鐘開始衰退，惟 6A 維持於第 60 分鐘後電流開始衰退，比較下 6A 優於 3A 及 0A。圖 3-8 為動力計耐久高速測試之時速與時間關係圖，圖中顯示 0A、3A 於第 30 分鐘後開始衰退，唯 6A 維持於第 50 分鐘後速度開始衰退，因此 6A 優於 3A 及 0A。

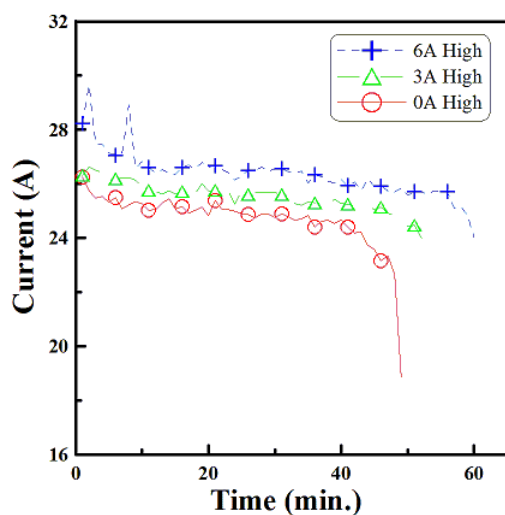


圖 3-7 高速測試之電流與時間關係圖

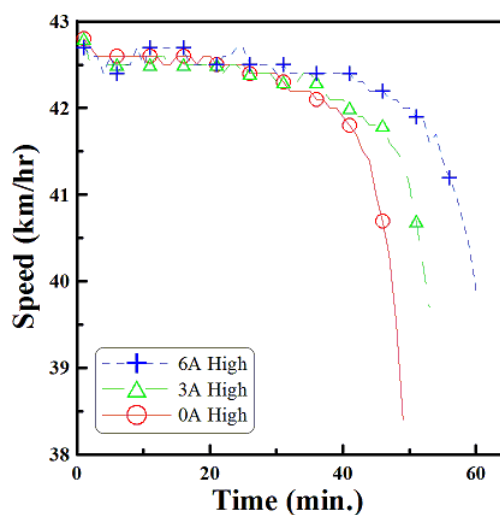


圖 3-8 高速測試之時速與時間關係圖

圖 3-9 為動力計耐久高速測試之油耗與時間關係圖，圖中顯示使用 3A 充電器，發電機耗油量為 265cc，使用 6A 充電器，發電機耗油量為 375cc，3A 與 6A 比較下 6A 雖然耗油量比 3A 多，但因為 3A 只能測試至第 55 分鐘增程效果無法像 6A 高達到 60 分鐘左右，故以增程效果來看 6A 仍優於 3A。圖 3-10 為動力計

耐久高速測試之里程與時間關係圖，圖中顯示 0A 於第 45 分鐘達 33 公里時無法再測，3A 於第 52 分鐘達 35 公里時無法再測，6A 於第 58 分鐘達 38 公里時無法再測，故很明顯 6A 優於 3A 及 0A。

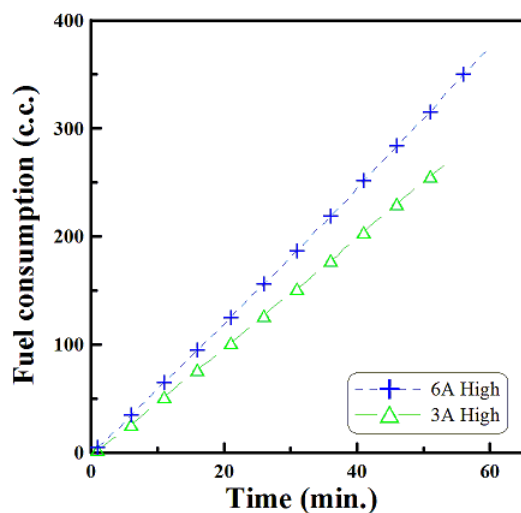


圖 3-9 高速測試之油耗與時間關係圖

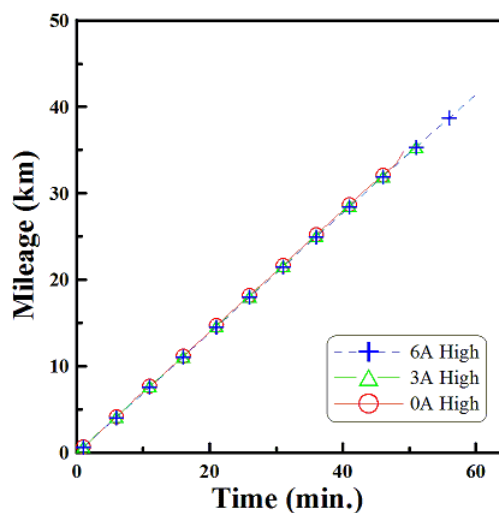


圖 3-10 高速測試之里程與時間關係圖

### 3.2 TGB Tapo 道路實測耐久測試

本實驗將電動機車串聯發電機，並於道路實測取得相關數據以做比較，比較結果如下：圖 3-11 為道路實測耐久低速測試之電壓與時間關係圖，圖中顯示 0A 在第 100 分鐘時輸出電壓開始衰退，3A 則是第 118 分鐘開始衰退，6A 於第 180 分鐘開始衰退，很明顯 6A 優於 3A 及 0A。圖 3-12 為道路實測耐久低速測試之電流與時間關係圖，圖中顯示 0A 在第 98 分鐘時輸出電流開始衰退，3A 則是第 118 分鐘開始衰退，6A 於第 180 分鐘開始衰退，很明顯 6A 優於 3A 及 0A。

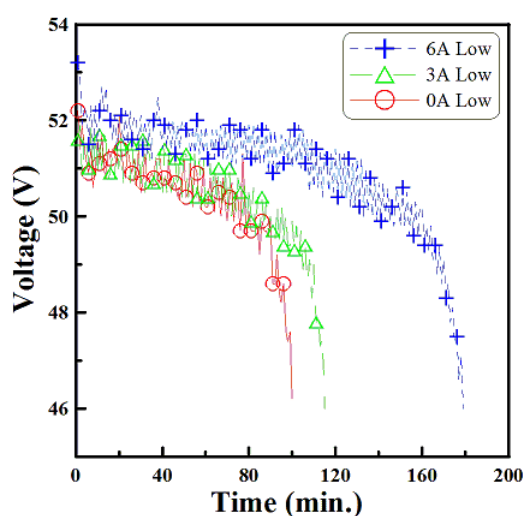


圖 3-11 低速測試之電壓與時間關係圖

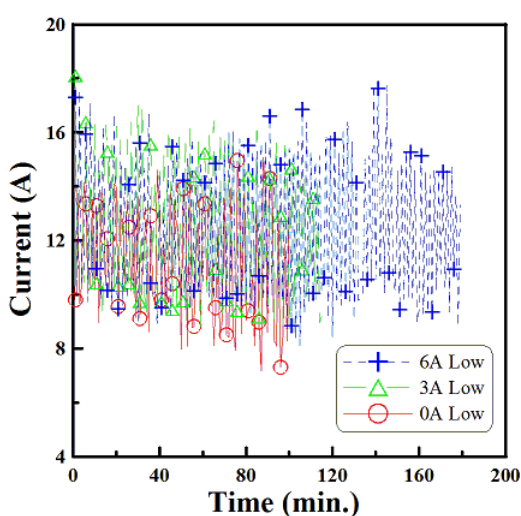


圖 3-12 低速測試之電流與時間關係圖

圖 3-13 為道路實測耐久低速測試之里程與時間關係圖，圖中顯示在低速下 0A 於 90 min 行駛 50 Km，3A 於 120 min 行駛 60 Km，6A 於 180 min 行駛 90 Km，很明顯 6A 仍優於 3A 及 0A。圖 3-14 為道路實測耐久低速測試之時速與時間關係圖，圖中顯示在低速下 0A、3A 及 6A 速度均可達到 31~34Km/hr，而 0A 在第 90 分鐘時就無法測試，3A 在第 118 分鐘時無法測試，惟 6A 可以持續至 180 分鐘，很明顯 6A 優於 3A、0A。

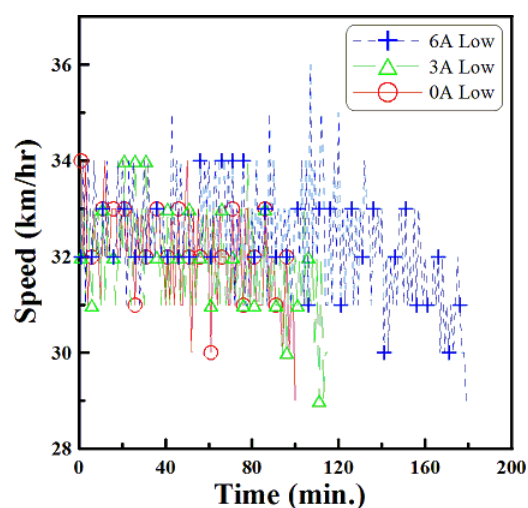
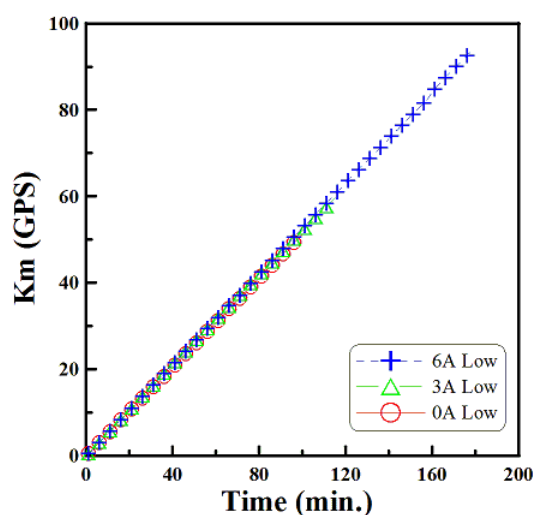


圖 3-13 低速測試之里程與時間關係圖      圖 3-14 低速測試之時速與時間關係圖

圖 3-15 為道路實測耐久高速測試之電壓與時間關係圖，圖中顯示在道路實測高速階段電壓很明顯 0A、3A 及 6A 均在第 40 分鐘開始衰退，但由於充電器不同，因此 0A 在第 60 分鐘下只剩下 46V，3A 在第 65 分鐘剩下 47.5V，6A 在 80 分鐘電流可維持在 47V，比較下 6A 仍優於 3A、0A。圖 3-16 為道路實測耐久高速測試之電流與時間關係圖，圖中顯示在高速行駛下輸出電流 6A 均高於 3A 及 0A 且經長時間使用下 6A 仍比 3A 及 0A 來的時間久，故 6A 比 3A 及 0A 優異。

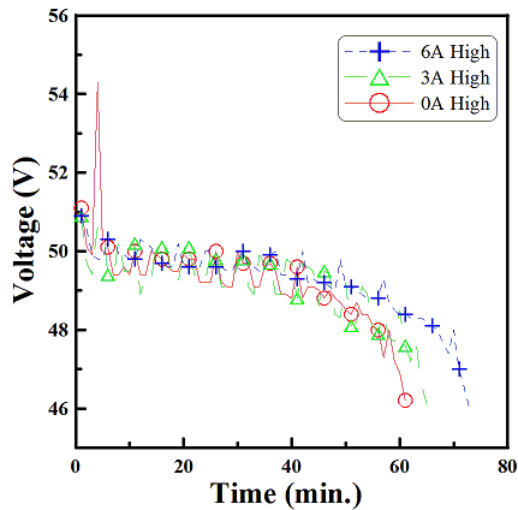


圖 3-15 高速測試之電壓與時間關係圖

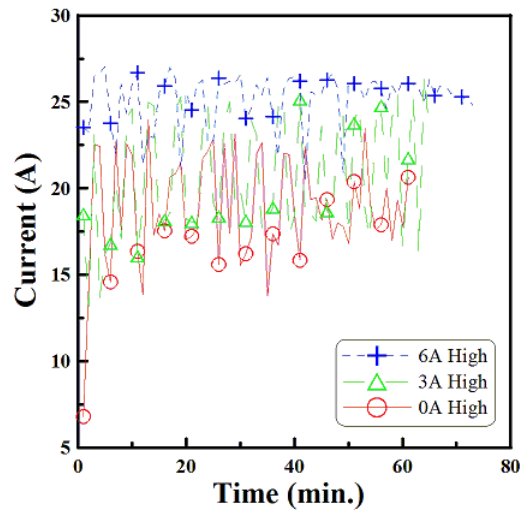


圖 3-16 高速測試之電流與時間關係圖

圖 3-17 為道路實測耐久高速測試之里程與時間關係圖，圖中顯示由 GPS 測得 6A、3A、0A 比較下，使用 6A 充電器 72 分鐘行走 45Km，3A 充電器在 65 分鐘行走 42Km，0A 在 62 分鐘行走 40Km，很明顯 6A 優於 3A 及 0A。圖 3-18 為道路實測耐久高速測試之時速與時間關係圖，圖中顯示當 0A 於道路實測時，

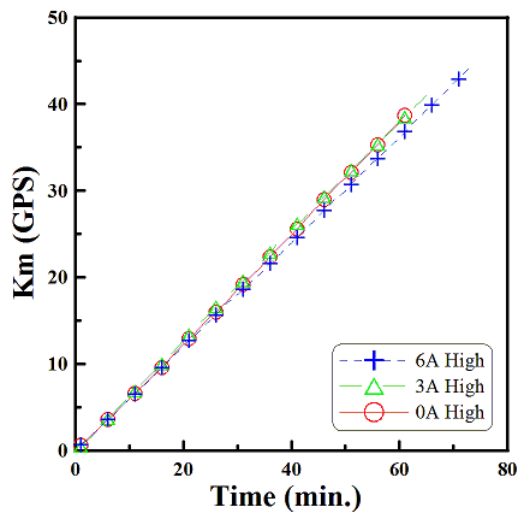


圖 3-17 高速測試之里程與時間關係圖

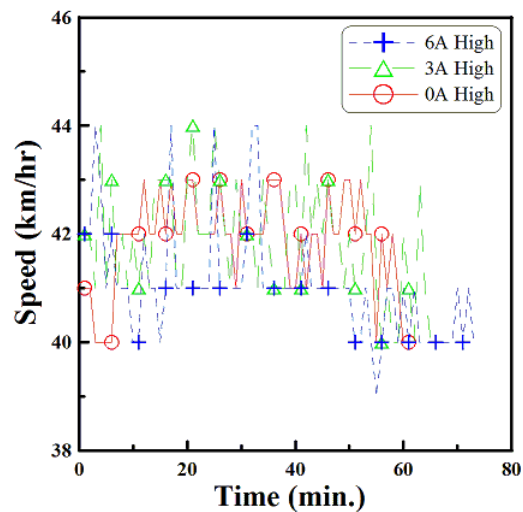


圖 3-18 高速測試之時速與時間關係圖

因路面車況緣故速度起起伏伏，最高時速達到 43Km/hr 最低 40Km/hr，但時間只維持到 60 分鐘，3A 最高速達到 44 Km/hr 最低 40Km/hr，維持時間在 60 分鐘左右，6A 最高速達 44Km/hr 最低 40Km/hr 維持時間為 72 分鐘，可得知 6A 優於 3A 及 0A。

#### 四、結論

本研究先將TGB Tapo二行程機車，修改為電動機車，再使用SHX1000發電機，將其與電動機車串聯，研發出一台增程式電動機車。其結論如下所示：

- 1.本實驗使用電動機車低速檔在底盤動力計上進行耐久測試，其結果顯示：使用3A充電器，時速可達33km/hr，可增程15km，發電機耗油量為511cc，使用6A充電器，可增程45km，發電機耗油量為944cc。
- 2.本實驗使用電動機車高速檔在底盤動力計上進行耐久測試，其結果顯示：使用3A充電器，時速可達43km/hr，可增程2km，發電機耗油量為265cc，使用6A充電器，可增程5km，發電機耗油量為375cc，
- 3.本實驗使用電動機車低速檔進行道路實測耐久測試，其結果顯示：使用3A充電器，時速可達33km/hr，可增程10km，使用6A充電器，可增程40km。
- 4.本實驗使用電動機車高速檔進行道路實測耐久測試，其結果顯示：使用3A充電器，時速可達42km/hr，可增程2km，使用6A充電器，可增程5km。

#### 五、參考文獻

1. Hsu J. S., "Direct control of air-gap flux in permanent-magnet machines," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15 4, pp.361-365, Dec. 2000.
2. Bose B. K., Patel N. R., and Rajashekara K., "A neuro-fuzzy-based on-line efficiency optimization control of a stator flux-oriented direct vector-controlled induction motor drive," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44 2, pp.270-273, April 1997.
3. Kawamura A., Hoshi N., Kim Tae Woong, Yokoyama T., and Kume, T. "Analysis of anti-directional-twin- rotary motor drive characteristics for electric vehicles," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44 1, pp.64-70, Feb. 1997.
4. Sakai S., Sado H., and Hori Y., "Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors," IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, Vol. 4 1, pp.9-16, March 1999.
5. Rizzoni G., Guzzella L., and Baumann B. M., "Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 4 3, pp.246-257, Sept. 1999.
6. Caumont O., Moigne P. Le, Rombaut C., Muneret X., and Lenain P., "Energy gauge for lead-acid batteries in electric vehicles", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15 3, pp.354-360, Sept. 2000.
7. Chan C.C., and Chau K. T., "An Overview of Power Electric Vehicles," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, pp.3-13, 1997.

8. Toyota Motor Corporation, Care for the Earth-Toyota Automotive Eco-Technology, 1997.
9. Honda World News Press Release, "Honda Announces the New Civic Hybrid Sedan - The World's Most Fuel-Efficient 5-Seater Production Gasoline Vehicle," 2001.
10. <http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/pressrelease/corporate/detail593.html>
11. <http://www.hybridbuzz.com/nissan-tino-hybrid-car.htm>
12. <https://www.chevrolet.co.uk/cars/volt/>
13. <http://www.opel.com/microsite/ampera/#/home>
14. [http://www.audi.com/com/brand/en/tools/news/pool/2010/03/audi\\_a1\\_e-tron\\_elect ric.html](http://www.audi.com/com/brand/en/tools/news/pool/2010/03/audi_a1_e-tron_elect ric.html)
15. [http://mm.asia-info.net/mm\\_InfoBlog\\_Detail.aspx?id=9443](http://mm.asia-info.net/mm_InfoBlog_Detail.aspx?id=9443)

## 徵稿說明

下列專欄，歡迎大家耕耘：

1. 專題研究--分為五大方向，分別為「能源發展與應用」、「動力設施與燃燒」、「防火與消防」、「燃燒科技發展」、「空污控制與生物效應」。
2. 燃燒科技交流--燃燒應用技術、新技術或新產品介紹、疑難討論與經驗交流、國內外相關研究機構介紹、國內外相關學會、機構、團體之動態等，相關研討會論文摘要或全文、燃燒現象照片等。
3. 燃燒論壇--開放討論基本燃燒現象、基本燃燒原理及燃燒詞彙定義等。
4. 即時資訊--政府相關政策、國內外相關科技資訊、研討會或相關活動訊息等即時之動態資訊。能源委員會、環保署、國科會、消防署等相關機構委託執行計畫之研究成果介紹等。
5. 其他--讀者意見迴響交流與燃燒相關之其他任何訊息或稿件。

來稿請寄本會【[電子信箱](#)】或

【70101 台南市大學路1號，航空太空工程學系 陳維新 教授 收

E-mail：vwhchen@gmail.com；Tel：（06）2757575 ext. 63600】

## 投稿須知

1. 文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文文字之字型應為標楷體字，英文文字字型應為Times New Rome。
2. 題目：應力求簡潔且能充分表達論文之重要概念，請附中、英文題目各一式，英文題目請附於中文題目之後。
3. 作者：請附上中、英文之作者姓名、服務單位及職稱。作者之服務單位及職稱請以附註之方式書寫同一頁之末端，若作者為兩個人以上者，請以不同之符號標示之。
4. 摘要：以簡明扼要之方式表達論文之內容。無論以中文或英文撰寫，一律附上500 字以內之中、英文摘要各一份。英文摘要請置於中文摘要之後。
5. 字型大小：題目以16pt 黑體字，摘要、前言、文章內容之標題請以14pt 黑體字，作者介紹及文章內容以12pt 標楷體字書寫之。
6. 關鍵字：中英對照關鍵字，最多以5 個為限。
7. 圖表說明：圖說與表說應統一使用中文或英文，圖標題應在圖之下方；表標題應在表之上方。

8. 參考文獻：（列於正文之後，書寫時請依於文章中出現之先後順序排列）  
Combustion Quarterly Vol. 52 17 No. 2 May 2008
- (1) 書籍：作者，書名，出版社，出版地，頁數，年。  
中文如：柯清水，*石油化學概論*，正文書局，臺北，pp. 183-191，1992。  
英文如：Owen K, Coley T. *Automotive Fuel Reference Book*, 2nd ed., Society of Automotive Engineers, pp. 551-587, 1997.
- (2) 期刊論文：作者，篇名，期刊名稱，年，卷期，頁數。  
中文如：葉江榮，鍋爐高溫腐蝕，*台電工程月刊*，第276期，pp. 10-18，1979。  
英文如：Kummer JT. Catalysts for Automobile Emission Control, *Progress in Energy and Combustion Science*. 1981;6:177-199.
- (3) 研討會：作者，篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。  
中文如：萬皓鵬，汽電共生系統效率提升技術，*2002 汽電共生系統技術研討會論文集*，經濟部能源委員會，pp. 84-91，91年4月。  
英文如：Law CK. Dynamics of Stretched Flames, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1381-1402, 1988.

燃燒季刊 2014年五月

發行單位：中華民國燃燒學會

發行人：施聖洋

總編輯：陳維新

副總編輯：江金龍、江鴻龍、侯順雄、蔡建雄（依姓氏筆畫排列）

編輯：石心怡、朱力民、吳志勇、吳明勳、吳耿東、洪榮芳、

姜庭隆、郭振坤、黃俊賢、陳建中、梁智創、楊授印、

楊進丁、管衍德、趙裕、蔡欣倫、劉昭忠、劉國基、

蘇崇輝（依姓氏筆畫排列）

秘 書：黃信閔

發行地址：32001桃園縣中壢市中大路300號

國立中央大學工學院能源研究中心

電 話：(03) 4267354 ; 4267391

中華民國八十一年十二月創刊

中華民國一百零三年五月出版

局版台誌號第玖玖零捌號

