

醫院空調箱應用 UVGI 系統結合高效袋式濾網技術改善室內空氣品質 之成效性探討

洪明瑞¹ 施耀筌² 曾雍翔² 蔡定翰²

¹明志科技大學環境與安全衛生工程系暨環境與資源工程研究所助理教授，台灣新北市

²明志科技大學環境與安全衛生工程系暨環境與資源工程研究所碩士班研究生，台灣新北市

摘要 本文針對一空氣中具有總細菌數及粒狀污染物(PM_{2.5}與PM₁₀)偏高並常引發民眾抱怨之醫學中心，利用紫外線殺菌照射法(UVGI)結合高效袋式濾網的淨化技術，透過輻射強度與照射劑量的計算，將高輻射強度($I_1 \geq 40,000 \mu W/cm^2$)UVC燈裝設在AHU空調箱內部使其直接照射冷卻盤管與濾網等元件之表面，同時藉由UVC燈設置前後空氣中總細菌數、空調箱以及出風口內部表面細菌數之取樣與分析，綜合評估UVGI結合高效袋式濾網技術改善與淨化室內空氣品質的實質成效。初步結果顯示：(1)空調箱內若僅裝設UVGI系統，對於空氣中總細菌數的改善能力，初期之淨化效果尚可預期，滅菌效率約可達63.64%~67.26%左右；但長期的滅菌功效可能因光能衰減等現象而逐漸降低；(2)空調箱內裝設UVGI系統前後，空調箱與風管出口內部表面單位面積的細菌數由TNTC的情形降低至相對低的情形，顯示高效的UVC燈對於空調箱與風管出口內部表面的清潔作用，亦能同時發揮一定的淨化成效；(3)空調箱內合宜濾網等級的組合與選用，對於室內空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})的降低或移除可發揮決定性的影響；以及(4)空調箱內設置UVGI結合高效袋式濾網的淨化技術，對於抑制空氣中總細菌數以及改善PM₁₀與PM_{2.5}粒狀污染物，整體而言可發揮即時且穩定的淨化效果，不失為可提供作為改善總細菌數以及粒狀污染物濃度過高場所的有利選擇方案。

關鍵詞 中央空調 紫外線殺菌照射法(UVGI) 高效袋式濾網 室內空氣品質

Research on the effectiveness of central air-conditioning application UVGI system combined with efficient bag-filter purification technology to improve indoor air quality for hospitals

Hung Ming-Jui¹ Shi Yao-Quan² Zeng Yong-Siang² Tsai Ting-Han

¹Assistant Professor, Department of Safety, Health and Environmental Engineering, Ming Chi University of Technology, New Taipei City, Taiwan.

²Graduate students, Department of Safety, Health and Environmental Engineering, Ming Chi University of Technology, New Taipei City, Taiwan.

ABSTRACT The focus of this article for a medical center, because the air has a higher bacteria and particulate pollutants (PM_{2.5} and PM₁₀) and often lead people to complain, ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) combined with efficient bag-filter purification technology is applied, at the AHU set high radiation intensity ($I_1 \geq 40,000 \mu W/cm^2$) of UVC light to direct exposure to the cooling coil and filters and other components surface, which receives the radiation energy also calculated. In addition, airborne bacteria, air box interior surfaces bacteria, and vent interior surface bacteria, etc. by UVC lamp set before and after sampling and analysis, evaluate UVGI technology to improve and purify the indoor air quality of the results. Preliminary results show that: (1) If only UVGI systems installed in the air box, it is for the improvement of the ability of bacteria in the air, the initial effect of purification can also be expected, sterilization efficiency up to about 63.64% ~ 67.26%, However, probably because of the phenomenon of light energy attenuation, its long-term effectiveness of the sterilization is gradually reduced. (2) UVGI system settings before and after in the air box, the number of bacteria per unit area of its inside surface has been reduced from the original TNTC state to a relatively low level. This shows high-energy UVC lamp for cleaning effect of interior surface in air box and duct outlet, can also play a while purifying effect. (3) Appropriate combination and selection of filter level in the air chamber, which for particulate pollutants (PM_{2.5} and PM₁₀) in indoor air can be reduced or removed exert a decisive influence. (4) AHU inside set UVGI combined with efficient bag filter purification technology, for the suppression of bacteria in the air and to improve the PM₁₀ and PM_{2.5} particulate pollutants, can play an immediate and stable purifying effect. Overall, the improved

efficiency can be supplied as improved high concentrations of bacteria and particulate pollutants favorable options.

Key words: Central air-conditioning, ultraviolet germicidal irradiation (UVGI), efficient bag-filter, indoor air quality.

1. 前言

根據感染管制的醫學報告指出，醫院中以診療室(clinic)、開刀房(operating room)以及病房等場所造成的院內感染機率較高，其原因與出入病患複雜，各場所病房使用率高、長久停留、須要高度消毒處理等現象有關。然醫療院所中，一般除了開刀房以及加護病房有採取較為嚴格的感染管制措施外，診療室與病房等場所普遍並未進行具體的管制，更何況民眾出入頻繁的藥局、掛號櫃檯、批價收費處等空間。此外，國內相關研究資料亦顯示，醫院病房的空氣品質約有 60% 與其空調系統有關(如：是否有新鮮的空氣循環、通風換氣次數、單位時間的通風量等)，20% 與室內空氣污染物有關(如：裝修建材、事務性機具、清潔產品的使用等)，20% 則與其他環境參數有關(如：溫度、相對濕度、風速等)(李萬成，1999)。因此，欲降低醫院內的感染並確保病患與出入醫院民眾的健康，除了要有良好的醫療與護理機制外，如何改善室內空氣品質(indoor air quality, IAQ)，將是醫療院所必須慎重面對並努力的課題。

2. 相關文獻回顧

2.1 紫外線之殺菌原理、照射劑量與影響成效之因素

UVC 波長短，光量子能量大(95~125kcal/mole)，生物效應顯著且對微生物破壞力強。當空氣中微生物遇到該波段時，UVC 會穿透其細胞膜與細胞核，細胞中的核酸(nucleic acid)、嘧啶(pyrimidine)、嘌呤(purine)與蛋白質(protein)將強烈吸收該波段能量而產生化學變化，迫使其間的分子鍵被打開、斷裂，進而失去複製能力與活性。換言之，UVC 之光波能量殺死微生物主要係針對脫氧核糖核酸(desoxyribonucleic acid, DNA)的反應，引起 DNA 鍵上兩個鄰近的胸腺嘧啶分子形成胸腺嘧啶二聚體(thymine dimers)「T=T」，迫使微生物不能複製而死亡(Kowalski, 2009)。另外，UVC 在核酸內所引起的光水合反應(light hydration reaction)以及核酸與蛋白質相互作用時的光架橋(light bridge)等反應，也存在某種程度的影響(Kowalski et al., 2000；Kowalski, 2009)。

紫外線之殺菌效率主要取決於三大因素，其

一為燈具能否精準地輸出 DNA 易於吸收的 260~265nm 之 UVC 波長(以低壓汞燈產生的 253.7nm 波長最為接近此波段)(Boyce, 2003)所示；其二為燈具本身輻射強度(radiation intensity)的大小；其三則為其對於微生物的照射劑量(radiation dose)是否足夠等。其中，照射劑量 $I_D(\mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2)$ 的大小為燈具輻射強度 $I_r(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$ 與照射時間 $t(\text{sec})$ 的乘積。由於微生物在紫外線照射下的感受性(susceptibility)或微生物對於 UVC 的敏感性(sensitivity)並不同(Kowalski et al., 2004)，大部分的微生物受到 UVC 照射後的存活率(survival)主要呈現兩階段的鈍化曲線(inactivation curves)反應，第一階段為快速衰減曲線，以易損害為主；第二階段為則緩慢衰減曲線，以抵抗性為主(Kowalski et al., 2000)。因此，對於微生物所提供的 UVC 照設劑量若不足以使其有效地殺滅時，部分的微生物將可依靠可見光的光能進行 DNA 的修補而產生「光再活化現象(photoreactivation)」(Kowalski, 2009)。

影響紫外線殺菌成效的因素眾多，主要包含空氣中的溫度、流速、相對濕度、懸浮微粒等環境條件(ARTI, 2002；Philips, 2005；IUVA, 2005；Kowalski, 2009)以及 UVC 燈管對氣流的佈設方式(Kowalski et al., 2000)與燈管表面的冷點溫度(cold spot temperature)等(CIE, 2003)。因此，在實務應用上，必須根據場址現況與環境條件進行整體的規劃與設計，同時考量人體曝露劑量的界限值(Boyce, 2003；Martin Jr. et al., 2008)，方能獲得可靠且安全的淨化成效。

2.2 UVGI 於空調箱內的設置方式

UVGI 系統最早應用於醫院的控制，約可追溯至 1930 年代初期，但長期以來並未受到衛生或環保主管機關的正式認可，直到 1994 年，美國疾病防治中心(Centers for Disease Control, CDC)才公認紫外線可以有效的控制結核病，可用於抵抗不斷流行全球傳染結核病疫情(CDC, 2005)；同時，約在 2003 年左右，美國疾病防治中心(CDC)再進一步認可紫外線系統的效益，可用於醫院內的上層空間及風管系統上，藉以加強空氣淨化的效果(CDC, 2003)。

UVGI 裝設於中央空調系統之空調箱內部，

目的係讓 UVC 燈直接照射冷卻盤與濾網等元件，對期間流動與停留的氣體進行全面性的消毒作用，其機制與布設方式如圖 1(Menzies et al., 2003) 及圖 2(ASHRAE Technical Committees, 2011) 所示；或使用於輕鋼架天花板內以及出、回風口之上層空間 UVGI 系統(upper-room UVGI system)，將室內上部空間視為一密閉消毒櫃，消毒機制如

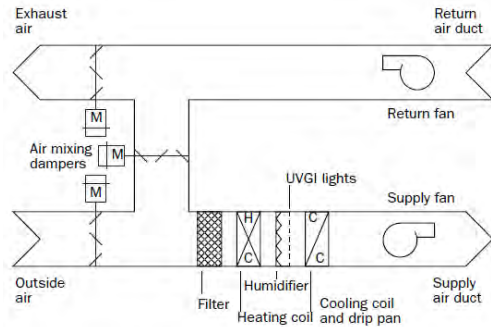


圖 1 UVGI 應用於 HVAC 示意圖

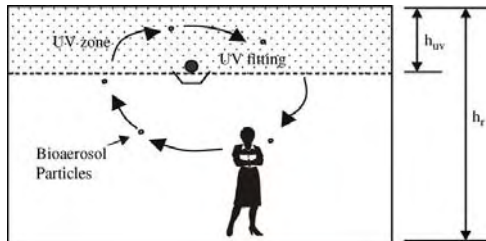


圖 3 上層空間 UVGI 系統示意圖

2.3 UVGI 結合高效袋式濾網淨化技術

空調箱內若僅以濾網進行過濾，將存在(1)停留於濾網上的微粒與微生物，可形成有利於微生物大量滋長的環境；(2)濾網上的微生物排洩物將產生發霉及異味；(3)濾網上的部分微生物(可變形體)為暫時性的停留，有再滲透的問題；以及(4)骯髒的濾網有增加風阻等不利於節能減碳等問題。反之，空調箱內若僅設置 UVGI 系統，亦存在(1)輻射強度隨低溫、高濕、微粒遮蔽而降低；(2)輻射強度隨時間光衰；(3)風速過快迫使對微生物的照射劑量不足；以及(4)微生物光再活化現

象等問題。因此，UVGI 結合高效袋式濾網淨化技術即可互補缺失，利用 UVC 燈殺滅停留於濾網上的微生物，提昇空氣品質的淨化效果，同時降低濾網更換頻率；而濾網的設置則可保護 UVC 燈免於微粒撞擊，降低燈管粉塵黏附及處理微生物的負荷量，進而提高對於氣流的滅菌效能。換言之，採用 UVGI 系統結合高效袋式濾網淨化技術，可發揮較為穩定的協同促進作用 (synergistic)，如表 1 所示(Kowalski et al., 2003a；Kowalski et al., 2003b)。

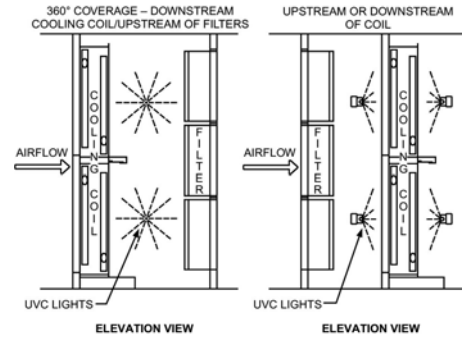


圖 2 UVGI 空調箱內淨化佈設之方式

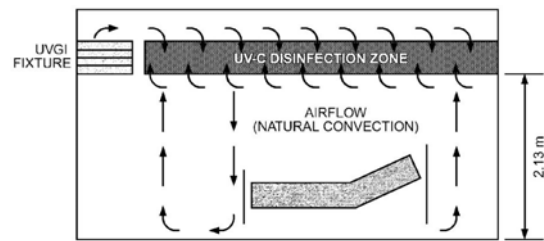


圖 4 醫院病房應用上層空間 UVGI 系統示意圖

表 1 對於生物武器製劑(Biological weapons agents)的移除效率

Pathogen	FILTRATION AND ULTRAVIOLET GERMICIDAL IRRADIATION REMOVAL RATES, FRACTION						
	MERV 6 URV 6	MERV 7 URV 7	MERV 8 URV 8	MERV 10 URV 10	MERV 13 URV 13	MERV 15 URV 15	MERV 16 URV 16
Influenza	0.10	0.12	0.19	0.35	0.84	0.97	0.988
Smallpox	0.09	0.11	0.17	0.37	0.87	0.98	0.994
<i>C. burnetti</i>	0.09	0.12	0.18	0.38	0.88	0.99	0.995
<i>R. prowazeki</i>	0.05	0.06	0.10	0.15	0.58	0.86	0.888
<i>L. pneumophila</i>	0.14	0.19	0.29	0.55	0.97	0.9996	0.9999
<i>M. tuberculosis</i>	0.15	0.19	0.30	0.53	0.97	0.9997	0.9999
<i>C. diphtheria</i>	0.11	0.15	0.25	0.35	0.91	0.997	0.998
<i>S. pneumoniae</i>	0.27	0.35	0.50	0.83	0.9996	1.0000	1.0000
<i>R. rickettsii</i>	0.12	0.16	0.28	0.33	0.92	0.998	0.999
<i>N. asteroides</i>	0.16	0.22	0.37	0.41	0.97	0.9998	0.9999
<i>Bacillus anthracis</i>	0.16	0.22	0.37	0.41	0.97	0.9998	0.9999
<i>H. capsulatum</i>	0.33	0.44	0.67	0.74	0.9997	1.0000	1.0000
Botulinum toxin	0.35	0.43	0.67	0.73	0.9997	1.0000	1.0000
<i>B. dermatitidis</i>	0.50	0.61	0.83	0.95	1.0000	1.0000	1.0000

Note: Minimum efficiency reporting value (MERV); ultraviolet germicidal irradiation rating value (URV).

UVGI 系統結合高效袋式濾網淨化技術在歐美等先進國家，經常被應用於作為免疫建築的主要組成單元。2001 年 911 事件後，美國各地陸續遭到「炭疽信件(anthrax mailing)」攻擊，為了保護建築物免於生物性的恐怖襲擊，免疫建築技術(immune building technology)的應用受到更為普遍的關注，稀釋通風、過濾以及 UVGI 的綜合使用，即為目前最為可行且具成本效益的主要方案(USACE, 2001)。

UVGI 系統結合高效袋式濾網淨化技術在免疫建築上的應用，在設置標準與經驗上，已有諸多機構與研究單位提出建議，如：美國採暖製冷和空調工程師學會(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)所編訂的「2011 ASHRAE HANDBOOK- HVAC Application (SI)-Chapter 60 Ultraviolet Air and Surface Treatment」(ASHRAE Technical Committees, 2011)；國際紫外線協會(International Ultraviolet Association, IUVA)所編訂的「Guideline for Design and Installation of UVGI In-Duct Air Disinfection Systems」(IUVA, 2005)；美國陸軍工程兵部隊(United States Army Corps of Engineers, USACE)所編訂的「Protecting buildings and their occupants from airborne hazards」(USACE, 2001)；美國國防部國防高等研究計劃署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)所提出的「DARPA's Immune Building Program」(DARPA, 2002)；以及美國 Air & Water 公司所編訂的「UVGI for Cooling Coil Disinfection, Air Treatment, and Hospital Infection Control」(Kowalski, 2011)等。

3. 污染物檢測作業與IAQ改善規劃

3.1場址現況與問題點

研究場址為一大型醫學中心(急性病床 500 床以上，至少能提供 22 科之診療服務並通過評鑑以及教學醫院評鑑標準)。其醫學大樓大廳(含：掛號收費處、領藥處、穿堂)之樓地板面積約為 L53.34m×W34.29m=1,829.03m²，平面配置如圖 5 所示。由於就診民眾數量多(如表 2 所示)，加以靠近高速公路且四周交通流量大等因素，大廳空氣中的總細菌數、粒狀污染物(PM_{2.5} 與 PM₁₀)常有超過「室內空氣品質標準」(即：細菌 ≥ 1,500CFU/m³；PM₁₀ ≥ 75ug/m³；PM₁₀ ≥ 35ug/m³)並引發民眾抱怨等問題，此亦成為本研究之主要改善標的。

3.2就診型態及通風條件

場址(醫學中心)週一至週五提供上、下午門診，週六僅提供上午門診，上午門診時段為 08：30~11：30；下午門診時段則為 13：30~16：30，並彈性視當天就診門眾多寡而適時延長。至於，場址大廳(含：掛號批價處、領藥處、穿堂)則採兩部全氣式中央空調系統(air handing unit, AHU)的型式(如圖 10 中的 AHU1 與 AHU2)引入戶外新鮮空氣，並與室內回風口的循環空氣於空調箱內進行混風、過濾以及冷卻後，再藉由天花板送風軟管之出風口往大廳輸送。

3.3UVGI系統結合高效袋式濾網淨化技術

本研究綜合考量場址空調系統之現況、空間使用型態以及就診作業時段等各項條件，並經多次研討與審慎的評估後，藉助美國 Steril-Aire 公司(曾雍翔，2013)與美國 Air & Water 公司(Kowalski, 2011)的經驗；原則上，對於粒狀污染物以 ASHRAE Standard 52.2(1999)濾網等級改善可獲取良好的效果，而對於微生物以 UVC 低溫

型強力紫外線燈進行處理則可發揮良好的功效。因此，據以採用 UVGI 結合高效袋式濾網(摺疊式濾網+袋式濾網)淨化技術對場址空氣中的細菌、

PM₁₀ 與 PM_{2.5} 等污染物進行改善。茲將考量要點與規劃方式，分別探討如下。

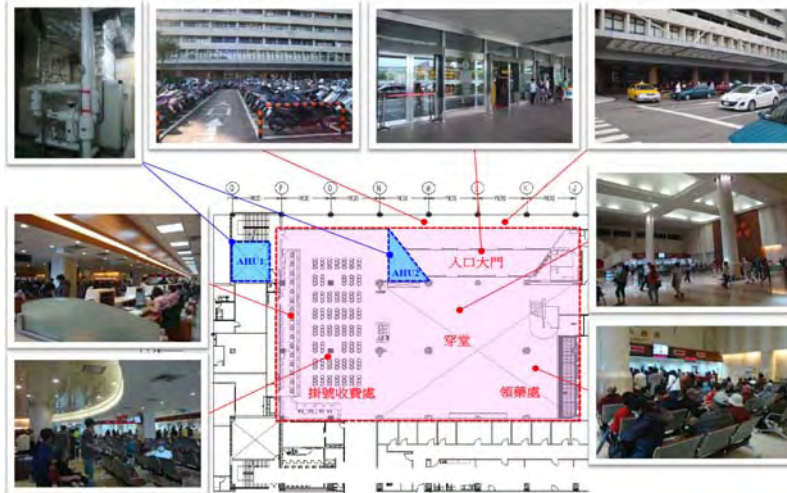


圖 5 場址(醫學大樓)大廳(含：掛號批價處、領藥處、穿堂)平面圖

表 2 場址就診民眾流量概況

年/月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
2011	176,155	133,976	201,598	172,732	189,476	185,060	183,731	200,534	185,806	182,696	190,229	195,248
2012	152,058	184,022	203,504	181,969	201,921	187,641	198,425	203,476	185,153	—	—	—

3.3.1 高效袋式濾網的選用依據

考量對於粒徑的過濾能力、效率以及成本等因素，本研究採用兩道(或兩級)濾網設計，第一道(或一級)濾網選用 ASHRAE Standard 52.2 MERV 8 作為過濾較大顆粒之微粒並保護冷卻盤管、風扇葉片、皮帶以及 UVC 燈管；第二道(或二級)濾網則選用 MERV 13 作為過濾較小的微粒以及部分的微生物(細菌)等用途。其中，MERV 8 等級為摺疊式濾網，以過濾 3.0~10.0 μm 粒徑為主；MERV 13 等級為袋式濾網，以過濾 0.3~1.0 μm 粒徑為主。

3.3.2 強效 UVGI 系統之選用與考量要點

UVGI 系統在 AHU 中的應用雖已有逐漸受到重視與應用的趨勢，但並非均能獲得令人滿意的成果，甚至不乏失敗的案例，究其因乃在於：(1)輻射波段不完美或不正確；(2)輻射強度低或不足；(3)燈管與氣流之配置方式不當；(4)UVC 燈對於微生物的照射時間過短或照射劑量不足；(5)燈管本身輻射強度的光衰問題；(6)因低溫、潮濕而大量影響輻射強度的輸出；(7)燈管本身過熱、

耗電及易脆裂等缺失；以及(8)同時產生的 185nm 臭氣波長造成 AHU 內部元件之氧化問題等。因此，在選用 UVC 燈具時，上述因素均必須審慎考量並加以克服，同時根據改善場址的現況與特性，進行專業的系統性評估與設計，方能確保 UVGI 系統的可靠性並發揮令人滿意的淨化效果。

基於上述之考量，UVC 燈具選用本研究團隊自行開發的產品，其基本規格與特性如表 3 所示，圖 6 與圖 7 分別為其輻射強度之輸出結果，而圖 8 則為其光譜圖(spectrum)分佈。整體而言，本研究自行開發之 UVC 燈具有下列特點：(1)具高效輻射強度輸出能力，燈管表面輻射強度 $I_1 \geq 40,000 \mu W/cm^2$ ；(2)低耗電 20W(15~18W)，有利於節能減碳；(3)燈管壽命長且具防潮與防塵能力，可有效降低維修與更新成本；(4)無衍生臭氣造成內部元件氧化問題；(5)低溫下仍保有強效之輻射強度輸出，可用於低溫保鮮等食品滅菌場合；(6)燈頭與配件表面具反射能力，有助提昇輻射強度；以及(7)燈管尺寸小，有利於應用場合之客製化並取得較為均勻的輻射強度場等。

表 3 本研究用 UVC 燈管之規格與特性

項次	品名	規格及說明
01	電壓/耗電/色温	110V；50~60Hz；20W(15~18W)；淡藍色。
02	輻射波段/強度	波長 253.7nm；43,890 μ W/cm ² ~45,425 μ W/cm ²
03	適用燈泡/壽命	XH-20 UVC 253.7nm 紫外線殺菌純石英燈泡；8,000 小時。
04	燈管尺寸與規格	燈總長：18.55cm；燈頭直徑： Φ 5.0cm；燈管長度：11.65cm；單一燈管直徑： Φ 1.1cm；等效燈管直徑： Φ 2.6cm；燈頭規格：E26、E27；適用電器安規：UL、CE、CNS、CCC、FCC。
05	消毒時間與範圍	小空間約 20 分鐘，大空間約 1 小時，約 8 坪(25 平方公尺)。
06	防潮性	具防潮性，可於潮濕環境中使用，通過 IP 65(IEC 60598-1 Edition 7.0: 2008 第 9 節)防塵防水認證測試。
07	臭氣衍生性	無(初始濃度 0.005mg/m ³ ；4 小時濃度 0.009mg/m ³)。
08	低溫影響	於零下 2℃ 的冰櫃中，燈管表面之輻射強度並無衰減情形。
09	警告	非照明用燈，請小心使用，勿直接(長時間)照射人體、植物、動物，假使不慎照射過久致使不適，請速就醫。

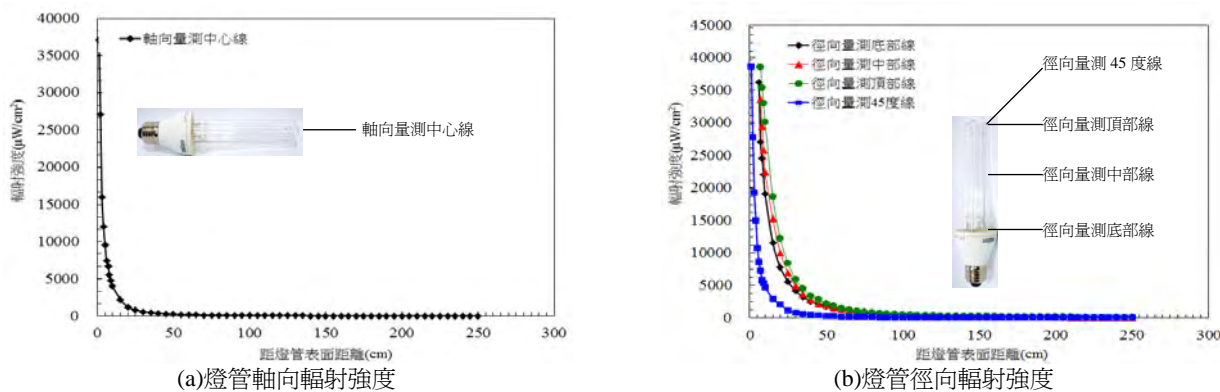


圖 6 本研究用 UVC 燈管之輻射強度測試結果

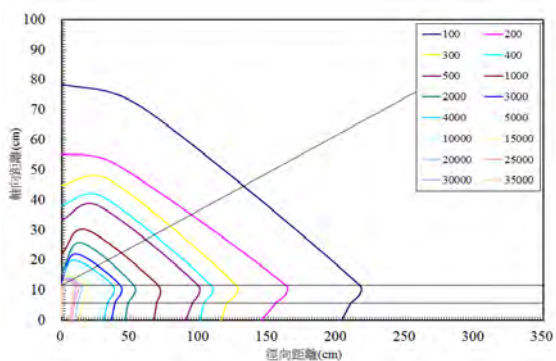


圖 7 本研究用 UVC 燈輻射強度分佈圖

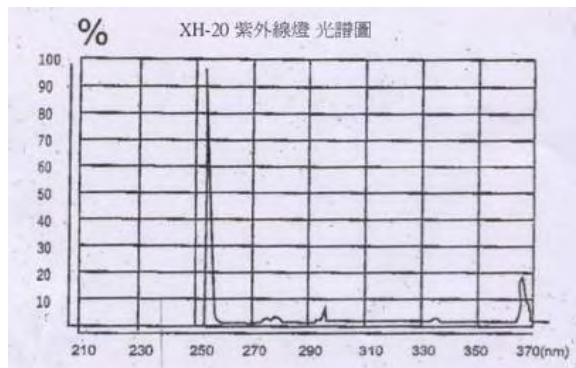


圖 8 本研究用 UVC 燈光譜圖

圖 7 顯示 UVC 燈距燈管表面 50cm 之輻射強度 $I_1 \geq 2,000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，而距燈管表面 100cm 之輻射強度 $I_1 \geq 400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，此 253.7nm 波長的輻射能力可充分滿足中國 2008 年「WS/T 367-2012 醫療機構消毒技術規範」 $\geq 70\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的要求以及美國 Air & Water 公司「UVGI for Cooling Coil Disinfection, Air Treatment, and Hospital Infection Control」 $\geq 50\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的標準(Kowalski, 2011)。

3.3.3 設置情形與滅菌效能之檢討

UVGI 系統結合高效袋式濾網(一道 MERV 8 加上一道 MERV 13)於 AHU 內之規劃與配置情形，如圖 9 所示，包含：(1)空調箱內部淨尺寸：長×寬×高(2.7m×1.76m×1.42m)；(2)冷卻盤管與濾網斷面積： $1.7\text{m} \times 1.42 = 2.414\text{m}^2$ ；(3)UVC 燈設置數量：10 支(4 支照射冷卻盤管，6 支照射濾網)；

(4)上、下排燈分別距箱頂與箱底表面 37cm，上、下排燈間距離 68cm；(5)單一 UVC 燈於冷卻盤管上平均照射面積： $2.414 \div 4 = 0.60\text{m}^2$ ；以及(6)單一 UVC 燈於濾網上平均照射面積： $2.414 \div 6 = 0.40\text{m}^2$ 等，圖 10 所示即為場址空調箱內 UVC 燈之開啓情形。至於，AHU 空調箱內之運作條

件，如：風速、溫度、相對濕度、風量以及壓差等物理量，進一步測定如表 4 所示(由場址機電工程師提供)，作為氣流進入空調箱後接受 UVC 輻射強度照射時間、距離以及照射劑量計算之依據。

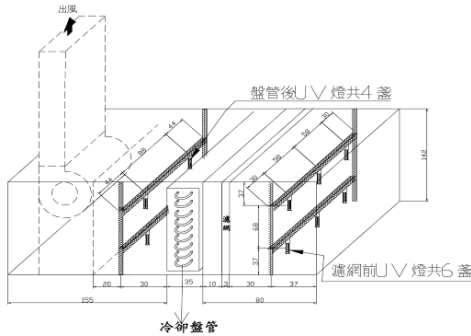


圖 9 場址 UVGI 系統與結合高效袋式濾網配置圖

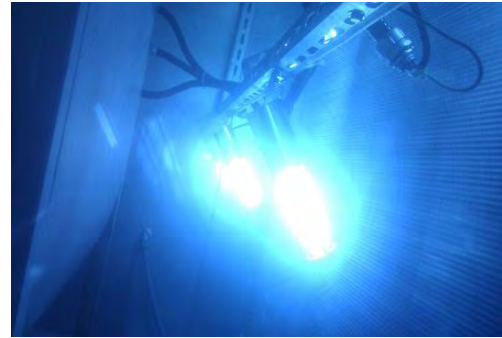


圖 10 場址空調箱內 UVC 燈之開啓情形

配合空調箱內部元件的構造型式與空間大小，UVC 燈的照射位置分別位於濾網上游側及冷卻盤管下游側(如圖 9 所示)；因此，空調箱內新鮮外氣(outside air)與回風(return air)混合後經過濾網過濾期間受到 UVC 燈之照射劑量、過濾並通過冷卻盤管製冷後之氣流在通過風機送出期間受 UVC 燈之照射劑量以及箱體內部元件表面本身受到之照射劑量，分別計算如下表 5 及表 6 所示。由於紫外線在空間中傳遞過程並不會相互干擾，並能於接觸時具有光能量疊加的效應(superposition of light energy)，再加以照射表面反

射材質的間接貢獻，迫使氣流真正受到的輻射強度往往高於燈管本身的直接貢獻(Kowalski et al., 2004)。然而，因其計算較為複雜且須考量輻射角之修正(Kowalski et al., 2004)等因素，故本文採取較為保守的估計，忽略紫外線光能疊加及反射能量的貢獻，直接利用 UVC 燈輻射強度分佈圖(圖 7)、場址 UVGI 系統與結合高效袋式濾網配置圖(圖 9)以及 AHU 空調箱及風管內之流體參數(表 4)的資料加以計算。

表 4 AHU 空調箱內之流體參數(UVC 殺菌燈安裝前)

檢測項目	量測次數				備註
	第一次	第二次	第三次	第四次	儀器測棒名稱
空調箱盤管前風速(m/s)	2.16	1.95	2.12	2.05	熱線式風速測棒(量測風速、溫度)
空調箱盤管前溫度(°C)	23.92	23.54	23.80	23.40	熱線式風速測棒(量測風速、溫度)
空調箱盤管後風速(m/s)	1.52	1.76	1.65	1.91	熱線式風速測棒(量測風速、溫度)
空調箱盤管後溫度(°C)	17.40	17.84	17.30	17.00	熱線式風速測棒(量測風速、溫度)
空調箱盤管前後壓差(Pa)	133.20	126.80	124.80	131.40	壓差軟管
空調箱濾網前溫度(°C)	24.60	24.54	24.56	23.70	環境 IAQ 專用測棒(量測溫、溼度)
空調箱濾網前相對濕度(%)	77.16	77.04	77.06	74.76	環境 IAQ 專用測棒(量測溫、溼度)
空調箱盤管後溫度(°C)	17.68	17.80	17.84	17.60	環境 IAQ 專用測棒(量測溫、溼度)
空調箱盤管後相對濕度(%)	94.18	95.52	96.00	94.62	環境 IAQ 專用測棒(量測溫、溼度)

表 5 通過空調箱濾網與冷卻盤管氣流之照射劑量估算

區段	離燈管最近距離之輻射強度($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	離燈管最遠距離之輻射強度($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	最遠照射距離(m)	照射範圍(m)	照射範圍平均輻射強度($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	風速(m/s)	照射時間(s)	區段照射劑量($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)
濾網照射區	43,890	4,528.99	0.37	0.67	24,209.50	2.16	0.31	7,504.95
冷卻盤管與風機照射	43,890	311.00	1.25	1.55	22,100.50	1.91	0.81	17,901.41

區							
---	--	--	--	--	--	--	--

註：1. 「照射範圍平均輻射強度」為「離燈管最近距離之輻射強度」與「離燈管最遠距離之輻射強度」兩者和之平均值。因 UVC 燈光照符合點光源理論，在離燈管表面約 50cm 左右的範圍內，其輻射強度與離燈管表面的距離成反比，並可近似於線性關係。
2. 「區段照射劑量」為「照射範圍平均輻射強度」與「照射時間(s)」之乘積。

表 6 空調箱體內部元件表面之照射劑量估算

區段	離燈管最近距離之輻射強度($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	離燈管最遠距離之輻射強度($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	最遠照射距離(m)	照射範圍(m)	照射範圍平均輻射強度($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	照射時間(s)	區段照射劑量($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)
濾網照射區	43,890	4,528.99	0.37	0.67	24,209.50	3,600	87,154,200
冷卻盤管與風機照射區	43,890	311.00	1.25	1.55	22,100.50	3,600	79,561,800

註：1. 「照射範圍平均輻射強度」為「離燈管最近距離之輻射強度」與「離燈管最遠距離之輻射強度」兩者和之平均值。因 UVC 燈光照符合點光源理論，在離燈管表面約 50cm 左右的範圍內，其輻射強度與離燈管表面的距離成反比，並可近似於線性關係。
2. 「區段照射劑量」為「照射範圍平均輻射強度」與「照射時間(s)」之乘積。
3. 「照射時間(s)」：保守假設 UVC 燈一天僅開啓照射 1 小時所能發揮之效益。

綜合表 5 與表 6 之照射劑量分析，無論通過空調箱氣流中的細菌或停留於空調箱內部元件表面的細菌，若比對一般消滅有機微生物所需劑量 ($\mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$) 與時間的要求 (Kowalski et al., 2004)，本場址 UVGI 系統之規劃與 UVC 燈之配置方式，通過濾網照射區與冷卻盤管與風機照射區之總時間 t 為 1.12 秒(0.31+0.81)、總滅菌或照射劑量 I_D 為 $25406.36\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ (7,504.95+17,901.41)，除少數頑抗的孢子狀(spore)細菌外，已可殺滅大多數之細菌，預期對於提高並改善場址的室內空氣品質，應可發揮良好之成效。

3.4 檢測時段、條件與目的

本研究有關檢測日期、採樣項目、AHU 空

調箱淨化條件以及檢測目的等之規劃，彙整如表 7 所示。先後分為三階段進行，第一階段在空調箱內未設置「UVGI 系統與結合高效袋式濾網」前，先求得場址的環境背景值，作為研判系統設置後是否具備改善效率之依據。第二階段則僅於空調箱內先增設 UVC 燈，作為研判空調箱內單獨使用 UVGI 系統時之淨化效益。第三階段再將原有的平板濾網拆除，改設置 MERV 8 摺疊式與 MERV 13 袋式等級的兩道濾網，作為研判空調箱內設置「UVGI 系統與結合高效袋式濾網」時之淨化效益。換言之，據此即可初步探討空調箱內未設置淨化系統(原一般平板濾網)、單獨使用 UVGI 系統以及 UVGI 系統與高效袋式濾網結合等三者淨化效果之差異。

表 7 檢測時段、條件與目的之規劃

階段	採樣項目	AHU 空調箱淨化條件	檢測目的
一	<ul style="list-style-type: none"> 大廳空氣中總細菌數、PM₁₀、PM_{2.5} 空調箱內內部表面細菌數 出風口內部表面細菌數 	<ul style="list-style-type: none"> 一般平板濾網(僅能去除 $\geq 10\mu\text{m}$ 之微粒) 	獲取「UVGI 系統與結合高效袋式濾網」設置前之環境背景值，作為研判系統設置後改善效率之依據與基準。
二		<ul style="list-style-type: none"> 一般平板濾網 UVGI 系統 	僅於空調箱內增設 UVC 燈，作為研判空調箱內單獨使用 UVGI 系統時之淨化效益。
三		<ul style="list-style-type: none"> MERV 8 與 MERV 13 等級濾網(原一般平板濾網拆除) UVGI 系統 	再於空調箱內增設 MERV 8 與 MERV 13 等級濾網，作為研判空調箱內設置「UVGI 系統與結合高效袋式濾網」時之淨化效益。

註：1. 每次進行檢測時均分為：早(早上 09：00~10：00)、中(中午 12：00~13：00)、晚(傍晚 15：00~16：00)。
2. 採樣項目尚包含環境條件：溫度、相對濕度、風速並記錄天候狀況。

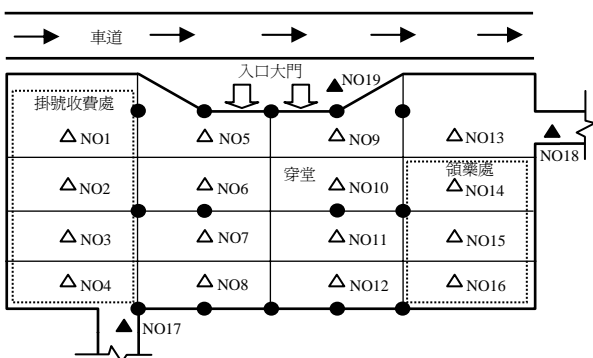
3.5 檢測位置之規劃

有關檢測位置與監測點的規劃原則，主要係

依據行政院環保署(2013)「室內空氣品質檢驗測定管理辦法」及參考美國環保署(U.S. EPA)「三合一

處理方法(the triad approach)」或稱「三合一環境污染調查方法」(環境採樣規劃設計, 2005)。的建議進行辦理。其中, 監測或採樣點選擇之主要原則, 應確實把握: 採樣儀器之架設應避開人潮及污染物產生源可能干擾之位置(如設備或冷氣的出口等), 如無法避免時, 應選擇受干擾影響最小之處進行取樣。

檢測位置採棋盤平均分佈的方式規劃, 期能合理地反應場址之 IAQ 狀況, 同時掌握場址污染物在平面方向的濃度分佈或擴散情形。圖 11 所示為空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})檢測位置平面圖, 包含: 掛號收費處(NO1~NO4)四點、穿堂(NO5~NO12)八點、領藥處(NO13~NO16)四點、兩側走道(NO17、NO18)各一點、大門入口



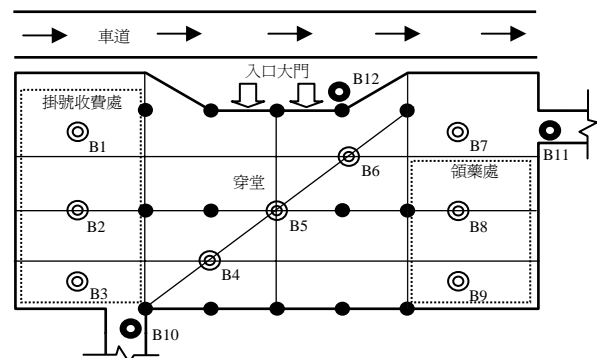
圖例: Δ 分佈於空間內的檢測位置(NO1~NO16), 取樣點高度距地版面 1.2~1.5m。
 \blacktriangle 可能影響參考點檢測位置(NO17~NO19), 取樣點高度距地版面 1.2~1.5m。

圖 11 空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})檢測位置平面圖

3.6 儀器設備與方法

室內空氣中細菌濃度檢測之方式, 依據行政院環保署 2012 年 12 月 23 日公告(環署檢字第 1010072085 號)之「室內空氣中總細菌數檢測方法」(NIEA E301.12C)進行檢測。該方法係將一定體積容量之空氣樣本直接衝擊於適合細菌生長之培養基(medium)上, 並於 30±1°C 培養 48±2 小時生長後, 計數培養基上細菌之菌落數, 以計算一立方公尺空氣中之總細菌濃度, 單位以 CFU/m³(colony forming unit/cubic meter)表示, 並視所採用的衝擊階板孔數之多寡進行校正。其中, 生物氣膠單階衝擊式採樣器(Andersen 400 孔)之配備, 包括: 生物氣膠衝擊器(biostage)、進樣裝置(抽氣馬達)以及乾式流量校正器等。生物氣膠單階衝擊式採樣器(single-stage bioaerosol impactor), 係運用慣性衝擊(inertia impact)的原理, 針對美國工業衛生師協會(American Conference of Government Industry Hygienists Committee, ACGIH)所建議的採樣方法所設計, 並符合美國職業安全衛生協會(The National

處(NO19)一點, 共計十九個採樣點。圖 12 為空氣中總細菌數檢測位置平面圖, 包含: 掛號收費處(B1~B3)三點、穿堂(B4~B6)三點、領藥處(B7~B9)三點、兩側走道(B10、B11)各一點、大門入口處(B12)一點, 共計十二個採樣點。至於, 在出風口內部表面採樣方面, 掛號收費處上方天花板出風口(SA1~SA7)七點、領藥處(SA8~SA12)五點, 共計進行十二個採樣點。空調箱內部之表面採樣, 則分別於空調箱之濾網、冷卻盤管、風機下方、箱體側壁、箱體頂部等位置之正中央進行表面採樣, 每台空調箱內部計有六個採樣點, 兩部空調箱總計十二個採樣點(A1~A12)。



圖例: \odot 平均分佈於空間內的檢測位置(B1~B9), 取樣點高度距地版面 1.2~1.5m。
 \odot 可能影響參考點檢測位置(B10~B12), 取樣點高度距地版面 1.2~1.5m。

圖 12 空氣中總細菌數檢測位置平面圖

Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)0800 和 0801 方法, 適用於室內與戶外空氣中活體微生物(living microorganisms)的採樣(施耀筌, 2013)。

物體表面菌採樣方法係仿食品業者常採用的表面黏貼方式, 利用一般細菌可廣效生長的胰蛋白大豆瓊脂培養基(tryptic soy agar, TSA)分別進行空調箱與風管內部表面菌之採樣工作, 並於 30±1°C 培養 48±2 小時生長後, 計數培養基上細菌之菌落數, 以計算一平方公分面積中之菌落數, 單位以 CFU/cm²(colony forming unit/ square centimeter)表示。

檢測場址 PM₁₀ 與 PM_{2.5} 之量測, 採用桌上型粉塵計(desktop-style dust meter), 係一種新型粉塵直讀式定量測定設備。儀器內部具備: Mass Mode 與 Particle Mode 的二合一性能(2-in-1 performance)設計。在 Mass Mode 上, 提供五種粒徑 (PM₁、PM_{2.5}、PM₇、PM₁₀ 以及 TSP) 的量測, 可於 2 分鐘完成取樣測定, 濃度範圍為 0~1mg/m³。而在 Particle Mode 的使用上, 則提供兩種常用的積累粒徑(popular cumulative particle,

>0.5 與 >5.0 μm) 的測定。AEROCET 531 桌上型粉塵計可廣泛應用於室內、外空氣品質粉塵濃度的監測、粉塵污染源的監測與追蹤、空調或過濾系統去除粉塵效能之測試、作業環境粉塵量之測定以及工業廠房潔淨室之測定等多種用途。

4. 檢測成果與討論

本研究之檢測作業期限長(2011.10.31 ~ 2013.02.22)、檢測頻率高(前後共進行二十三次檢測,每次檢測均分早、中、晚三次)、檢測項目眾多(空氣中總細菌數、PM₁₀、PM_{2.5};空調箱內部表面細菌數;出風口內部表面細菌數;溫度;相對濕度;風速;天候狀況)且檢測位置密集(粒狀污染物十九點、空氣中總細菌數十二點、空調箱內內部表面細菌數十二點、出風口內部表面細菌數十二點),故原始數據與資料龐大,礙於篇幅無法一一呈現,僅能以平均的概念並擇要說明。此外,本研究之重點在於探討中央空調應用 UVGI 系統結合高效袋式濾網技術改善室內空氣品質之成效性,故分析的重點在於前、後三個階段(第一階段:空調箱內未設置淨化系統;第二階段:單獨使用 UVGI 系統;第三階段:UVGI 系統與高效袋式濾網結合)的差異性分析,有關場址使用行為、就診人數、活動型態、氣候因子、室外污染源干擾等的影響與關連性,則暫不加以探討,詳細之說明可參閱施耀筌(2013)之文獻。

4.1 空氣中總細菌數測定成果

場址室內空氣中總細菌濃度前、後共二十三次之檢測結果如圖 13 所示,擇要說明如下。

(1)第一階段(2011.10.31~2012.11.04)空調箱內未設置淨化系統(原一般平板濾網),場址大廳中三次背景值(2011.10.31、2011.11.02、2011.11.04)之檢測結果,空氣中總細菌數之平均濃度介於 1,430FU/m³~2,245CFU/m³,已高於行政院環保署 2011 年 11 月 23 日公告之「室

內空氣品質標準」1,500CFU/m³ 的基準。換言之,就診民眾於等待掛號、收費、領藥(呼吸、飛沫、講話、走動等)的過程,有曝露於較高細菌濃度或影響健康的問題存在(活動人數愈多,細菌濃度亦愈高),亦充分顯示場址確實有加強通風或於空調箱內設置淨化系統的迫切性與必要性。

- (2)場址於空調箱內單獨裝設 UVC 燈後之第二階段(2011.12.30~2012.08.31),室內空氣中的細菌濃度,短期內一個月左右的時間已降至 520CFU/m³~735CFU/m³之間(2011.12.30),滅菌效率可達 63.64%~67.26%,已可低於法令的規範與要求。顯示空調箱內設置合宜的 UVGI 系統,對於淨化通過氣流中的細菌,短期間內可發揮一定程度的功效。
- (3)空調箱內單獨裝設 UVC 燈之第二階段(2011.12.30~2012.08.31),隨著時間之進行,室內空氣中的細菌濃度有逐漸再升高的趨勢,約經過八個月左右的時間,已升高至 949CFU/m³~1,599CFU/m³之間(2012.08.31),又有高於「室內空氣品質標準」1,500CFU/m³ 基準值的問題。顯示空調箱內設置的 UVGI 系統,在較長期的運作時間後,隨著 UVC 燈本身的光能衰減、表面粉塵遮蔽等主要問題,有逐漸喪失即時滅菌的問題存在。
- (4)空調箱內再增設 MERV 8 與 MERV 13 等級濾網各一道(原一般平板濾網拆除)的第三階段(2013.01.11~2013.02.22),意即空調箱內設置「UVGI 系統與結合高效袋式濾網」,室內空氣中的細菌濃度又再下降至 317CFU/m³~506CFU/m³之間(2013.02.22),滅菌效率回復至 77.46%~77.83%。顯示空調箱內設置「UVGI 系統與結合高效袋式濾網」,可同時兼具 UVC 燈與袋式濾網的雙重功效,對於空氣中細菌濃度的降低發揮協同促進的淨化效果。

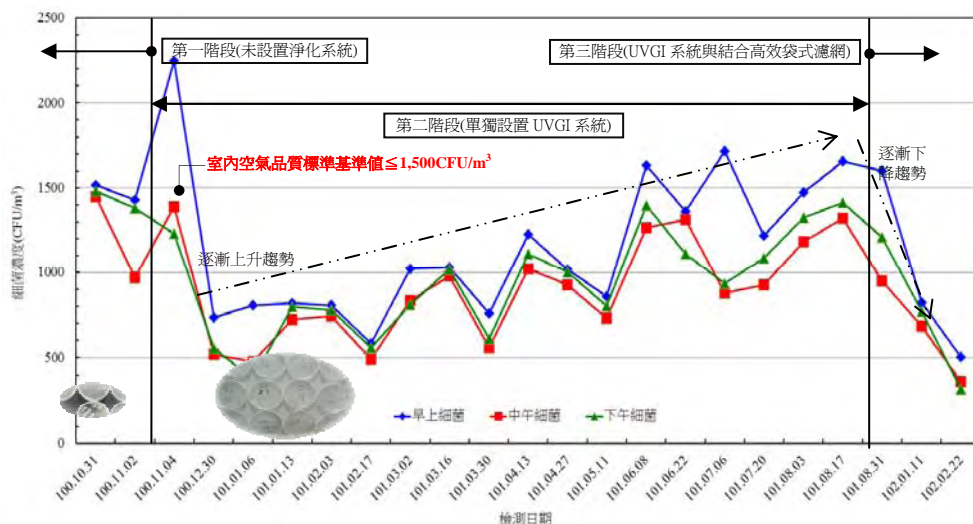


圖 13 空氣中總細菌數隨時間變化之測定結果

4.2 空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})測定成果

場址室內空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})前、後共十八次之檢測結果如圖 14 所示，擇要說明如下。

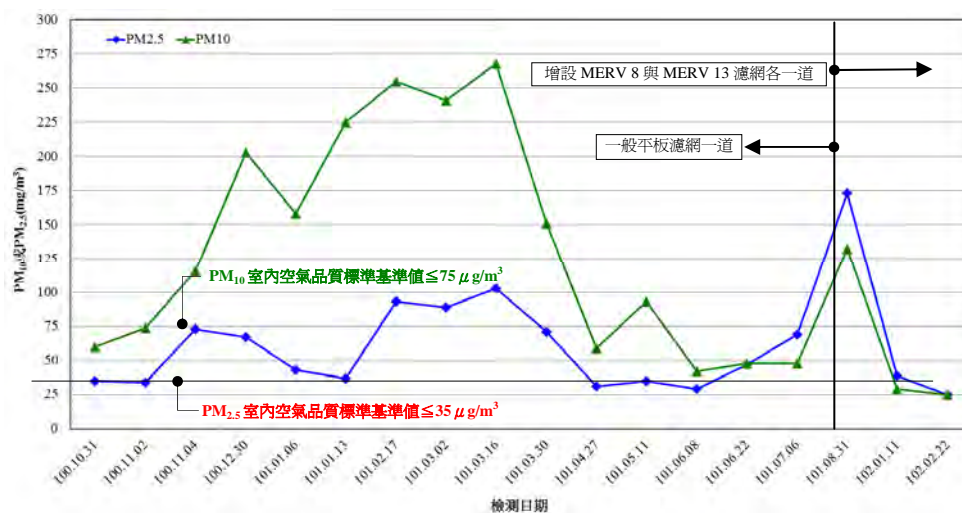


圖 14 空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})隨時間變化之測定結果

- (1) 第一階段與第二階段 (2011.10.31 ~ 2012.08.31)，空調箱內之濾網為一般的平板濾網，僅能過濾或去除 $\geq 10 \mu\text{m}$ 之微粒，故在此檢測期間，無論 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 已有部分檢測值超過行政院環保署 2011 年 11 月 23 日所公告之「室內空氣品質標準」(PM₁₀ $\leq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 與 PM_{2.5} $\leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的問題。顯示空調箱內若僅設置一般的平板濾網，對於場址室內粒狀污染物的去除或 IAQ 的維護，其效能恐無法達成。
- (2) 第三階段 (2013.01.11 ~ 2013.02.22) 將空調箱內原有的平板濾網加以拆除，並改增設 MERV 8 與 MERV 13 等級濾網各一道，室內空氣中的

粒狀污染物濃度可降至 $25\text{mg}/\text{m}^3$ 的水準 (2013.02.22) 並滿足法令的規範與要求。顯示合宜濾網等級的組合與選用，對於室內空氣中粒狀污染物的降低或移除可發揮決定性的影響。

4.3 空調箱內部與出風口內部表面細菌數測定成果

場址空調箱內部與出風口內部表面細菌數前、後共十一次之檢測結果分別如圖 15 與圖 16 所示，擇要說明如下。

- (1) 空調箱內未裝設 UVGI 系統前，其外觀表面由

肉眼檢視看似乾淨，然各元件表面單位面積的細菌數，包含：冷卻盤管、風機以及垂直壁面等，大部分均為「菌落太多無法計數(TNTC)」的情形。顯示空調箱內陰暗、潮濕的環境，確實為細菌等微生物容易滋生之處所。

(2)空調箱內裝設 UVGI 系統後，於檢測期間(2011.12.30~2012.07.20)，無論冷卻盤管、風機以及垂直壁面等已大量的降低至相對乾淨的程度，約介於 0~0.61CFU/cm²，滅菌效率高。顯示利用高能量的 UVC 燈直接照射空調箱的內部，對於直接抑制室內微生物的主要污染源，將可取得顯著的潔淨效能。

(3)出風口內部表面細菌數於空調箱內未裝設 UVGI 系統前亦大多數為 TNTC 的情形，顯示風管內陰暗、潮濕的環境亦為細菌等微生物容易滋長之處所，於空調運轉期間對室內人員構成健康上的潛在威脅。

(4)空調箱內裝設 UVGI 系統後，於檢測期間(2011.12.30~2012.07.20)，風管內壁單位面積的細菌數，已大量的降低至相對乾淨的程度，約為 0~3.21CFU/cm²。顯示高能量的 UVC 燈對於風管內壁表面的清潔作用，亦能發揮一定的成效。對於風管內部不易清洗或容易滋生微生物等危害，將可提供一可預期且無二次污染的改善方案。

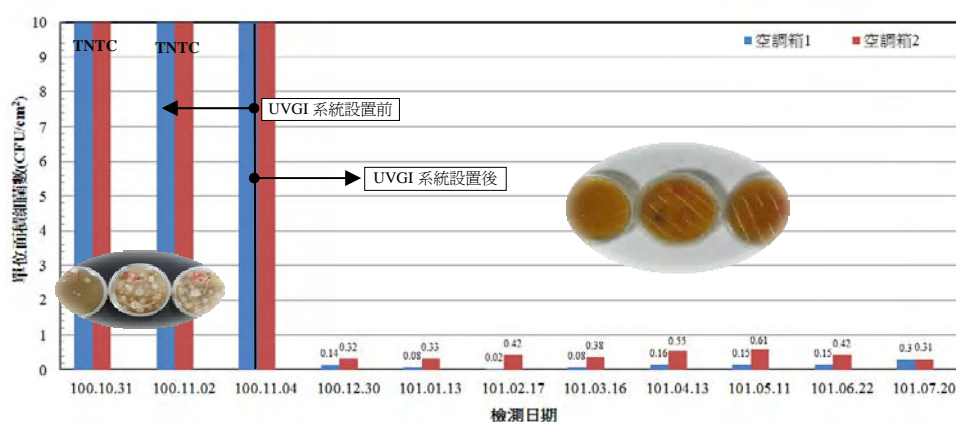


圖 15 空調箱內部表面細菌數隨時間變化之測定結果

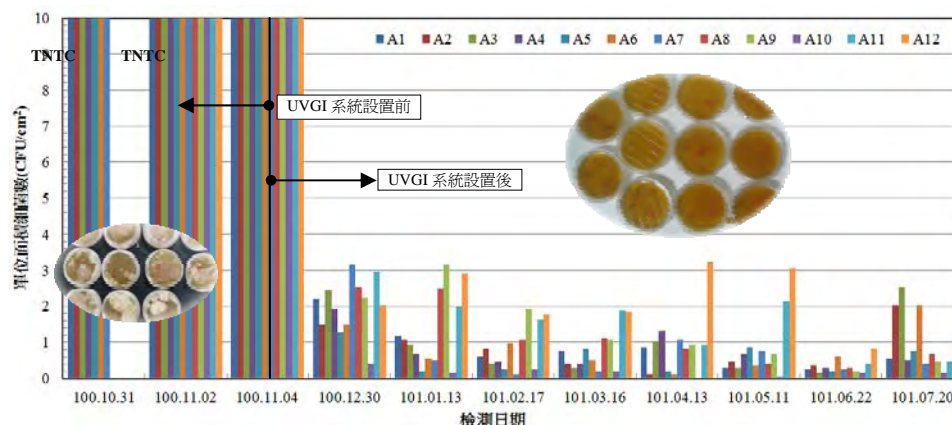


圖 16 出風口內部表面細菌數隨時間變化之測定結果

5. 初步結論

茲將本研究的初步成果，簡要條列如下。

(1)醫院之空調箱內若未設置合宜的淨化系統，有可能迫使大量就診民眾曝露於較高細菌濃度與較高粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})的危害風險。

(2)空調箱與風管內部因相對陰暗、潮濕的環境，表面單位面積的細菌數大部分均為 TNTC 的情形，顯示空調箱與風管內部為細菌等微生物容易滋生之處所，於空調運轉期間有對於室內人員構成健康潛在威脅的疑慮。

(3)空調箱內若僅裝設 UVGI 系統，其對於空氣中總細菌數的改善能力，初期(本研究建議三個

月內)之淨化效果尚可預期,但長期(本研究建議六個月以上)的滅菌功效則相對較無法確保(除非縮短 UVC 燈管之更換頻率)。

- (4)空調箱內裝設 UVGI 系統前後,空調箱與風管出口內部表面單位面積的細菌數由 TNTC 的情形降低至相對低的情形,顯示高能量的 UVC 燈對於空調箱與風管出口內部表面的清潔作用,亦能同時發揮一定的淨化成效。
- (5)合宜濾網等級的組合與選用,對於室內空氣中粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})的降低或移除可發揮決定性的影響。
- (6)空調箱內結合 UVGI 系統與高效袋式濾網的淨化方式,對於同時改善或降低空氣中總細菌數與粒狀污染物(PM₁₀、PM_{2.5})之功效最為顯著,可靠性與穩定性亦較能確保。換言之,在室內總細菌數與粒狀污染物的控制上,若利用空調箱作為整體改善的淨化的措施時,建議應同時考量 UVGI 系統與高效袋式濾網相結合的方式,不可有所偏頗。

參考文獻

1. 李萬成,某醫院室內空氣品質評估,碩士論文,台北醫學院公共衛生研究所,台北市(1999)。
2. Kowalski, W. J., Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook-UVGI for Air and Surface Disinfection, Springer, New York (2009).
3. Kowalski, W. J., and W. P. Bahnfleth, UVGI design basics for air and surface disinfection. HPAC 72 (1) (2000).
4. Boyce, P., Controlling Tuberculosis Transmission with Ultraviolet Irradiation, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute (2003).
5. Kowalski, W. J., and W. P. Bahnfleth, "Proposed Standards and Guidelines for UVGI Air Disinfection," IUVA News, Vol. 6, No. 1, pp.20-25 (2004).
6. ARTI, Defining the effectiveness of UV lamps installed in circulating air ductwork (2002).
7. Philips, UV purification-application information, Philips (2005).
8. International Ultraviolet Association, Guideline for Design and Installation of UVGI In-Duct Air Disinfection Systems, IUVA Draft Guideline IUVA-G03A-2005 (2005).
9. CIE, Ultraviolet air disinfection, Technical Report 155:2003, International Commission on Illumination (2003).
10. Martin Jr., S. B., Dunn, C., Freihaut, J. D., Bahnfleth, W. P., Lau, J., and A. N., Davidovic, "Ultraviolet Germicidal Irradiation Current Best Practices, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., pp.28-36 (2008).
11. CDC, "Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities," MMWR 52(RR-10) (2003).
12. CDC, "Guidelines for preventing the Transmission of Mycobacterium Tuberculosis in Healthcare Facilities," In: CDC, Editor. Federal Register. Washington: US Govt. Printing Office (2005).
13. Menzies, D., Popa, J., Hanley, J. A., Rand, T., and D. K. Milton, "Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: double-blind multiple crossover trial," THE LANCET, Vol.362, No.29, pp.1785-1791 (2003).
14. ASHRAE Technical Committees, GENERAL APPLICATIONS-Chapter 60 Ultraviolet Air and Surface Treatment (TC 2.9, Ultraviolet Air and Surface Treatment), 2011 ASHRAE HANDBOOK, HVAC Application, SI Edition (2011).
15. Brickner, P. W., Vincent, R. L., First, M., Nardell, E., Murry, M., and W. Kaufman, "The Application of Ultraviolet Germicidal Irradiation to Control Transmission of Airborne Disease: Bioterrorism Countermeasure," Public Health Reports, Vol. 118, pp.99-114 (2003).
16. United States Army Corps of Engineers (USACE), "Protecting buildings and their occupants from airborne hazards," TI 853-01, Washington, D.C. (2001).
17. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), DARPA's Immune Building Program (021029_AA_ColPro 2002), Special Projects Office (2002).
18. Kowalski, W. J., UVGI for Cooling Coil Disinfection, Air Treatment, and Hospital Infection Control, Revision 1.08, American Air & Water, Inc., Hilton Head Island, South Carolina (2011).
19. Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., and A. Musser, "Modeling Immune Building Systems for Bioterrorism Defense," Journal of Architectural Engineering, ASCE, pp.86-96 (2003a).
20. Kowalski, W. J., and W. P. Bahnfleth,

“Immune-Building Technology and Bioterrorism Defense-A review of the effectiveness of dilution ventilation, filtration, and ultraviolet germicidal irradiation in mitigating five biological-weapon agents,” HPAC Engineering, pp57-62 (2003b).

21. 曾雍翔，室內空氣品質淨化模擬系統之開發及利用 UV 處理甲醛效能之探討，碩士論文，明志科技大學環境與資源工程研究所，新北市(2013)。
22. WS/T 367-2012 醫療機構消毒技術規範，中華人民共和國衛生部(2012)。
23. 室內空氣品質檢驗測定管理辦法，行政院環境保護署(2013)。
24. 環境採樣規劃設計，行政院環境保護署環境檢驗所(2005)。
25. 室內空氣中總細菌數檢測方法」(NIEA E301.12C)，環署檢字第1010072085號，行政院環境保護署環境檢驗所(2012)。
26. 施耀筌，醫療院所室內空氣品質特性及空調箱主動防疫系統的成效性探討，碩士論文，明志科技大學環境與資源工程研究所，新北市(2013)。