

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

DLP 列印單層厚度控制探討

Study on the Single Layer Thickness Control of

Digital Light Processing

呂芊邑

CHIEN-YI LU

指導教授：單秋成 博士

Advisor: Chow-Shing Shin, PhD

中華民國 112 年 7 月

July 2023

致謝



首先感謝指導教授 單秋成 教授兩年耐心指導，和給予許多寶貴意見想法的林志郎 教授。在兩年研究中，提供無數解決辦法與最後撰寫論文的整體架構與脈絡。感謝特別撥空參與口試的 韓斌 教授。

感謝日昌、立揚、曼薇三位 3D 組的學長姊，教我使用每一台列印設備，並且給予諸多實驗經歷。另外，複材組的歆語、亮維學長姊，感謝分享許多實驗室有趣的事情。感謝同屆的俊凱、康祐、崇榮三位同學，一起努力畢業。感謝四位學弟們，讓實驗室煥然一新、氣氛活潑。最後感謝家人們的支持，讓我無後顧之憂地完成學業。



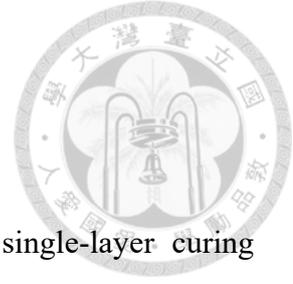
摘要

在光固化積層製造中，適當的單層固化厚度影響了整體結構的穩定度與外觀，尤其是桁架結構。如果單層固化厚度不足，易造成鏤空空結構不穩定；相反的，過度單層固化厚度，會導致鏤空結構，變成實心之立方體。因此，在列印過程中，除了會以列印載台的步進量控制樹脂流入載台的厚度外，同時也要避免，因為光能量穿透所導致深度方向多餘的固化。

本研究係在探討如何運用調整樹脂配方、降低曝光能量、改變給予光能量的方式.....等方式，精確地控制光敏樹脂固化厚度。先以列印單層的方式，找出若干變因與層厚之間的理論關係，接著將這些方法實際運用於鏤空結構列印——井字結構。藉由量測結構中的鏤空樓板厚度，觀察是否有改善吊床現象。

關鍵字:單層、厚度、桁架結構、光能量

Abstract



In the manufacture of vat polymerization, the appropriate single-layer curing thickness affects the stability and appearance of the whole structure, especially the truss structure. If the single-layer curing thickness is insufficient, it will easily cause the hollow structure to be unstable; on the contrary, if the single-layer curing thickness is too high, the hollow structure will become a solid cube. Therefore, in the process, in addition to controlling the thickness of the resin flowing into the printing carrier by the moving amount of the printing carrier, it is also necessary to avoid excess curing in the depth direction due to the penetration of light energy.

The purpose of this study is to explore how to use methods of adjusting the resin formula, reducing the exposure energy, changing the way of light energy, etc., to precisely control the curing thickness of the photosensitive resin. First, by printing a single layer, find out the theoretical relationship between several variations and layer thickness, and then apply these methods to the hollow structure - the Tac-toe structure. By measuring the thickness of the hollow floor slab in the structure, observe whether the hammock phenomenon has been improved.

Key word: single layers 、 thickness 、 truss structure 、 light energy

目錄

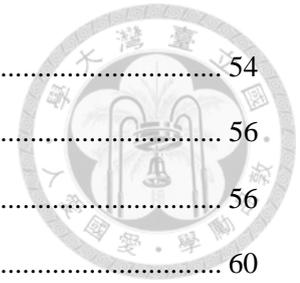


致謝.....	I
摘要.....	II
Abstract	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XI
第一章、緒論.....	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	2
1.3 章節簡述	3
第二章、文獻回顧.....	4
2.1 DLP 列印技術(digital light processing).....	4
2.1.1 DLP 投影機	4
2.1.2 DMD (Digital Micro-mirror Device)晶片	5
2.1.4 DLP 技術微型化	6
2.2 樹脂光固化與層厚	8
2.2.1 光敏樹脂固化原理.....	8
2.2.2 光起始劑與光抑制劑對固化深度之影響.....	8
2.2.3 光能量穿透對固化深度之影響.....	9
2.2.4 像素光場疊加.....	9
2.3 總結	10
第三章、實驗設備與材料.....	11
3.1 即時監測 3D 列印設備.....	11
3.1.1 投影機.....	11
3.1.2 CMOS 即時監測系統.....	12

3.1.3 光路系統.....	12
3.2 列印材料與相關設備	12
3.2.1 列印材料.....	12
3.2.2 相關設備.....	14
3.2.3 樹脂命名.....	14
3.3 實驗量測設備	15
3.3.1 立體顯微鏡.....	15
3.3.2 電子掃描顯微鏡(SEM).....	15
3.3.3 白金濺鍍機.....	15
3.3.4 彩色共軛焦表面輪廓量測儀.....	16
第四章、實驗方法與流程.....	17
4.1 實驗理論與方法說明	17
4.2 研究流程	19
4.2.1 結構設計.....	20
4.2.2 切層.....	20
4.2.3 調整參數.....	21
4.2.4 對焦.....	25
4.2.5 列印.....	26
4.2.6 清洗與觀測.....	26
4.2.7 鍍白金與厚度量測.....	26
4.2.8 樓板量測方式.....	27
4.3 列印單層方法	28
第五章、實驗結果與討論.....	29
5.1 不同樹脂配方結果	29
5.1.1 GS 光敏樹脂.....	29
5.1.2 ONYX 光敏樹脂	41
5.1 結論.....	52



5.2 灰階法	54
5.3 改變給予能量方式實驗結果.....	56
5.3.1 GS-0.15S-10DB	56
5.3.2 ONYX-0.5S.....	60
5.3.3 改變能量給予方式實驗結論.....	64
5.4 電極法	66
5.5 綜合與應用	67
5.5.1 整合單層列印.....	67
5.5.2 井字結構應用	68
第六章、結論與未來展望	72
6.1 結論	72
6.2 未來展望	73
參考資料.....	74
附錄.....	77



圖目錄



圖 1-1、縮小後列印八隅體之上視圖、側視圖.....	2
圖 2-1、DLP 光固化成型技術示意圖[9].....	4
圖 2-2、DLP 投影機構造[11].....	5
圖 2-3、DMD 晶片構造[12].....	5
圖 2-4、DMD 晶片工作原理[14].....	5
圖 2-5、灰階控制原理[15].....	6
圖 2-6、P μ SL 示意圖[28].....	7
圖 2-7、光聚合反應示意圖[21].....	8
圖 2-8、聚焦點附近水平(x)與垂直(z)方向亮度分布示意圖.....	9
圖 2-9、10 單位像素並排光場疊加結果.....	10
圖 2-10、不同數目像素相鄰排列光強度.....	10
圖 3-1、即時監測 3D 列印設備架構示意圖.....	11
圖 3-2、彩色共軛焦顯微鏡原理示意圖[19].....	16
圖 4-1、馬賽克法曝光圖簡易說明.....	18
圖 4-2、增加單層曝光次數”說明具象示意圖.....	18
圖 4-3、電極法側視示意圖.....	19
圖 4-4、實驗流程示意圖.....	20



圖 4-5、結構設計(a)立方結構、(b)井字結構等角視圖.....	20
圖 4-6、單層原始曝光圖.....	21
圖 4-7、修改前原始 G-code.....	22
圖 4-8、修改後曝光圖(a)正片(b)負片.....	22
圖 4-9、三種不同尺寸之馬賽克(a)mac15(b)mac10(c)mac5.....	23
圖 4-10、馬賽克法之 G-code 修改.....	23
圖 4-11、灰階值說明.....	24
圖 4-12、二次對焦法流程示意圖.....	25
圖 4-13、(a)對焦完成之初始狀態(b)曝光(c)產生固化(d)平台下移.....	26
圖 4-14、共軛焦表面輪廓量測儀厚度數據取得說明.....	27
圖 4-15、井字結構量測數據說明.....	28
圖 4-16、單層列印示意圖.....	28
圖 5-1、GS 純樹脂單層列印成品側視圖(a)-(f)分別為曝光不同時長.....	29
圖 5-2、GS 樹脂單層列印厚度數據.....	30
圖 5-3、GS-[X]S 部分列印成品上視圖、側視圖.....	31
圖 5-4、GS-[X]S 樹脂配方單層列印厚度數據.....	32
圖 5-5、GS-[X]DB 部分列印成品上視圖、側視圖.....	33
圖 5-6、GS-[X]DB 樹脂配方單層列印厚度數據(a) [X]=10 (b) [X]=30.....	33
圖 5-7、GS-[X]CB 部分列印成品上視圖、側視圖.....	34
圖 5-8、GS-[X] CB 樹脂配方單層列印厚度數據.....	35
圖 5-9、GS-[X]S-[Y]DB 樹脂配方單層列印厚度數據.....	36
圖 5-10、固定 GS 不同 Sudan 劑量比較.....	37
圖 5-11、固定 GS-10DB 不同 Sudan 劑量比較.....	38
圖 5-12、固定 GS-30DB 不同 Sudan 劑量比較.....	38

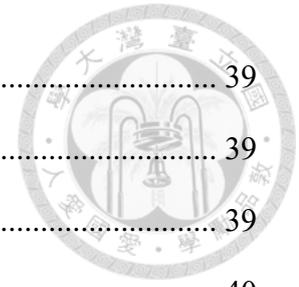
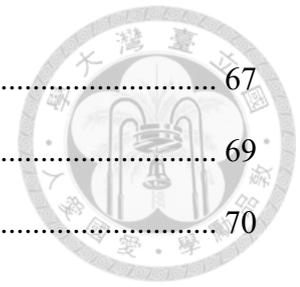


圖 5-13、固定 GS 不同 DB 劑量比較	39
圖 5-14、固定 GS-0.15S 不同 DB 之比較	39
圖 5-15、固定 GS-0.3S DB 之比較	39
圖 5-16、固定 GS 不同 Carbon Black 劑量比較	40
圖 5-17、同時加入 Sudan、DB 之比較	41
圖 5-18、ONYX 純樹脂單層列印成品上視、側視圖	42
圖 5-19、ONYX 樹脂單層列印厚度數據	42
圖 5-20、ONYX-[X]CB 部分列印成品上視圖、側視圖	44
圖 5-21、ONYX-[X]CB 樹脂配方單層列印厚度數據	45
圖 5-22、ONYX-[X]S 部分列印成品上視圖、側視圖	47
圖 5-23、ONYX-[X]S 樹脂配方單層列印厚度數據	50
圖 5-24、固定 ONYX 不同 Carbon Black 劑量比較	51
圖 5-25、固定 ONYX 不同 Sudan 劑量比較	52
圖 5-26、灰階值、單層曝光時間與層厚之曲面圖	55
圖 5-27、50ms 之灰階值比較	55
圖 5-28、GS-0.15S-10DB 單層 2 秒不同列印參數比較	57
圖 5-29、GS-0.15S-10DB 單層 8 秒不同列印參數比較	57
圖 5-30、GS-0.15S-10DB 以「馬賽克尺寸」為變因之比較圖	58
圖 5-31、GS-0.15S-10DB 以「分次曝光」為變因之比較圖	59
圖 5-32、GS-0.15S-10DB 單層曝光 2 秒和 8 秒不同參數比較	60
圖 5-33、ONYX-0.5S 單層 100 毫秒不同列印參數比較	61
圖 5-34、ONYX-0.5S 單層 500 毫秒不同列印參數比較	61
圖 5-35、ONYX-0.5S 以「馬賽克尺寸」為變因之比較圖	62
圖 5-36、ONYX-0.5S 以「分次曝光」為變因之比較圖	63
圖 5-37、ONYX-0.5S 單層曝光 2 秒和 8 秒不同參數比較	64

圖 5-38、馬賽克法結合灰階法之綜合比較.....	67
圖 5-39、ONYX 系列不同參數列印之樓板成品側視圖	69
圖 5-40、GS 系列不同參數列印之樓板成品側視圖.....	70





表目錄

表 3-1、GS 樹脂之材料係數.....	12
表 3-2、Onyx Rigid Pro410 樹脂之材料係數	13
表 3-3、DB 樹脂之材料係數	13
表 3-4、樹脂配方命名說明表.....	15
表 4-1、G-code 參數修改命名表格.....	24
表 5-1、圖例說明.....	30
表 5-2、GS 樹脂加入不同劑量蘇丹紅單層列印之外觀情況表格.....	31
表 5-3、GS 樹脂加入不同劑量 DB 單層列印之外觀情況表格	33
表 5-4、GS 樹脂加入不同劑量碳黑單層列印之外觀情況表格.....	34
表 5-5、GS 樹脂加入不同劑量蘇丹紅和 DB 單層列印之外觀情況表格.....	35
表 5-6、ONYX 樹脂加入不同劑量碳黑單層列印之外觀情況表格	44
表 5-7、ONYX 樹脂加入不同劑量蘇丹紅單層列印之外觀情況表格	48
表 5-8、GS、ONYX 結果比較.....	53
表 5-9、三種添加物比較.....	53
表 5-10、不同灰階值列印成品之外觀情況表格.....	54
表 5-11、單層曝光 2 秒的實驗詳細參數列表.....	56
表 5-12、單層曝光 8 秒的實驗詳細參數列表.....	56
表 5-13、單層曝光 100 毫秒的實驗詳細參數列表.....	60
表 5-14、單層曝光 500 毫秒的實驗詳細參數列表.....	60
表 5-15、改變能量給予方式實驗結果整理表格.....	65

表 5-16、井字結構列印參數與列印簡易結果.....	68
表 5-17、ONYX 系列不同參數列印之樓板數據.....	69
表 5-18、GS 系列不同參數列印之樓板數據.....	71
表 6-1、添加物比較表格.....	72
表 6-2、灰階法、馬賽克法比較表格.....	72
附表 1、GS 樹脂配方系列不同曝光時間之量測厚度.....	77
附表 2、ONYX 樹脂加入碳黑不同曝光時間之量測厚度.....	78
附表 3、ONYX 樹脂加入 Sudan 不同曝光時間之量測厚度.....	79
附表 4、ONYX-0.5S 樹脂單層曝光 100ms 馬賽克量測厚度.....	80
附表 5、ONYX-0.5S 樹脂單層曝光 500ms 馬賽克量測厚度.....	80
附表 6、GS-0.15S-10DB 樹脂單層曝光 2000ms 馬賽克量測厚度.....	80
附表 7、GS-0.15S-10DB 樹脂單層曝光 8000ms 馬賽克量測厚度.....	80
附表 8、ONYX-0.5S 樹脂不同單層曝光時間(ms)灰階值量測厚度.....	81



第一章、緒論



1.1 前言

3D 列印又稱積層製造(Additive Manufacturing, AM), 於上世紀近年來市場與應用範圍爆炸性發展。相較於傳統切削製造, 積層製造除了可以減少材料浪費, 同時也能降低製造過程中繁複的工序[1]。只需要將現有的電腦輔助設計圖, 進行材料疊加, 即可一體成型內部複雜的結構, 省去對位組裝的程序和成本[2]。

隨著 3D 列印技術成熟, 過去多以列印大尺度模型逐漸開始微型化、精密化, 盡可能的縮小尺寸, 運用於生醫的實驗室晶片(Lab-on-Chip)[2]、量子領域的離子阱(Ion Trap)[3]及機械系統中的機構元件。此類製造需求多以光固化 3D 列印為主流, 因其表面光滑度、尺寸精度皆優於其他增材製造, 且以光能量製造技術可透過聚焦成像調整列印解析度。另外, 對於微列印成型的元件結構完整性、耐用性也有更高的要求。然而, 這方面的設計與評估, 需要掌握材料的機械性質

目前 3D 列印材料的機械性質, 主要仍以塊材 (bulk) 的性質為依據。對於提升列印解析度對機械性質的影響仍缺乏有系統探討。有限幾篇文獻顯示以極高解析度(數百奈米)製作的光固化材料其性質有所謂“尺寸效應”——其楊氏係數比塊材低上數個量級 [17, 18]。因此有系統的探討列印解析度對材料性質的影響對準確評估列印成品的結構完整性與可靠度有重要意義。



1.2 研究動機

3D 列印微型化盡可能的縮小尺寸為產業趨勢，多應用於生醫實驗室晶片、量子領域的離子阱[3]及機械系統中的機構元件。為了滿足以上製造需求，目前解決方式是在上照式 DLP 列印機台中額外加入光學透鏡組，將 xy 方向曝光尺度縮小至單位像素約 $0.62\mu\text{m}$ ；至於 z 方向無法藉由透鏡組等比例縮小，會導致列印的單位體積像素 x、y 方向尺寸和 z 方向尺寸比例差異極大，在非預期的深度區域進行固化，如圖 1-1 中的八隅體，上視圖顯示平面的尺寸正常縮小且桿件清晰，但側視圖顯示深度方向桿件嚴重過度成化，目前市面上則是使用深色的樹脂來防止此類問題。

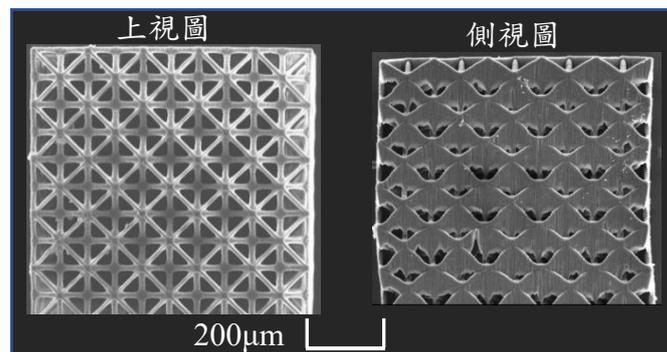


圖 1-1、縮小後列印八隅體之上視圖、側視圖

如果製造的微結構對於顏色沒有特殊要求，自然可用上述方式解決。但有些生醫領域與蛋白質相關的實驗，就必須使用透明的基材樹脂原料，這時候深度方向過度成化的問題就需要另外尋找其他方式來改善。

因此除了想改善上述問題之外，也想透過本研究找出最佳控制深度方向列印解析度的方式。



1.3 章節簡述

本篇論文主要由六個章節所組成，分別為緒論、文獻回顧、實驗設備與材料、實驗方法與流程、實驗結果與討論、未來展望，以下為各章節簡述。

第一章	緒論：簡單介紹 3D 列印的歷史發展，說明研究動機和簡述本篇論文的架構。
第二章	文獻回顧：回顧高分子材料光固化基本原理，並進一步探討材料對深度方向光固化之影響。
第三章	實驗設備與材料：說明本研究使用的列印設備，並介紹光敏樹脂、添加劑……等相關材料與實驗後的量測設備。
第四章	實驗方法與流程：介紹由實驗原理推展出的實驗方法，並且說明整體實驗流程。
第五章	實驗結果與討論：針對不同列印參數量測分析，並且進行比較，找出最佳方式；並應用於立體結構，觀察是否改善。
第六章	未來展望：說明以目前研究結論，可應用的地方。與未來可繼續鑽研的方向。

第二章、文獻回顧



2.1 DLP 列印技術(digital light processing)

DLP 列印技術是以疊層方式，利用 DLP 投影機把逐層 3D 模型的形狀圖案光線投射到液態光敏樹脂上，使光敏樹脂光固化成型。[10]

DLP 列印技術是使用數位微型反射鏡元件 (digital micromirror device, DMD)，可以獨立地旋轉開和關狀態的數量高達數百萬個鏡子陣列。通過將二維像素圖案投影到透明板上，可以立即固化完整的樹脂層，如圖 2- 1 所示。由於列印時間僅取決於每層厚度和所需的照光時間，而不取決於它們在 XY 平面中的尺寸或同時構建的結構數量，因此構建時間大幅減少同時提高列印速度。[7]

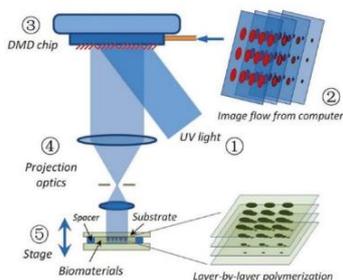


圖 2- 1、DLP 光固化成型技術示意圖[9]

2.1.1 DLP 投影機

DLP 數位光固化技術之光源為數位光投影機，其主要核心為數位微型反射鏡元件，即 2.1.2 DMD (Digital Micro-mirror Device)晶片節所介紹之 DMD 晶片(Digital Micro-mirror Device)所組成，是一種全數位反射式投影技術，可以提高投影影像之解析度。

單片式 DLP 投影機的構造通常由光源、紅綠藍三色塊所組成彩色濾色輪、聚光鏡片、DMD 晶片以及投影鏡頭所組成。成像方式如圖 2-2 所示，燈泡光源經過透鏡聚光，接著通過以 60Hz 高速旋轉的濾色輪產生全彩色影像，入射至 DMD 晶片，藉由 DMD 晶片中的數十萬微小反射鏡產生角度偏轉來精確控制光源明暗度，



最後投影至螢幕即可顯現圖像。[10]

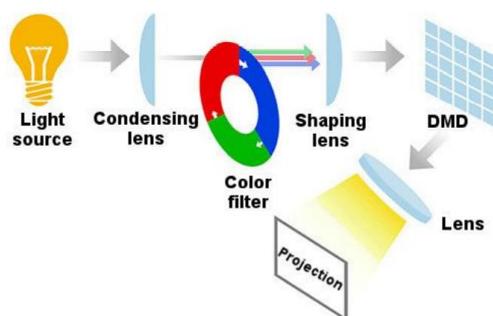


圖 2-2、DLP 投影機構造[11]

2.1.2 DMD (Digital Micro-mirror Device) 晶片

DMD 晶片是數十萬個鋁合金微鏡片所組成的矩陣，每個微鏡片控制投影畫面的一個像素。DMD 像素是一種整合的微機電上層結構電路單元(MEMS superstructure cell)，底層由 COMS 型式的靜態隨機存取記憶體(Static Random Access Memory, SRAM)所控制[8]；上層結構則是通過金屬沉積、氧化層光罩以及金屬蝕刻等步驟製造出定址電極(Address Electrode)、力矩鉸鏈(Torsion Hinge)、軛型架(Yoke)、彈簧墊(Spring Tip)和反射鏡，如圖 2-3 所示。[11]

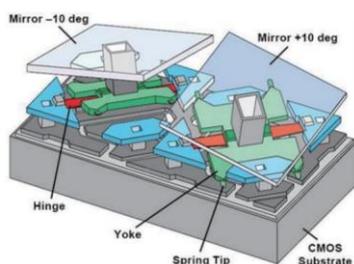


圖 2-3、DMD 晶片構造[12]

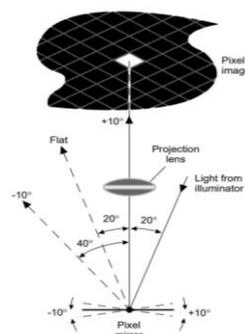


圖 2-4、DMD 晶片工作原理[14]

DMD 運作原理是藉由改變鏡面的角度，使入射光線可以沿著兩個方向反射出去，而鏡面的角度取決於底層記憶細胞狀態，可調整的範圍為正負 10 度，當記憶細胞處在"ON"狀態時，鏡面會旋轉至+10 度，此時入射光會反射至投影鏡內；反之，當記憶細胞處在"OFF"狀態時，鏡面會旋轉至-10 度，此時入射光會反射至投影鏡外，此運作方式提供良好的對比率(Contrast Ratio)以及整體亮度效率，如圖 2-4 所示。[14][15]

DMD 可利用二位元脈衝寬度調變(Binary Plus Width Modulation, BPWM)訊號處理技術產生灰階(Gary Scale)，如圖 2- 5 所示，如果輸入訊號微 4 位元，相當於可以表現出 16 個灰階，即代表在一次灰階呈現時間內，每一個微鏡面有 16 次的狀態轉變。當位元值越大(1111)代表在相同的時間周期內，光點停留持續時間越久會顯得較亮，反之位元值越小(0000)，光點停留時間越少會顯得較暗，而正因為採用 2 進位控制灰階，所以此投影系統才會稱為數位光學處理(Digital Light Processing)。[15][16][17]

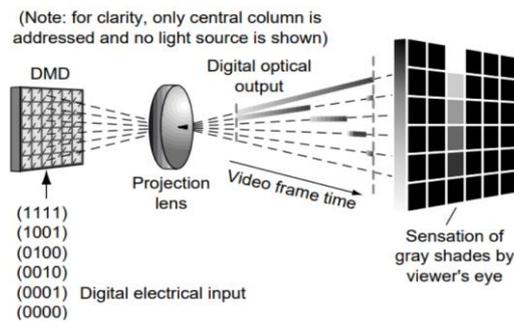


圖 2- 5、灰階控制原理[15]

2.1.4 DLP 技術微型化

目前光固化列印，有立體光刻 Stereolithography (SLA)，數位光處理列印 (DLP) 及液晶 LCD 技術。SLA 技術以鐳射光點掃描來構圖成像。DLP 則以微鏡片矩陣成像後，投影聚焦，因每次投影一整個畫面，比 SLA 逐點掃描成化速度較快。LCD 技術以紫外線經過貼近樹脂的液晶面板，逐個像素控制其光能否通過，再映射到光敏樹脂，只要把 LCD 面積增加，就可列印較大的範圍，可以較低廉價格作大面積列印而保留 LCD 原生的解析度。其中較容易達到解析度調控的技術為數位光處理列印 DLP 技術。PμSL(Projection micro stereolithography) 即利用 DLP 外加縮束透鏡來達到高解析度，如圖 2- 6，商售套裝設備目前解析度可達 2μm，對於多層級結構材料、離子阱、實驗室晶片、微流控元件以及各種微型化的機械元件基本已可應付[3][28]。

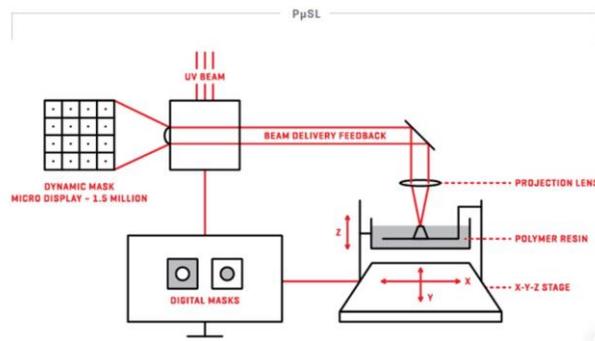


圖 2- 6、PμSL 示意圖[28]



2.2 樹脂光固化與層厚

DLP 光固化列印，在列印前須事先規劃切層厚度，如果結構中有斜面或斜伸的元件，切層太厚，斜面就變成階梯，甚至無法固化。但薄切層配上固化層厚，使得曝光的程度層層重疊，與低解析度列印時兩層重複的地方很低差別很大，也造成固化程度有很大的差異。如若對於樹脂固化層厚先行了解方可切出適當的厚度。以下將討論各種不同因素對固化厚度的影響。

2.2.1 光敏樹脂固化原理

液態光敏樹脂會發生固化是因為成分含有光起始劑(photoinitiator)，在吸收特定光波長的能量(通常為紫光波段或紫外光)之後自身會產生化學變化，其分子從基態被激發成陽離子或自由基，再進一步與聚合物單體(monomer)、低聚體(oligomer)產生連鎖交聯反應，這個反應就稱為光聚合反應，如圖 2-7 所示[20][19]。由此，當光能量越大，其固化度程度越高；反之，光能量小就不易固化。

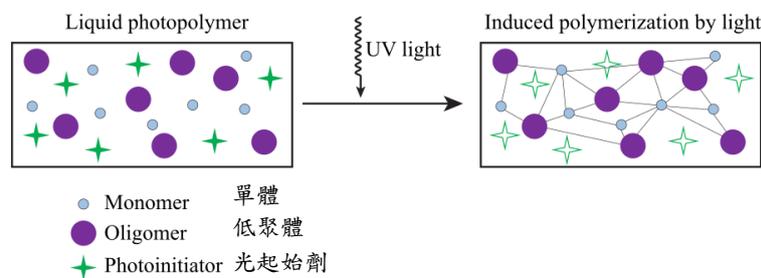


圖 2-7、光聚合反應示意圖[21]

2.2.2 光起始劑與光抑制劑對固化深度之影響

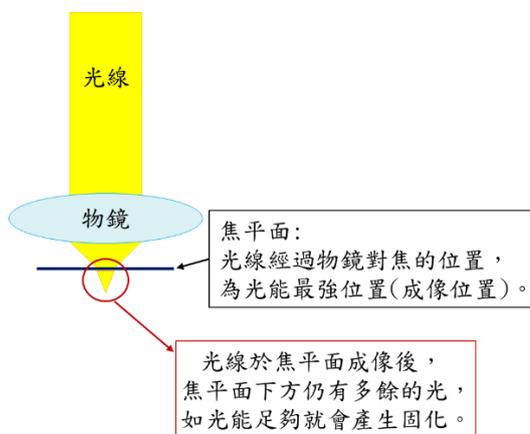
當光穿透過吸光物質時，會產生光衰減的現象，而光衰減的程度可用比爾-朗伯(Beer-Lambert)定律來表示。同樣的，光線穿過樹脂層時，因光衰現象其光能逐層減少，使得每層樹脂之光起始劑被激發引起的反應自由基或陽離子逐漸降低。

高濃度的光起始劑與光抑制劑，會有較明顯的光衰現象，因此樹脂深處較不容易固化。[22]



2.2.3 光能量穿透對固化深度之影響

光線被聚焦到焦平面上成像時，光能量除了在焦平面上一定範圍，在焦平面的上方與下方也有一定的光能量分布，如圖 2-8。當焦平面上光點範圍被聚焦縮小以提升解析度時，因光強度顯著提高，使光線可以達到更高的深度，因而成化厚度方向未與平面上尺寸等比例縮小。此一現象可以由圖 1-1 的實例得到很好的說明。從八隅體側視圖，可看到桿件鏤空處有嚴重的過度成化。[29]



[29]

圖 2-8、聚焦點附近水平(x)與垂直(z)方向亮度分布示意圖

2.2.4 像素光場疊加

前面小節有說明 DLP 系統像素是由每片微型鏡子反射所構成。其上光強度非均勻，而是近似於高斯分布 [30][31]。每個曝光圖型是由多個像素緊密排列所組成，也就是說是由多個高斯分布並列。每個像素並列後會有重疊處，導致曝光整體亮度提升高於單位像素的亮度，尤其光線經過物鏡縮小後，像素相鄰排列更為緊密，如圖 2-9，十個像素的光場經過排列疊加，整體亮度就會提升。由此推測當並列像素越多，整體亮度就越高，如圖 2-10。

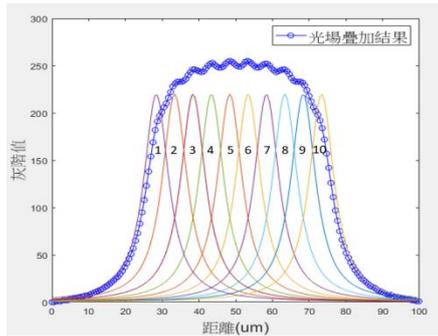


圖 2- 9、10 單位像素並排光場疊加結果

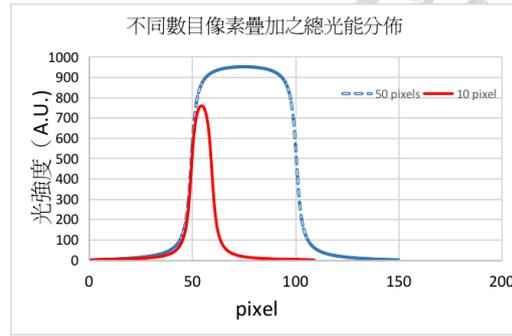


圖 2- 10、不同數目像素相鄰排列光強度

2.3 總結

經過前面文獻探討，DLP 技術中，當光線經過縮小後，因光場疊加，會導致光強度變強，穿透能力變高。因此，構想使用三種方式來解決問題。一、在列印樹脂中加入添加劑或降低光能量，降低光線穿透；二、改變給予光能量的方式；三、電極法。以上三種方式於 4.1 小節會詳細說明。

第三章、實驗設備與材料



3.1 即時監測 3D 列印設備

本研究承接實驗室學長所搭建設備進行研究。整體架構主要可分成三部分：CMOS 即時監測系統、3D 列印系統和控制系統，圖 3-1 是設備之簡易架構圖。

其中，3D 列印系統又可以拆成三軸移動機構與光路系統兩部分。控制系統是由 Creation Workshop 軟體(簡稱 CW)對 3D 列印系統進行操控。CMOS 即時監測系統其功能為即時反饋列印過程中的情況。[23]

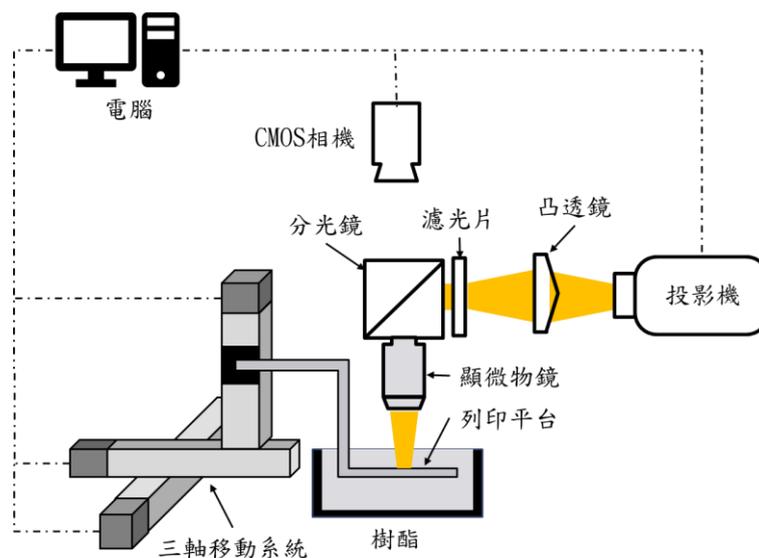


圖 3- 1、即時監測 3D 列印設備架構示意圖

3.1.1 投影機

本研究使用 BenQ TK850 4K DLP 光學投影機，該投影機畫面解析度為 Full HD 3840 pixels×2160 pixels。為達到實驗目標需將前鏡頭拆除，使投影畫面縮小至 32.7×18.4mm²。[23]



3.1.2 CMOS 即時監測系統

本研究即時監測系統硬體由 CMOS 數位相機搭配工業鏡頭所組成。分別是 Edmund Optics 公司產品 CMOS 數位相機 (EO-2113C Color USB 3.0 Camera)和中聯科創公司(ZLKC)製造的工業鏡頭(FM5028MP5)。透過 uEye Cockpit 軟體做影像管理。[23]

3.1.3 光路系統

本研究光路系統由顯微物鏡、凸透鏡、立方體分光鏡、平板分光鏡和濾光片所組成。[23]藉由投放全螢幕 13×13 網格圖案，從監測系統可量測單一格子的面積為 $0.183 \times 0.103 \text{mm}^2$ 。由此推算，列印機台之單位理論像素大小為 $0.62 \mu\text{m}$ ，但實際列印的解析度與使用的樹脂材料相關。

3.2 列印材料與相關設備

研究過程需藉由調整樹脂材料配方來改變其中一項列印參數，因此會用到多種材料與相關設備，將在本小節逐一介紹。同時也會說明不同配方之樹脂材料是如何命名。

3.2.1 列印材料

GS3D-S 樹脂

型號為 GS3D-S 的透明樹脂是由公司 newstuffaddict 生產和販售，在本研究中簡稱為 GS，其規格如表 3-1。其透光性高，利於監測系統觀測。

表 3-1、GS 樹脂之材料係數

黏稠度(Viscosity)	125~135cps/25°C
可吸收波長(UV curve)	380nm~405nm
硬度(Hardness)	洛氏硬度約 100



Onyx Rigid Pro410 樹脂

Onyx Rigid Pro410 樹脂是由 Phrozen 與 Henkel 合作生產。此款樹脂具有高工業性、低收縮變形之特性。在本研究中將其簡稱 ONYX，表 3- 2 為該樹脂材料係數。[25]

表 3- 2、Onyx Rigid Pro410 樹脂之材料係數

密度	1.1 g/cm ³	斷裂拉伸應力	43 MPa
楊氏模數	1687 MPa	彎曲模數	2200 MPa
伸長率	5%	IZOD 衝擊強度	25 J/m
Shore 硬度	78D		

Deep Black 樹脂

Deep Black 樹脂是由 Fun To Do 公司生產，其含有接近奈米等級的碳粒子，能列印出深度方向高分辨率之成品，其材料參數如表 3- 3 所示。在本研究中將該樹脂當作添加物使用，並簡稱為 DB。

表 3- 3、DB 樹脂之材料係數

黏稠度(Viscosity)	80mpa-s/25°C
可吸收波長(UV curve)	225nm~415nm
硬度(Hardness)	蕭氏硬度 81
收縮率(Shrinkage)	<0.5%
密度(Density)	1.05g/m ³

Sudan I 蘇丹紅一號

本研究使用蘇丹紅一號其主要功能為光抑制劑。因蘇丹紅一號具有吸收紫外光與波長較短的光線之特性，尤其吸收最大波長為 418nm。因此，在研究中被加入光敏樹脂中，吸收多餘光能量，以達到抑制光敏樹脂過度固化之功能。

碳黑(Carbon Black)

產品編號為 G34-KE-7805 碳黑，由泓明科技有限公司所販售，粒子直徑為 26nm。因碳黑粒子在透明光敏樹脂中，具有阻擋光線穿透之功能，因此將其加入樹脂中，以達到遮斷光線之效果。



3.2.2 相關設備

電子天秤

本研究需在樹脂中加入額外的添加物，最小單位皆為 0.01g。因此選用日本 SHIMADZU 島津天平公司生產的電子天平，其型號為 AUW220D。使用應搭配秤量紙，以達到最高精度。

超音波打碎機

樹脂加入添加物後，會使用超音波打碎機，將其均勻分散在樹脂中。本研究使用的超音波打碎機為德國公司 Hielscher Ultrasonics 之產品，其型號為 UP200S。該超音波打碎機可調整脈衝控制模式 (cycle) 和震幅(%)。

超音波震盪器

在清洗列印試片時，如果遇到黏度較高的光敏樹脂，如：ONYX，就需要藉由超音波震盪器輔助清洗。本研究使用的超音波震盪器型號為 BK-3550，可以調整震盪功率、震盪時間。

3.2.3 樹脂命名

本研究使用兩種不同成分樹脂材料，分別為以 100ml GS 樹脂、100ml AC 樹脂及 100ml Onyx Rigid Pro410 樹脂為主要材料，再額外加入不同量的蘇丹紅一號、碳黑或 DB。

本研究將命名格式定為 GS-[X]S- [Y]CB-[Z]DB，代表以 100ml 的 GS3D-S 樹脂為主要原料，加入 X 克的蘇丹紅、Y 克的碳黑、Z 毫升的 DB 樹脂。若 X、Y、Z 為 0 則忽略不計，範例如下表。

表 3-4、樹脂配方命名說明表

命名	光敏樹脂	蘇丹紅(g)	碳黑(g)	DB(ml)
GS-0.15S-0.35CB-10DB	GS 樹脂 100ml	0.15	0.35	10
AC-0.3S-30DB	AC 樹脂 100ml	0.3	0	30
ONYX-0.2CB	ONYX 樹脂 100ml	0	0.2	0

3.3 實驗量測設備

3.3.1 立體顯微鏡

本研究使用立體顯微鏡對列印成品進行初步觀察，可檢查結構是否完整、通透和量測 X、Y 方向尺寸。該立體顯微鏡，可調整光圈亮度、放大倍率範圍 7~45 倍，並搭配套筒及 CCD 相機，進行拍照。因放大倍率和量測精度皆有限，因此進一步需要使用金相顯微鏡觀察和彩色共軛焦表面輪廓量測儀測量厚度。

3.3.2 電子掃描顯微鏡(SEM)

本研究使用 HITACHI 公司製造之 TM3000 掃描式電子顯微鏡，用於觀察結構細部。因樹脂不導電，在觀察 SEM 之前，需要先鍍上一層金，方可使用。

3.3.3 白金濺鍍機

本研究使用型號為 JEC-3000FC 的白金濺鍍機，由日本公司 JEOL 所研發製造。

濺鍍原理是在真空腔體中以靶材為陰極，通入惰性氣體，氣體內少量的自由電子受到外加電場作用，電子在電場中會被加速獲得能量，高能量的電子經由碰撞將動能轉移至惰性氣體上，使得氣體分子被離子化形成電漿。因電場的作用下，氣體中的正離子受到陰極靶材端所吸引，加速撞擊靶材表面，離子撞擊會將靶原子給擊出，而沉積於工件。[27]因此，可藉由調整電流大小和濺鍍時間，來決定鍍白金厚度。



3.3.4 彩色共軛焦表面輪廓量測儀

彩色共軛焦顯微鏡是利用軸向色散物鏡，使入射光源之光譜產生軸向色散，並聚焦於不同位置，如圖 3-2 所示，此時若待測物表面高度位於光譜 λ_m 之聚焦位置，則 λ_m 之光譜將被反射穿越共軛空間濾波器。接著由光譜儀分析入射光束之光譜成分，藉由峰值偵測，即可得知聚焦點光譜之波長。[26]

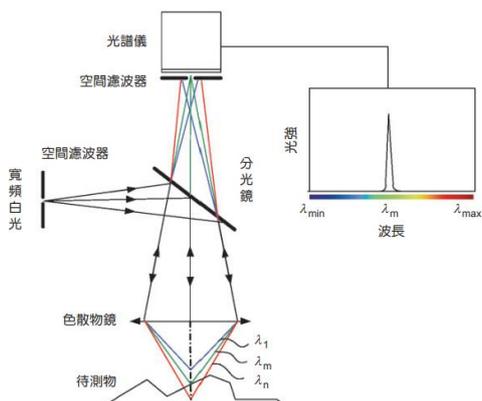


圖 3-2、彩色共軛焦顯微鏡原理示意圖[26]

第四章、實驗方法與流程



4.1 實驗理論與方法說明

由 2.2 小節說明的不同因素對固化厚度的影響，可推斷出因為過高的光能量和樹脂的高透光性，導致產生過多自由基或陽離子，造成深度方向過度固化。由此，推論出以下三種方式來改善這種情況：

1. 降低光對樹脂之穿透性：

因使用的樹脂具有較高的穿透性，因此，可加入具有吸收光能量的其他材料改善。例如：碳黑、蘇丹紅一號……等；或可直接降低曝光能量。

2. 在固定給予之總能量之下，改變能量給予方式：

參考 2.2.4 光場疊加原因，在固定給予的總能量下，不再單次大面積曝光，而是將曝光的面積碎片化，降低光強度，再拼湊出原本圖案，利用這種方式來將低光源大面積穿透樹脂。或者將單次曝光時間分割多次，但累積總曝光時間卻不改變，由此方法使產生多餘的自由基有多餘的時間擴散至別處。

3. 直接影響光起始劑反應後之產物：

在 2.2.1 小節中，介紹光起始劑吸收光能量後，會激發其分子產生自由基或陽離子。如果將這些帶電荷的

產物，藉由外力引至別處，推測可以減少不必要的深度固化反應。

由上述所推測之方式進行以下實驗：

1. 調整數酯配方

使用 GS、ONYX 兩種不同的樹脂當作列印主材料，分別加入不同量的蘇丹紅、碳黑或 DB 來列印，觀察不同添加物對深度方向固化之影響。

2. 灰階法

將原始的曝光圖亮度，藉由調整不同的灰階值，降低其亮度進行曝光。



3. 不同馬賽克尺寸

將原始曝光面積，用黑白相間的格子進行切割成馬賽克圖案，並且拆成正片與負片顏色互相對比的曝光圖。例如:圖 4-1 箭頭左側為原始的曝光面積，經處理後，變成由兩張黑白顏色相反的圖案組成(箭頭右側)，但將兩張圖片進行重疊投影後，會拼湊回原始曝光面積。實驗用來比較不同尺寸馬賽克對層厚的影響。

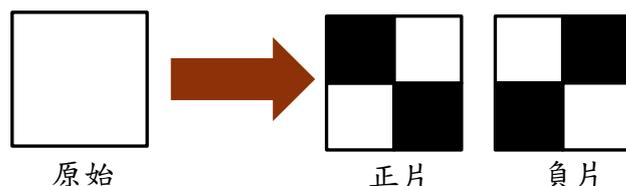


圖 4-1、馬賽克法曝光圖簡易說明

4. 增加單層曝光次數

將原始曝光的時間，分為多次曝光，但單位面積累加的總曝光時間與原始曝光時間相同。舉例來說:圖 4-2 箭頭左方為原始曝光時間單次 6 秒，經過修改後，分成三次曝光一次曝光時間降低為 2 秒，但加總的曝光時間與原始曝光時間一樣是 6 秒，也就是說給予的總能量不改變。

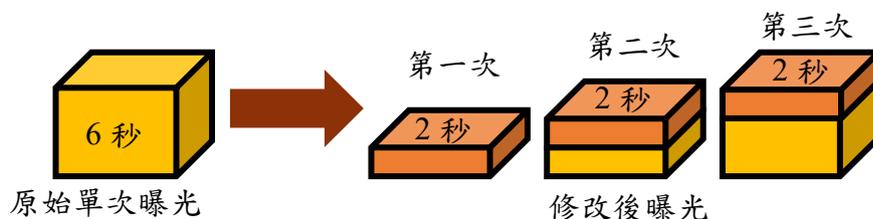


圖 4-2、增加單層曝光次數”說明具象示意圖

5. 電極法

在樹脂的上下方各加入一個電極片，並連接電源供應器，讓樹脂間產生電場。藉由電場將光起始劑激發後帶電荷產物，引至上下方並吸附於電極片上。

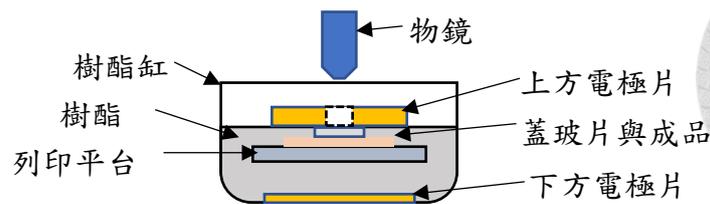


圖 4-3、電極法側視示意圖

以上幾種方案會先以列印單層來找出最佳方式，再將其運用於其他立體結構。

4.2 研究流程

本研究整體的實驗流程有以下八個步驟，結構設計、模型切層、參數設置、對焦、列印、清洗、觀測、厚度量測，如圖 4-4。完成以上步驟後，再將量測數據進行整理與分析並且判定使用何者方式列印為控制 Z 軸方向厚度的最佳方式。詳細內容會在此小節說明。

1. 結構設計:在電腦繪圖軟體中設計出需要列印之立體圖，並將其輸出為 STL 檔。
2. 切層:將 STL 檔匯入 CW 內切層，並產生各層之曝光圖和簡易 G-code。
3. 參數設置：調配選定的樹脂配方，修改曝光圖與 G-code。
4. 對焦：使用 COMS 即時監測設備，將平台上下移動至投影對焦位子，同樣也將樹脂液面調整至與列印平台相同高度。
5. 列印：按下開始列印。
6. 清洗：使用工業酒精將列印好的成品沖洗乾淨。
7. 觀測：利用立體顯微鏡進行初步觀察，如結構完整，則進一步使用金相顯微鏡觀察並拍照。
8. 厚度量測: 先將試片上方均勻地鍍上一層不透光的白金，再使用彩色共軛焦表面輪廓量測儀量測厚度。

以上步驟為一次完整列印的程序，研究過程中需要一直回到步驟 3 不斷循環之後的步驟，直到找出最佳控制厚度的方式。

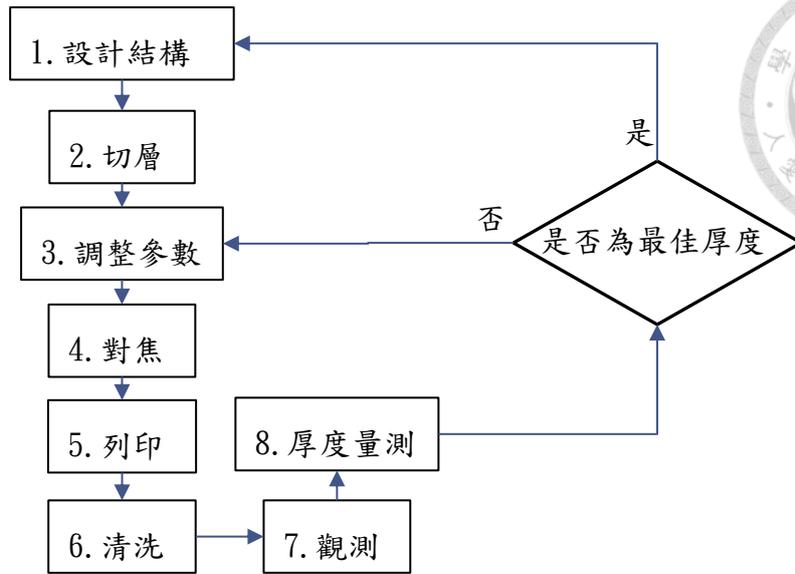
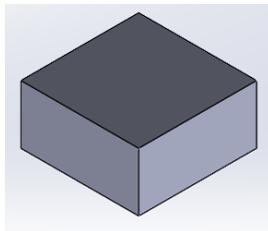


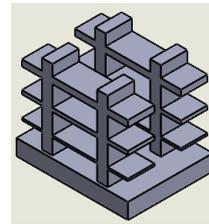
圖 4-4、實驗流程示意圖

4.2.1 結構設計

因為本研究所使用 3D 列印設備具有列印尺寸的限制，因此設計立體結構時，X、Y 方向尺寸需小於 1mm。在實驗過程中，常用結構有列印單層所使用的立方體和鏤空井字結構。完成設計後，需將 CAD 檔轉為 STL 檔。



(a)



(b)

圖 4-5、結構設計(a)立方結構、(b)井字結構等角視圖

4.2.2 切層

3D 列印原理就是一層一層堆疊，因此需要將設計好的結構 STL 檔匯入 CW，由軟體內建功能進行切層。CW 會依據設定層厚，自動產出相對應數量的曝光圖和一組簡易的 G-code。



4.2.3 調整參數

本研究中需要調整參數有樹脂成分配方、曝光圖圖案和曝光時間。因此依照需求去調整樹脂成分和修改曝光圖與 G-code，調整和修改方式會在本小節說明。

4.2.3.1 樹脂調配

樹脂調配流程如下：

1. 在樹脂缸中倒入 100ml 的光敏樹脂。
2. 使用電子秤量取需要的蘇丹紅、碳黑……等添加物加入光敏樹脂中。
3. 利用超音波打碎機將樹脂混和物打碎，打碎機 cycle 設定為 1、震幅設定為 35%，直到樹脂中的添加物均勻分布。
4. 由於使用超音波打碎機會使樹脂溫度升高，因此需要將其靜置直到恢復室溫。
5. 當樹脂恢復室溫後，即可開始列印。
6. 在實驗過程中，如要不斷加入添加物，只需從步驟 2 開始。

4.2.3.2 曝光圖和 Gcode 修改

修改之前(原始)

經過切層後，會得到一組原始的曝光圖和 G-code。圖 4- 6 為其中一層的原始曝光圖，原始設定參數為單層曝光時間 2000ms。本研究中，將此參數稱作:None(曝光圖不處理)-1×2000ms(單層 1 張曝光圖曝光時間 2000ms)。



圖 4- 6、單層原始曝光圖



以下為列印單層 G-code 之簡單說明:

```
; (Anti Aliasing Value = 1.5 )
; (Z Lift Feed Rate = 30.00000 mm/s )
; (Z Bottom Lift Feed Rate = 30.00000 mm/s )
; (Z Lift Retract Rate = 30.00000 mm/s )
; (Flip X = False)
; (Flip Y = False)
; Number of Slices = 1
; (****Machine Configuration *****)
; (Platform X Size = 2.63mm )
; (Platform Y Size = 1.52mm )
; (Platform Z Size = 6mm )
; (Max X Feedrate = 100mm/s )
; (Max Y Feedrate = 100mm/s )
; (Max Z Feedrate = 100mm/s )
; (Machine Type = UV_DLP)
; ***** Header Start *****
; Here you can set any G or M-Code which should be executed BEFORE the build process
G21 ;Set units to be mm
G91 ;Relative Positioning
M17 ;Enable motors
; ***** Header End *****
; ***** Pre-Slice Start *****
; Set up any GCode here to be executed before a lift
; ***** Pre-Slice End *****
; <Slice> 0
; <Delay> 2000
; <Slice> Blank
; ***** Lift Sequence *****
G1 Z.0 F30.0
G1 Z.0 F30.0
; <Delay> 1999
; ***** Lift Sequence *****
; ***** Footer Start *****
; Here you can set any G or M-Code which should be executed after the last Layer is Printed
M18 ;Disable Motors
; <Completed>
; ***** Footer End *****
```

共一張曝光圖

投影第一張曝光圖 2 秒

平台移動 0mm

圖 4-7、修改前原始 G-code

修改之後

(1) 曝光圖修改

利用 photoshop 軟體，曝光圖經過馬賽克(mosaic)化後，原始的單層單張曝光圖會變成由兩張黑白對比的正片和負片組成，如圖 4-8。



圖 4-8、修改後曝光圖(a)正片(b)負片

同時，該曝光圖在修改過程中是使用 $15 \times 15(\text{mm}^2)$ 格子進行馬賽克化，因此將其命名為”mac15”。本研究中，共使用三種不同尺寸的格子進行馬賽克化，有 $5(\text{mm}^2)$ 、 $10 \times 10(\text{mm}^2)$ 、 $15 \times 15(\text{mm}^2)$ ，分別命名為 mac5、 mac10、 mac15，如圖 4-9。

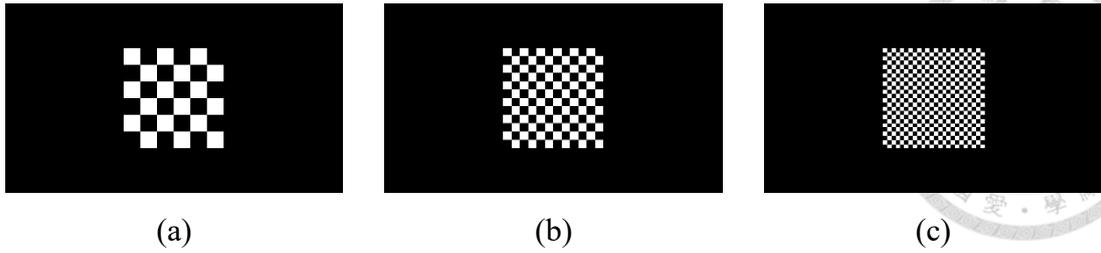


圖 4-9、三種不同尺寸之馬賽克(a)mac15(b)mac10(c)mac5

(2) G-code 修改

在「馬賽克法」、「增加單層曝光次數」兩者實驗皆需要進行 G-code 修改。以下會分別說明如何修改。

首先，「馬賽克法」之 G-code 修改，延續修改前單層列印曝光時間 2 秒，如果要維持修改後的曝光圖單位面積吸收能量與未修改相同的話，就要將單層總曝光時間變成兩倍，共曝光 4 秒，因為正片與負片各需要曝光 2 秒。

```

; (Flip X           = False)
; (Flip Y           = False)
Number of Slices   = 2
; (****Machine Configuration *****)
; (Platform X Size  = 2.63mm )
; (Platform Y Size  = 1.52mm )
; (Platform Z Size  = 6mm )
; (Max X Feedrate   = 100mm/s )
; (Max Y Feedrate   = 100mm/s )
; (Max Z Feedrate   = 100mm/s )
; (Machine Type     = UV_DLP)
; ***** Header Start *****
; Here you can set any G or M-Code which should be executed BEFORE the bu
G21 ;Set units to be mm
G91 ;Relative Positioning
M17 ;Enable motors
; ***** Header End *****
; ***** Pre-Slice Start *****
; Set up any GCode here to be executed before a lift
; ***** Pre-Slice End *****
<Slice> 0
<Delay> 1000
<Slice> Blank
; ***** Lift Sequence *****
G1 Z.0 F30.0
G1 Z.0 F30.0
<Delay> 101
; ***** Lift Sequence *****
; ***** Pre-Slice Start *****
; Set up any GCode here to be executed before a lift
; ***** Pre-Slice End *****
<Slice> 1
<Delay> 1000
<Slice> Blank
; ***** Lift Sequence *****
G1 Z.0 F30.0
G1 Z.0 F30.0
<Delay> 101
; ***** Lift Sequence *****

```

共兩張曝光圖

曝光第一張圖曝光圖(正片)

曝光第二張圖曝光圖(負片)

圖 4-10、馬賽克法之 G-code 修改

在 4.1 小節中有說明「增加單層曝光次數」的原理是將原始曝光時間分為多次曝光。因此，在固定單層總曝光時間的情況下，增加曝光次數，同時也需要減少單張曝光圖的曝光時間，這樣才能固定單位面積所吸收的光能。舉例來說：將原始單



層的曝光圖增加成 2 張，為確保單位面積的曝光時間固定在 2 秒，所以單張曝光時間皆為 1 秒，由此將此列印參數命名為:2(張)x(單張曝光)1000ms。以此邏輯類推，可不斷增加單層曝光圖張數:4×500ms、10×200ms……。

如果將「馬賽克法」、「增加單層曝光次數」兩者參數結合修改 G-code，也就是將原始的曝光參數(1×2000ms)，改成正片、負片、正片、負片四張輪流曝光此時參數則變成 4×1000ms。表 4-1 為整理出在固定單層單位面積曝光時間 2 秒下，使用「馬賽克法」並且同時改變單層曝光圖張數和單張曝光時間的表格。

表 4-1、G-code 參數修改命名表格

參數命名	單層曝光圖張數	單張曝光時間(ms)	單層總曝光時間(ms)
未修改曝光圖 (1×2000ms)	1	2000	2000
4×1000ms	4	1000	4000
8×500ms	8	500	4000
10×400ms	10	400	4000

4.2.3.3 灰階(gray)調整

圖 4-6 為原始亮度的曝光圖，可藉由 photoshop 軟體，將亮度從最亮(灰階值 255)逐漸降低至最暗(灰階值 0)，下圖為不同灰階值的圖片。

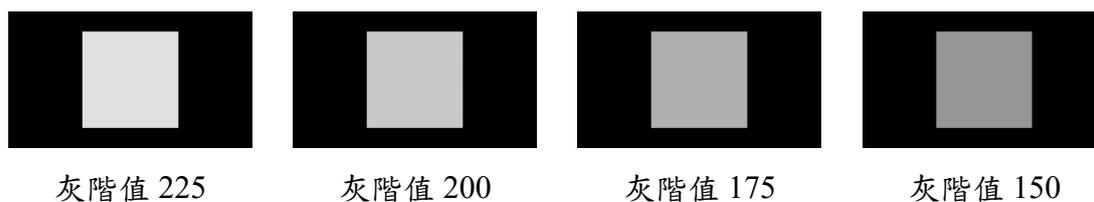


圖 4-11、灰階值說明



4.2.4 對焦

為確保列印品質，需將列印平台和樹脂液面皆移動至投影對焦面，因此本研究使用「二次對焦法」[23]來完成此步驟。在對焦前，將蓋玻片放置於列印平台吻合的凹槽內，並使用無痕膠帶固定兩邊。因為樹脂在開始列印後會較慢流入平台中央，為了降低平台和樹脂間的摩擦力，使樹脂較快流入，會在先在列印平台塗抹一層薄的樹脂層，再進行對焦步驟。

首先，將平台移動至對焦面上，可藉由即時監控畫面來確認(最清晰畫面)，接著將平台水平移開，同樣將樹脂缸由升降平台上升至對焦面，最後就可以將平台水平移回原本位置，如此一來列印平台和樹脂液面皆在對焦面上，即可開始列印，圖 4- 12 為二次對焦示意圖。

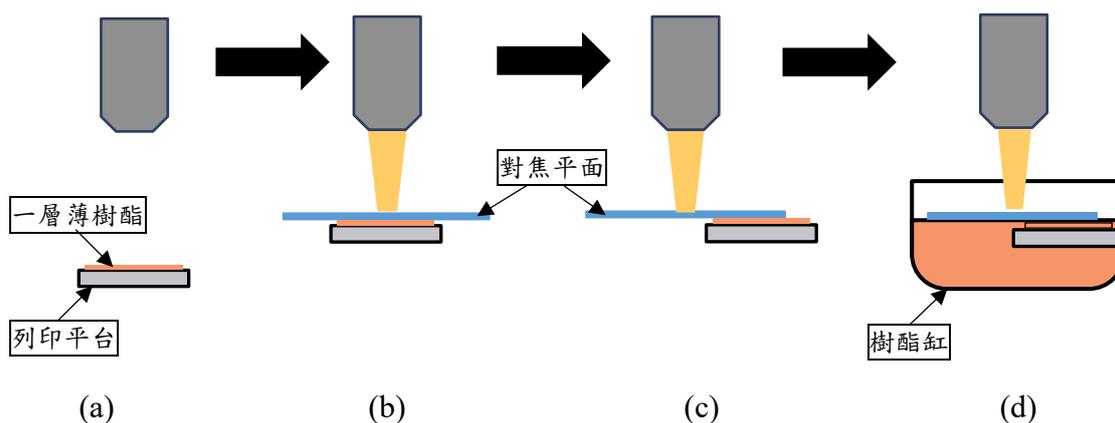


圖 4- 12、二次對焦法流程示意圖

- (a)在平台鋪上一層薄樹脂
- (b)將平台移動至對焦平面上
- (c)將平台水平移開
- (d)將樹脂缸上升至液面對齊對焦面



4.2.5 列印

基本列印流程，為以下四個步驟，在對焦完成之後，就先進行第一次曝光，接著平台下降單層設定高度，樹脂會流入平台，再不斷重複進行前面的曝光、平台下降，直到列印完成。圖 4-13 為簡單的說明示意圖。

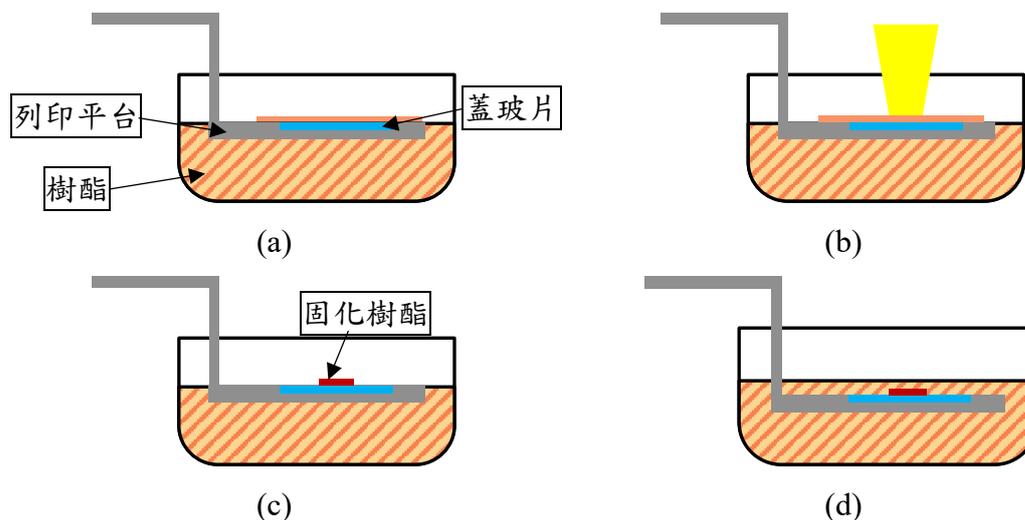


圖 4-13、(a)對焦完成之初始狀態(b)曝光(c)產生固化(d)平台下移

4.2.6 清洗與觀測

列印完成後，用鑷子將膠帶移除，並將試片取出浸泡於工業酒精中，同時可使用裝有工業酒精之洗滌瓶輕微沖洗。如果遇到黏度較高的樹脂或加入碳黑之列印材料，可使用超音波震盪器輔助清洗。由於列印單層的厚度極薄，為避免在清洗過程中將其沖掉，盡可能使用超音波震盪器最低震盪幅度(35W)進行清洗，直到多餘樹脂清理乾淨，如未清洗乾淨會導致多餘的固化，對厚度量測有嚴重的影響。清洗乾淨後，再使用立體顯微鏡進行外觀觀察並拍下俯視圖和側視圖。

4.2.7 鍍白金與厚度量測

因列印的試片和成品透明度較高，會導致無法使用彩色共軛焦表面輪廓量測儀量測。因此需要先在試片表面均勻地鍍上一層白金，實驗中使用的鍍白金參數為20mA、30秒，接著再使用共軛焦表面輪廓量測儀量測厚度。

共軛焦表面輪廓量測儀量測厚度數據取得方式：首先，先將列印成品進行掃描，如圖 4-14(a)。並選擇量測位置，畫出剖面線。在本研究中，基於量測時間金錢成

本考量，每個列印成品會選擇三個位置進行量測。如圖 4-14 中，畫出的三條不同顏色的剖面線。分別對應圖 4-14(b)由上而下的三張剖視圖的平均厚度。

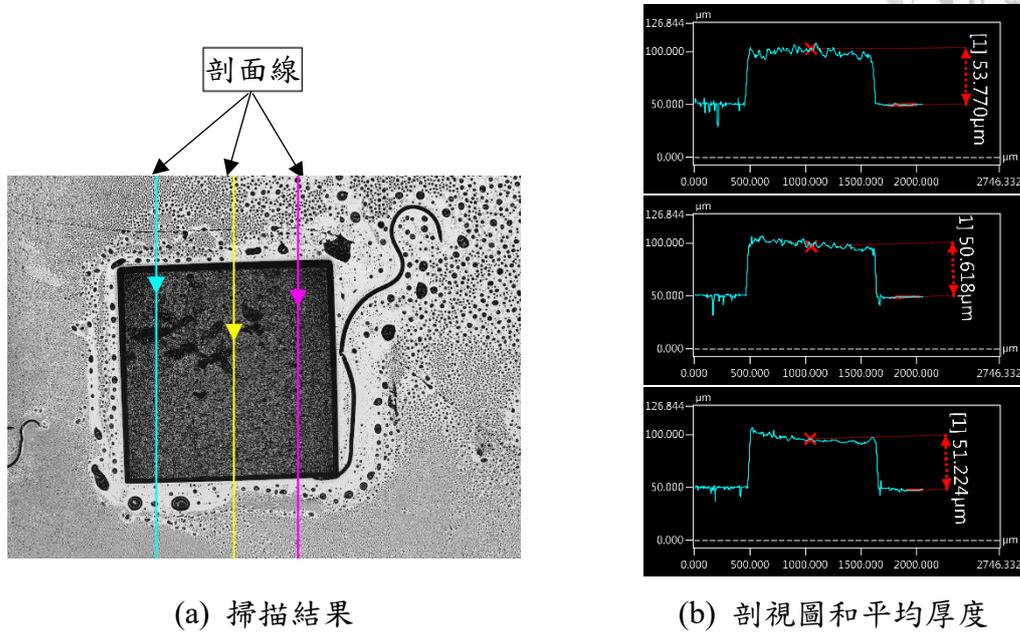


圖 4-14、共軛焦表面輪廓量測儀厚度數據取得說明

4.2.8 樓板量測方式

為了測試本研究多種改善厚度的方式，最後會應用在動機所述之井字結構，量測樓板厚度，同時觀察是否有改善吊床現象。在設計的三個樓板中，會選擇最上層的樓板進行量測，其設計尺寸為 $60\mu\text{m}$ ；樓板間隔高度則會量測最上層樓板和中間樓板之間的距離，其設計尺寸為 $190\mu\text{m}$ 。量測方式將從列印成品側面視角的兩個柱子之間，等間距取五個樓板位置量測，由左至右分別為「位置 1」到「位置 5」；量測樓板間隔高度，同樣在兩柱子間等間距取三個或五個數據。(如圖 4-15)

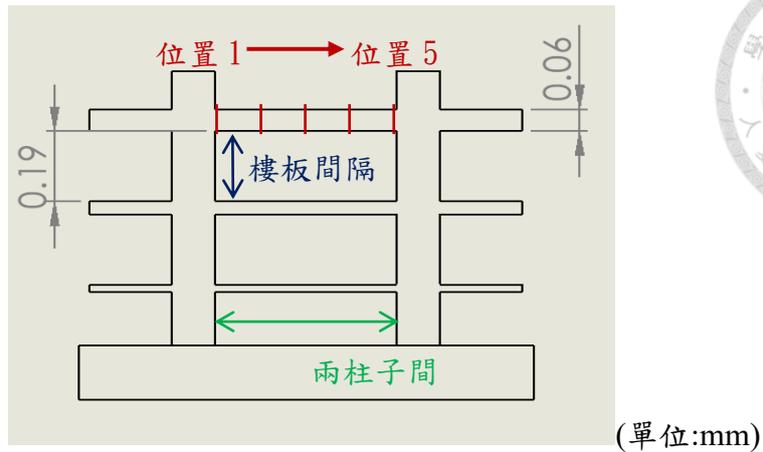


圖 4- 15、井字結構量測數據說明

4.3 列印單層方法

列印單層的方式，與前面所介紹的列印流程有所差異，前面介紹的列印方式為向上堆積列印，但在列印單層時，為了更準確的得到每種樹脂配方的 Z 軸方向解析度，因而將列印方式改成直接曝光 1mm×1mm 的正方形(圖 4-6)在蓋玻片上，讓樹脂自行向下延伸固化於蓋玻片下方(如圖 4-16)。

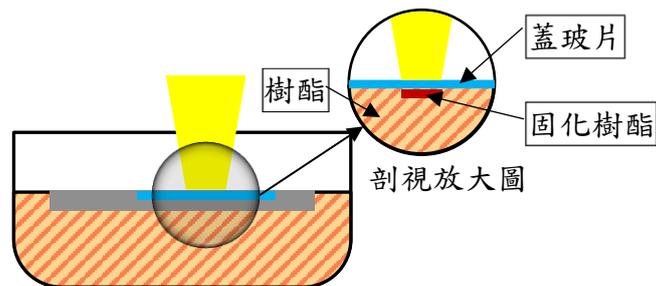


圖 4- 16、單層列印示意圖

第五章、實驗結果與討論



5.1 不同樹脂配方結果

以 GS、ONYX 兩種不同光敏樹脂為主列印材料，另外加入不同劑量之添加物(蘇丹紅、碳黑、DB)，進行不同曝光時間之單層列印。比較不同樹脂配方對深度固化的影響，同時找出最合適的樹脂配方和曝光參數做下一階段的馬賽克實驗。

5.1.1 GS 光敏樹脂

以 GS 樹脂為主要材料進行單層列印，再分別加入不同量的蘇丹紅、DB、碳黑和蘇丹紅與 DB 兩樣之混合物進行同樣的步驟。最後，將列印成品厚度量測並進行觀察分析。

GS 純樹脂

圖 5-1 為純 GS 樹脂單層列印之成品側視圖，從曝光 1.5 秒開始有固化反應，逐漸將曝光時間加長，直到曝光 5 秒。從照片中可以看見，成品外觀多為尖銳柱狀。經過量測之後，以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(s)為 x 軸畫出柱狀圖(圖 5-2)。

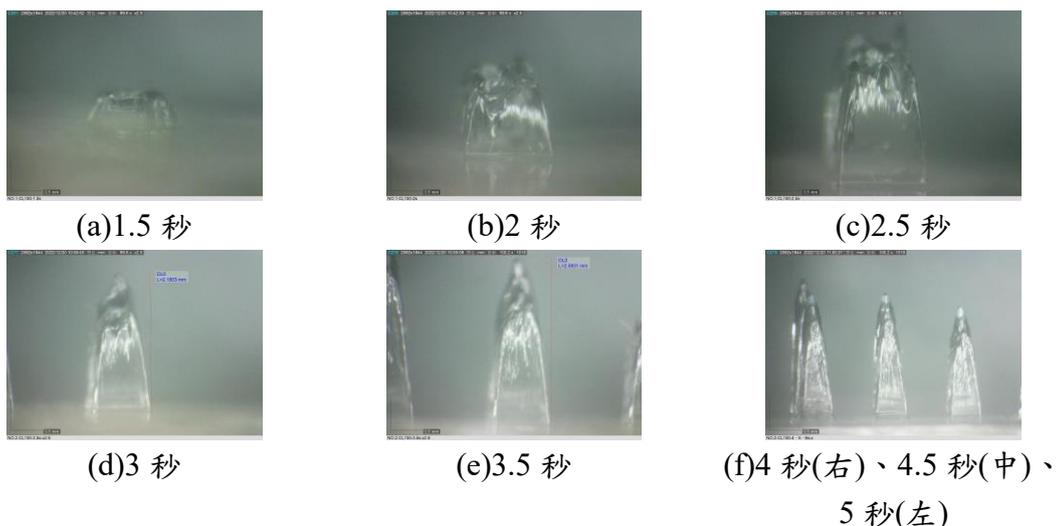


圖 5-1、GS 純樹脂單層列印成品側視圖(a)-(f)分別為曝光不同時長

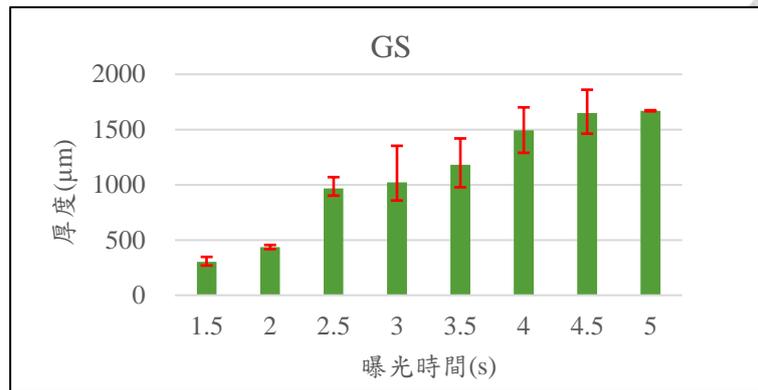


圖 5-2、GS 樹脂單層列印厚度數據

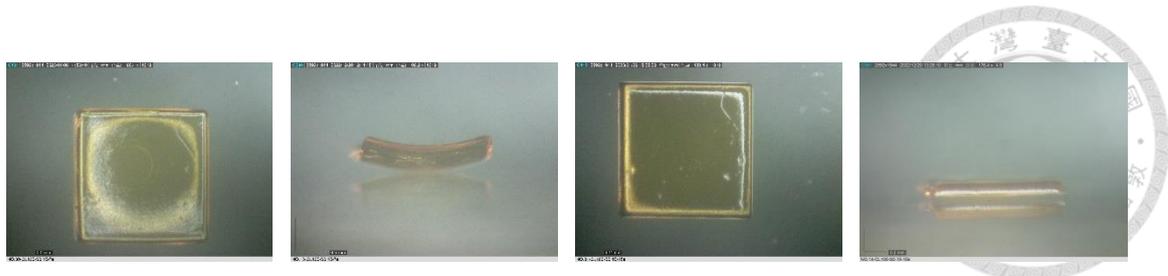
GS 樹脂加蘇丹紅

在純 GS 樹脂加蘇丹紅的實驗中，共有三種不同劑量的蘇丹紅，分別為 0.05g、0.15g、0.3g。每加入一次就做一次單層列印並量測厚度同時和 GS 純樹脂進行比較。

從圖 5-3 中可以觀察到，加入蘇丹紅列印成品外觀頂面光滑，但在曝光時間較短的情況下，有翹曲的現象。在列印過程中，隨著蘇丹紅的劑量增加，曝光時間長短不同，會有明顯不一樣的翹曲程度，嚴重的情況下，會導致無法量測厚度。因此整理出表 5-2 來簡易說明，使用不同樹脂配方各個曝光時間之成品外觀目測情形。表格中有五種不同情況的圖示說明(如下表)，同時可搭配圖 5-3 進行比對：

表 5-1、圖例說明

x	時長不足未固化。
▲	有列印出，但嚴重捲曲或清洗時不小心被沖掉(完全無法量測)。圖 5-3(c)
◎	有列印出，部分翹曲 or 部分成形。圖 5-3(a)
●	有列印出，無以上所述問題。圖 5-3(b)
表格空白	沒有嘗試列印該參數



上視圖

側視圖

(a) GS-0.15S 曝光 7 秒

上視圖

側視圖

(b) GS-0.15S 曝光 15 秒



上視圖

(c) GS-0.3S 曝光 6 秒

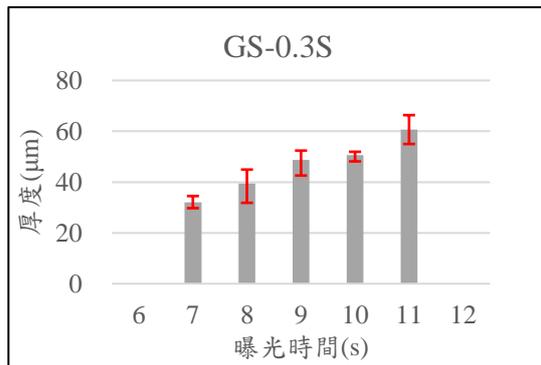
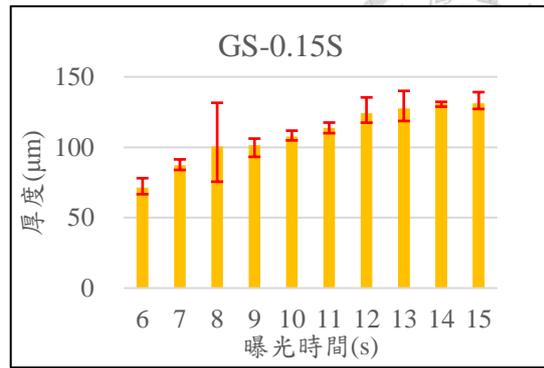
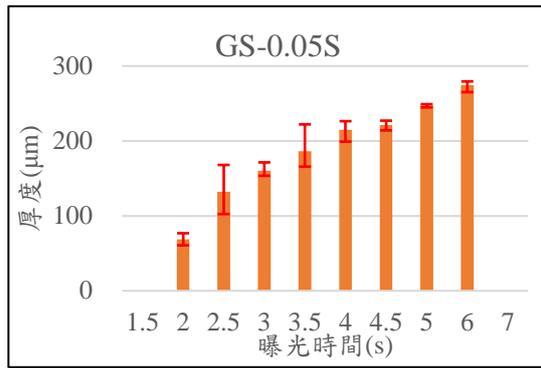
圖 5-3、GS-[X]S 部分列印成品上視圖、側視圖

表 5-2、GS 樹脂加入不同劑量蘇丹紅單層列印之外觀情況表格

樹酯 \ 曝光時間(s)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
GS	x	x	●	●	●	●	●	●	●	●											
GS-0.05S	x	x	▲	◎	◎	●	●	●	●	●											
GS-0.15S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	◎	◎	◎	◎	●	●	●	●	●	●	●
GS-0.3S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	▲	▲	▲	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

成品經過鍍白金與量測後，將測得之數據依照不同樹脂配方以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(s)為 x 軸分別畫出柱狀圖(圖 5-4)。從圖 5-4 中會發現，在無添加蘇丹紅的情況下，固化起始時間為 1.5 秒。隨著蘇丹紅劑量增加，起始固化的時間會延後。

當加入 0.05g 蘇丹紅，雖然起始固化時間仍然為 1.5 秒，但列印成品因曝光能量不足的緣故，在清洗過程中容易被沖掉。隨著蘇丹紅的劑量增加至 0.15g、0.3g，起始固化的時間也增加至 6 秒。



(a)

(b)

(c)

圖 5-4、GS-[X]S 樹脂配方單層列印厚度數據

(a)[X]=0.05 (b)[X]=0.1 (c)[X]=0.15

GS 樹脂加 DB

在純 GS 樹脂加 DB 的實驗中，DB 共有兩種不同劑量，分別為 10ml、30ml。每加入一次就做一次單層列印並量測厚度同時和 GS 純樹脂進行比較。

從圖 5-5 可以觀察到，加入 10ml DB 之列印成品，外觀與純 GS 樹脂相似，為尖銳柱狀，且頂部崎嶇呈圓頂狀；加入 30ml DB 之外觀(圖 5-5 (d))則較為方正，從上視圖可看到頂部有凹凸不平的紋路，但整體而言明顯比 10ml DB 來的平整，且有較完整的方形圖案。



上視圖

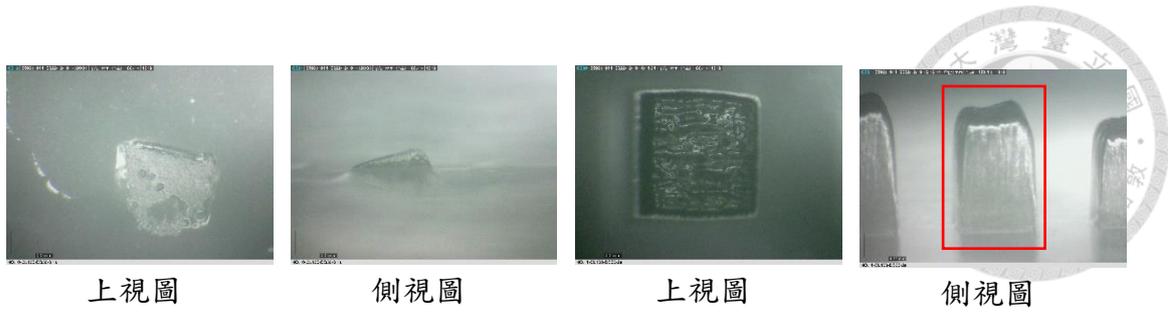
側視圖

上視圖

側視圖

(a) GS-10DB 曝光 0.4 秒

(b) GS-10DB 曝光 2 秒



(c) GS-30D 曝光 0.1 秒 (d) GS-30DB 曝光 2 秒

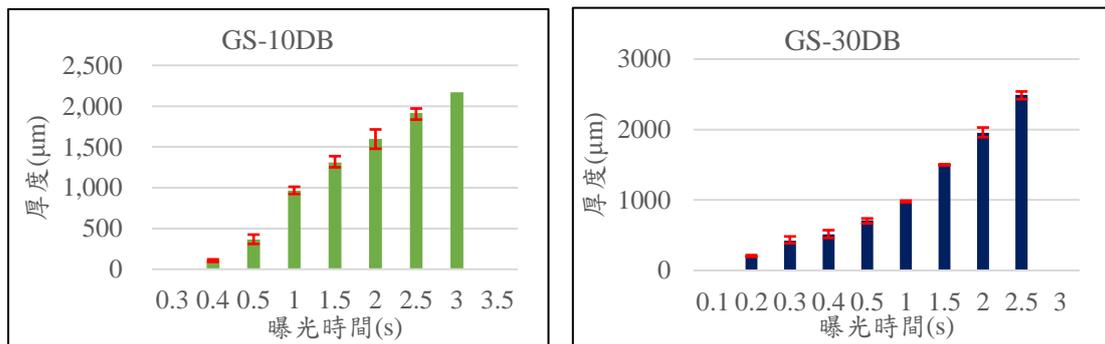
圖 5-5、GS-[X]DB 部分列印成品上視圖、側視圖

表 5-3、GS 樹脂加入不同劑量 DB 單層列印之外觀情況表格

樹酯 \ 曝光時間(s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
GS	X	X	X	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●	●
GS-10DB	X	X	X	◎	●	●	●	●	●					
GS-30DB	▲	◎	●	●	●	●	●	●	●	●				

成品經過鍍白金與量測後，將測得之數據依照不同樹脂配方以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(s)為 x 軸分別畫出柱狀圖(圖 5-6)。從圖 5-6 中會發現，在無添加 DB 的情況下，固化起始時間為 1.5 秒。隨著 DB 劑量增加，起始固化的時間會提早。

在加入 10ml DB 的情況下，固化的起始時間提前至 400 毫秒；當 DB 的劑量增加至 30ml，則連續曝光 100 毫秒即可以固化。



(a)

(b)

圖 5-6、GS-[X]DB 樹脂配方單層列印厚度數據(a) [X]=10 (b) [X]=30



GS 樹脂加碳黑

在純 GS 樹脂加碳黑的實驗中，碳黑共有四種不同劑量，為 0.05g ~ 0.2g 以 0.05g 為單位依次加入。每加入一次就做一次單層列印和量測厚度，將測得之數據依照不同樹脂配方以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(s)為 x 軸分別畫出柱狀圖(圖 5-8)。

從圖 5-7 中，可觀察出加入碳黑會造成列印成品頂面有嚴重的不規則凹凸狀，導致頂面不光滑平整。然而，碳黑對於固化初始時間並無影響，與純 GS 樹脂的初始固化時間一樣為 1.5 秒(表 5-4)。

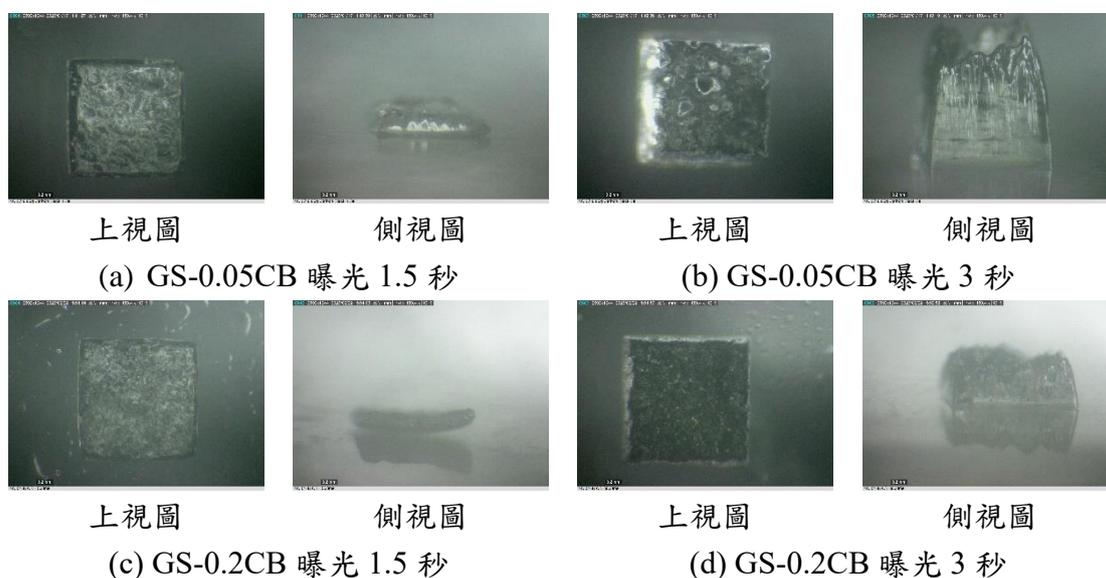


圖 5-7、GS-[X]CB 部分列印成品上視圖、側視圖

表 5-4、GS 樹脂加入不同劑量碳黑單層列印之外觀情況表格

樹酯 \ 曝光時間(s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
GS	x	x	x	x	x	x	●	●	●	●	●	●	●	●
GS-0.05CB	x	x	x	x	x	x	●	●	●	●	●	●	●	●
GS-0.1CB	x	x	x	x	x	x	◎	●	●	●	●	●	●	●
GS-0.15CB	x	x	x	x	x	x	◎	◎	●	●				
GS-0.2CB	x	x	x	x	x	x	▲	●	●	●				

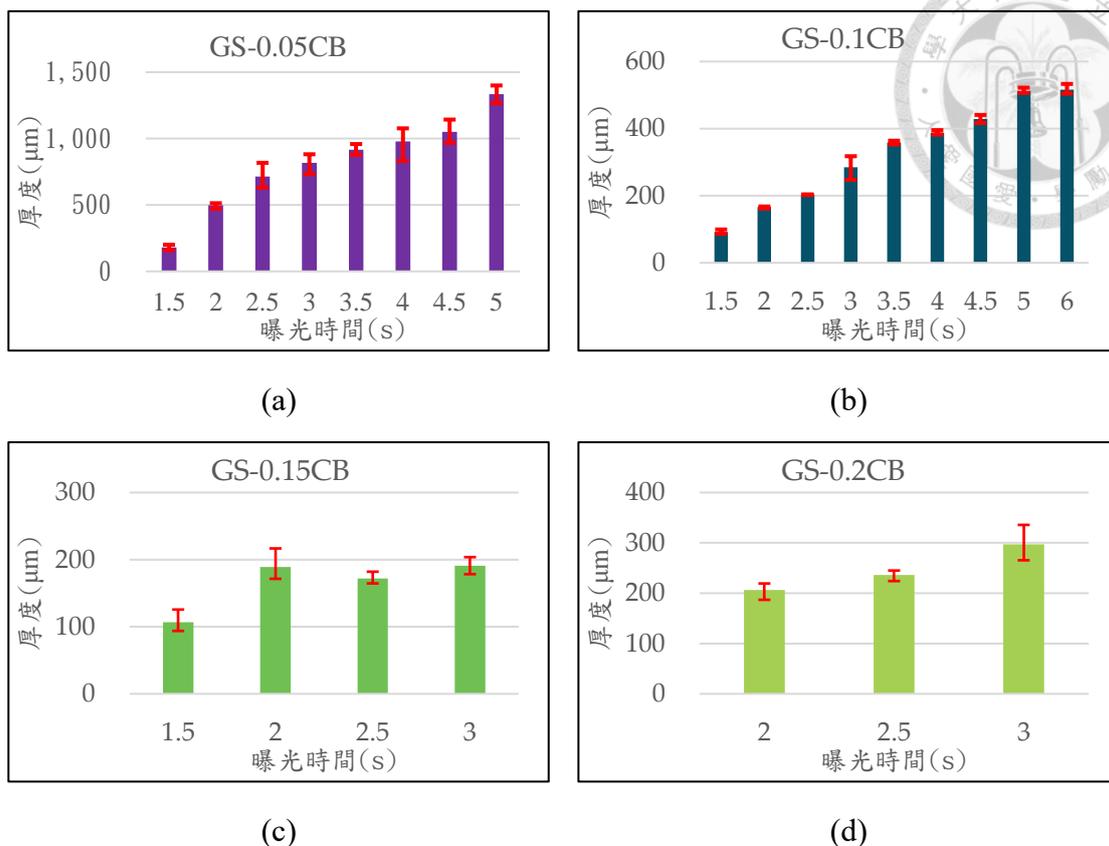


圖 5-8、GS-[X] CB 樹脂配方單層列印厚度數據

GS 樹脂加蘇丹紅& DB

在 GS 純樹脂中，同時加入蘇丹紅與 DB，共有以下四種不同的配方。藉由同時加入兩種添加物，來觀察在列印過程中兩者的交互作用。同樣做單層列印並量測厚度，將測得之數據依照不同樹脂配方以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(s)為 x 軸分別畫出柱狀圖(圖 5-9)。

表 5-5、GS 樹脂加入不同劑量蘇丹紅和 DB 單層列印之外觀情況表格

樹酯 \ 曝光時間(s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
GS	x	x	x	x	x	x	●	●	●	●	●	●	●	●
GS-0.15S-10DB	x	x	x	x	x	▲	◎	◎	●	●	●	●	●	●
GS-0.15S-30DB	x	x	▲	◎	◎	◎	●	●	●	●				
GS-0.3S-10DB	x	x	x	x	x	x	▲	▲	▲	▲	◎	◎	◎	◎
GS-0.3S-30DB	x	x	x	x	x	▲	▲	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎



其外觀和初始固化時間的結果結合了,加入蘇丹紅與 DB 的特性。從表 5-5 中,會發現 DB 對初始固化時間的影響大於蘇丹紅,因以下四種配方整體初始固化時間相較於純 GS 樹脂皆提前。

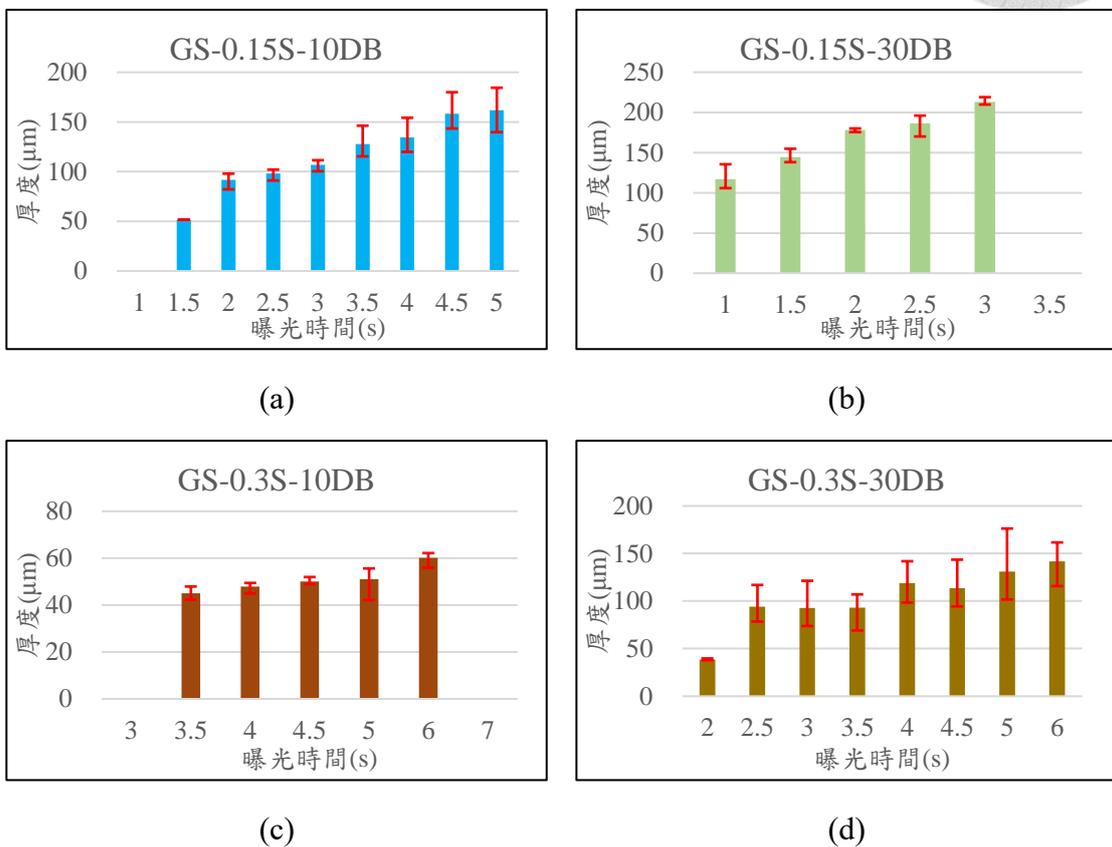


圖 5-9、GS-[X]S-[Y]DB 樹脂配方單層列印厚度數據

(a) [X]=0.15、[Y]=10 (b) [X]=0.15、[Y]=30 (c)[X]=0.3、[Y]=10 (d)[X]=0.3、[Y]=30



GS 樹脂與不同添加物之結論

經過多種不同樹脂配方的數據呈現，將以上數據畫成分布圖並進行不同變因的比較。分別有蘇丹紅、DB、碳黑、蘇丹紅&DB 綜合比較，共四種。

首先，以蘇丹紅劑量為變因，除了前文所述的初始固化時間，會隨著蘇丹紅劑量增加而延後以外，從圖 5-10、圖 5-11、圖 5-12 中，仍可比較得出當加入蘇丹紅時，對固化厚度有大幅減少的作用。在 GS 樹脂加入 0.3g 的蘇丹紅，厚度下降率為 98.08%；在 GS-10DB 樹脂中加入 0.3g 蘇丹紅，厚度下降率為 97.65%；在 GS-30DB 樹脂加入 0.3g 蘇丹紅，厚度下降率為 98.45%。

除此之外，當加入的劑量越多，隨著曝光時間增加，厚度增加的幅度會降低，也就是圖中的斜率會降低。因額外加入的蘇丹紅，已經將光能量吸收，使光線無法順利穿透至樹脂深處造成固化。

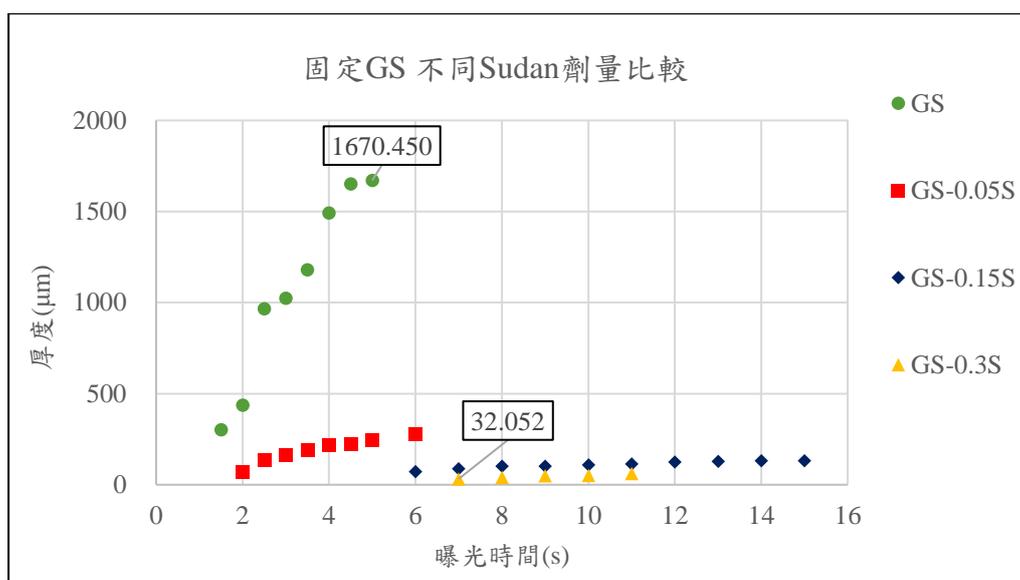


圖 5-10、固定 GS 不同 Sudan 劑量比較

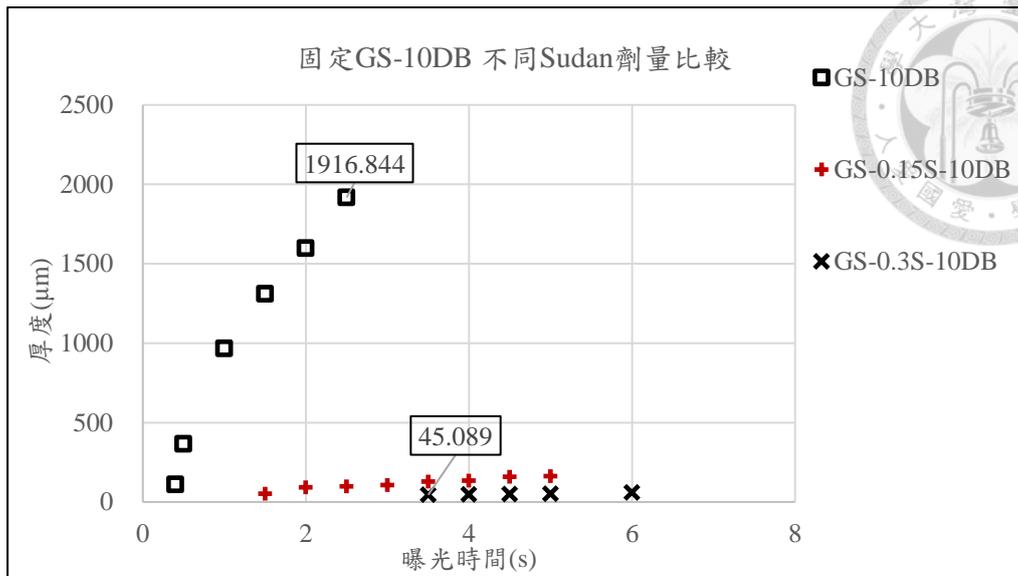


圖 5-11、固定 GS-10DB 不同 Sudan 劑量比較

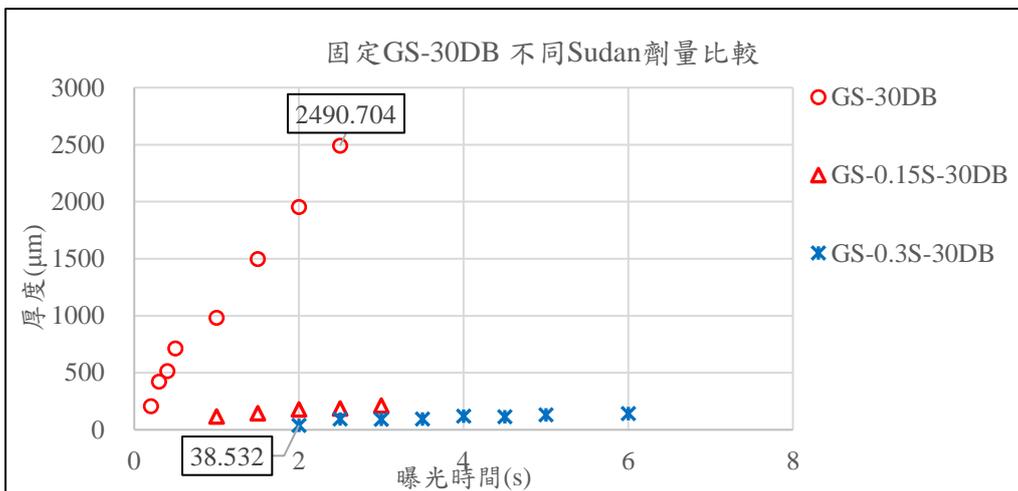


圖 5-12、固定 GS-30DB 不同 Sudan 劑量比較

接著以 DB 劑量為變因，除了前文所述的初始固化時間，會隨著 DB 劑量增加而提前之外，從圖 5-13、圖 5-14、圖 5-15 中，仍可比較得出當加入 DB 時，對固化厚度有大幅增加的作用。無論是在 GS、GS-0.15S 還是 GS-0.3S 樹脂加入 30ml DB，皆可使厚度至少上升約 200%。

除此之外，當加入的劑量越多，隨著曝光時間增加，厚度增加的幅度會上升，也就是圖中的斜率會升高。雖然 DB 為黑色樹脂，但本就屬於高光敏性樹脂，將其當作添加劑使用後，因只加入少許無法完全降低整缸樹脂的透光度，反而被 DB 樹脂中的成分影響，提前固化反應時間，且促進厚度增長。

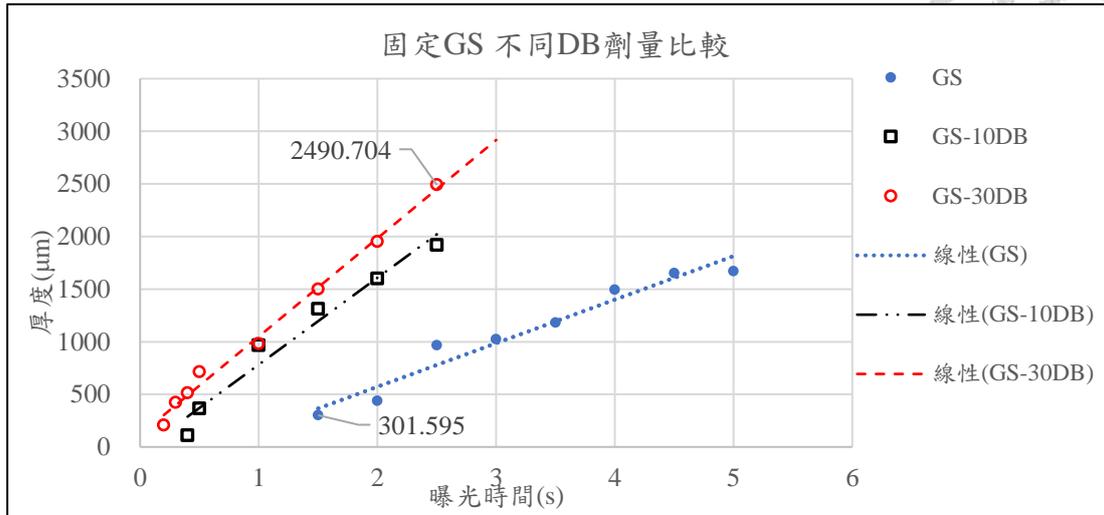


圖 5-13、固定 GS 不同 DB 劑量比較

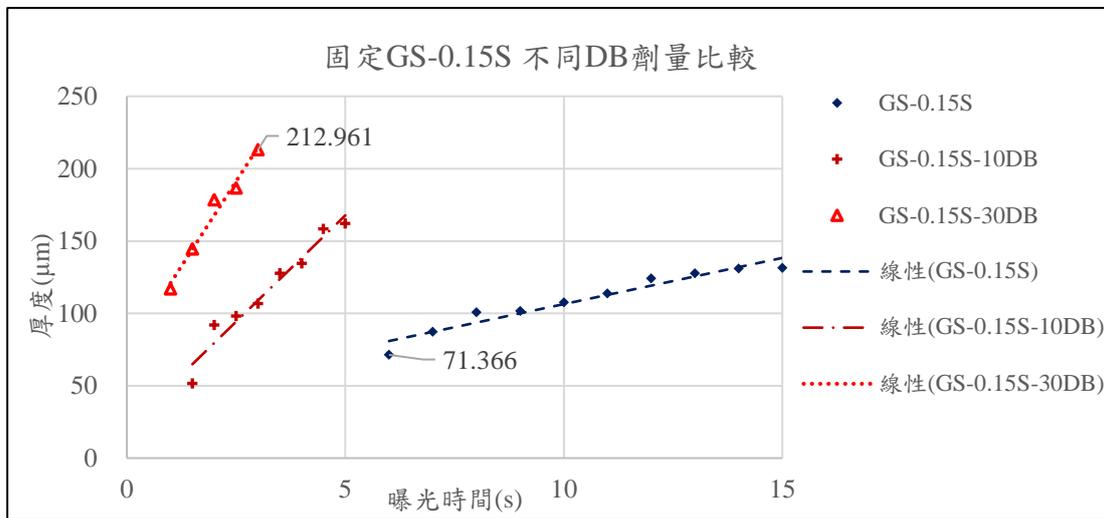


圖 5-14、固定 GS-0.15S 不同 DB 之比較

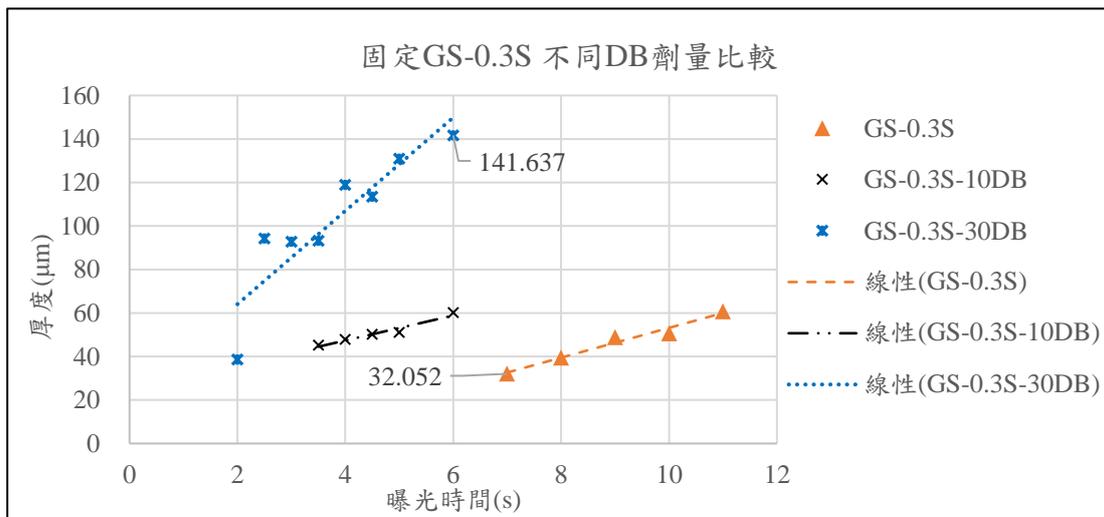


圖 5-15、固定 GS-0.3S DB 之比較

第三種以碳黑劑量為變因，除了前文所述的初始固化時間不會受碳黑劑量增加而有所改變之外，從圖 5-16 中，可比較得出當加入碳黑時，對固化厚度有減少的作用，但並沒有蘇丹紅來的有效果。同樣都是在純 GS 樹脂中加入 0.3g，蘇丹紅可使厚度下降至約 32 μm ，碳黑只能使厚度下降至 106.58 μm 。

除此之外，當加入的劑量越多，隨著曝光時間增加，厚度增加的幅度會下降，也就是圖中的斜率會降低。另外，加入碳黑有一現象，當劑量加至 0.2g 甚至更高，其厚度就不會有明顯的降低。因此推斷出碳黑在 GS 樹脂中的上限為 0.2g，加入更多碳黑在厚度固化上並沒有顯著性的幫助，還會造成列印樹脂越來越濃稠，影響其流動性。

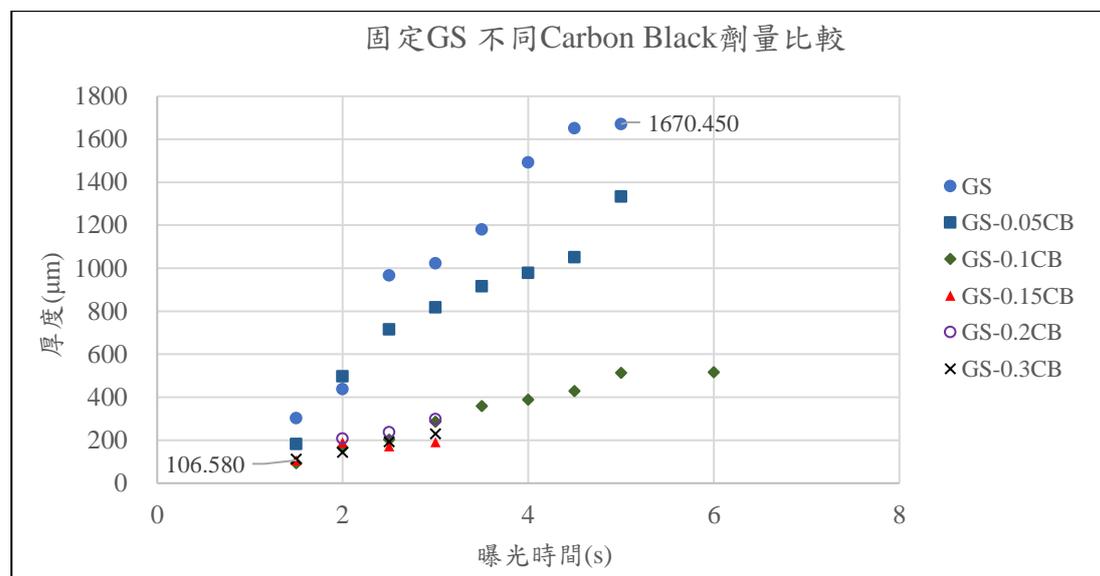


圖 5-16、固定 GS 不同 Carbon Black 劑量比較

最後，將純 GS 樹脂同時加入蘇丹紅和 DB 進行綜合比較，四種樹脂配方的厚度下降率分別為 GS-0.15S-10DB 下降 96.92%、GS-0.15S-30DB 下降 93.01%、GS-0.3S-10DB 下降 97.30%、GS-0.3S-30DB 下降 97.69%。如果單從厚度的降低率考量，理應選擇下降率最高的 GS-0.3S-30DB 配方來做馬賽克法實驗。但從表 5-5 中發現 GS-0.3S-30DB 和 GS-0.3S-10D 兩種配方即使單層曝光時間高達 5 秒，列印出的成品依然有捲曲等瑕疵。因此，在 GS 樹脂配方系列中，最終選擇 GS-0.15S-10DB 作為下一階段「改變能量給予方式」實驗的列印材料。

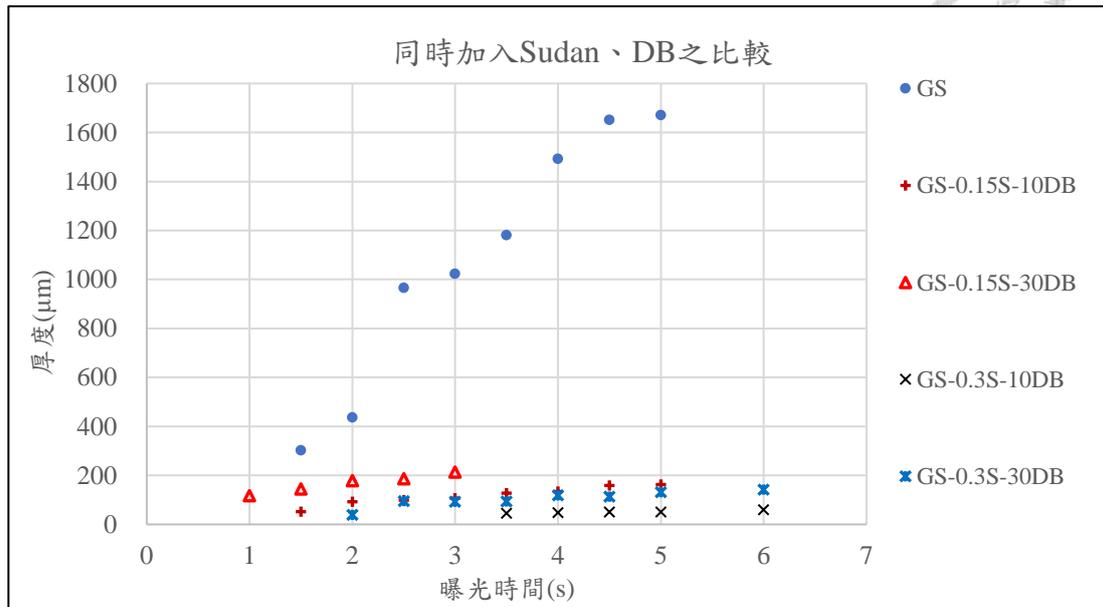


圖 5-17、同時加入 Sudan、DB 之比較

5.1.2 ONYX 光敏樹脂

以 ONYX 樹脂為主要材料進行單層列印，再分別加入不同量的蘇丹紅、碳黑進行同樣的單層列印步驟。最後，將列印成品厚度量測並進行觀察分析。

ONYX 純樹脂

圖 5-18 分別為 ONYX 純樹脂單層列印之最短(50ms)和最長(500ms)曝光時間的列印成品。因 ONYX 樹脂本身對光的靈敏度極高，即使單層曝光時間只有 50ms，所以在本實驗中，無法驗證添加物對 ONYX 樹脂初始固化時間的影響。

從成品上視圖中，可以看出成品的 XY 解析度極佳，印製的正方形有稜有角。側視圖中，也可看出其厚度均勻，且頂部平坦。經過量測之後，以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(ms)為 x 軸畫出柱狀圖(圖 5-19)。



上視圖



側視圖

(a) ONYX 曝光 50ms



上視圖



側視圖

(b) ONYX 曝光 500ms

圖 5-18、ONYX 純樹脂單層列印成品上視、側視圖

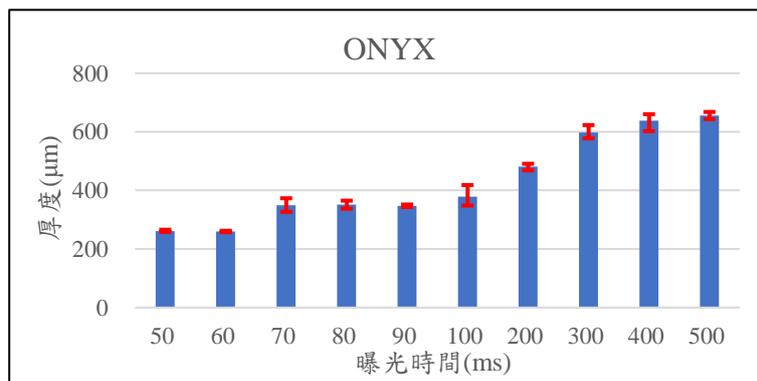


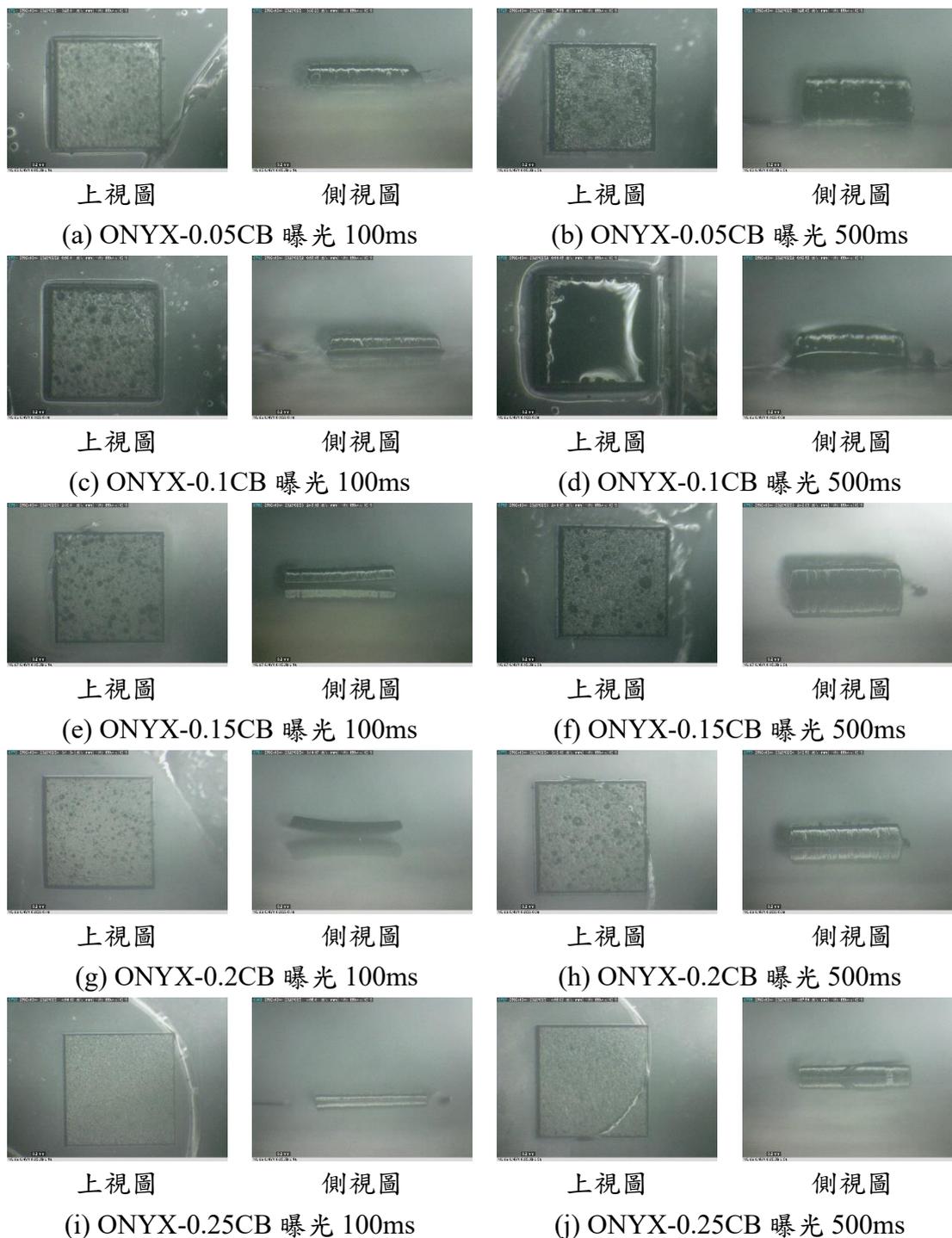
圖 5-19、ONYX 樹脂單層列印厚度數據



ONYX 樹脂加碳黑

在純 ONYX 樹脂加入碳黑的實驗中，共有六種不同加入的劑量，從 0.05g 起，以 0.05g 為單位依次加入直到 0.3g，每加入一次就做一次單層列印並量測厚度。

圖 5-20 為不同碳黑劑量，分別曝光 100ms 和 500ms 之成品上視與側視圖。



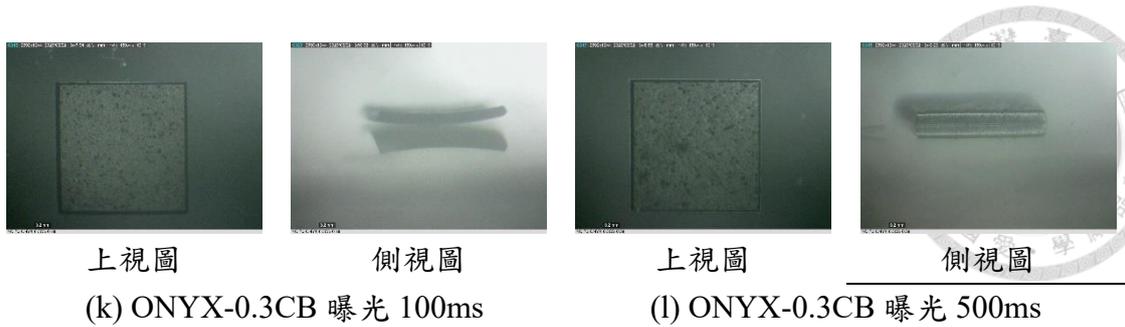


圖 5-20、ONYX-[X]CB 部分列印成品上視圖、側視圖

從圖 5-20 可以觀察到，將碳黑加至 0.3g 只曝光 100ms，仍可固化成型一定厚度的完整正方形。將列印成品經過量測，以厚度(μm)為 y 軸、曝光時間(ms)為 x 軸畫出柱狀圖(圖 5-21)。

表 5-6、ONYX 樹脂加入不同劑量碳黑單層列印之外觀情況表格

樹酯 \ 曝光時間(ms)	100	200	300	400	500
ONYX	●	●	●	●	●
ONYX-0.05CB	●	●	●	●	●
ONYX-0.1CB	●	●	●	●	●
ONYX-0.15CB	●	●	●	●	●
ONYX-0.2CB	●	●	●	●	●
ONYX-0.25CB	●	●	●	●	●
ONYX-0.3CB	◎	●	●	●	●

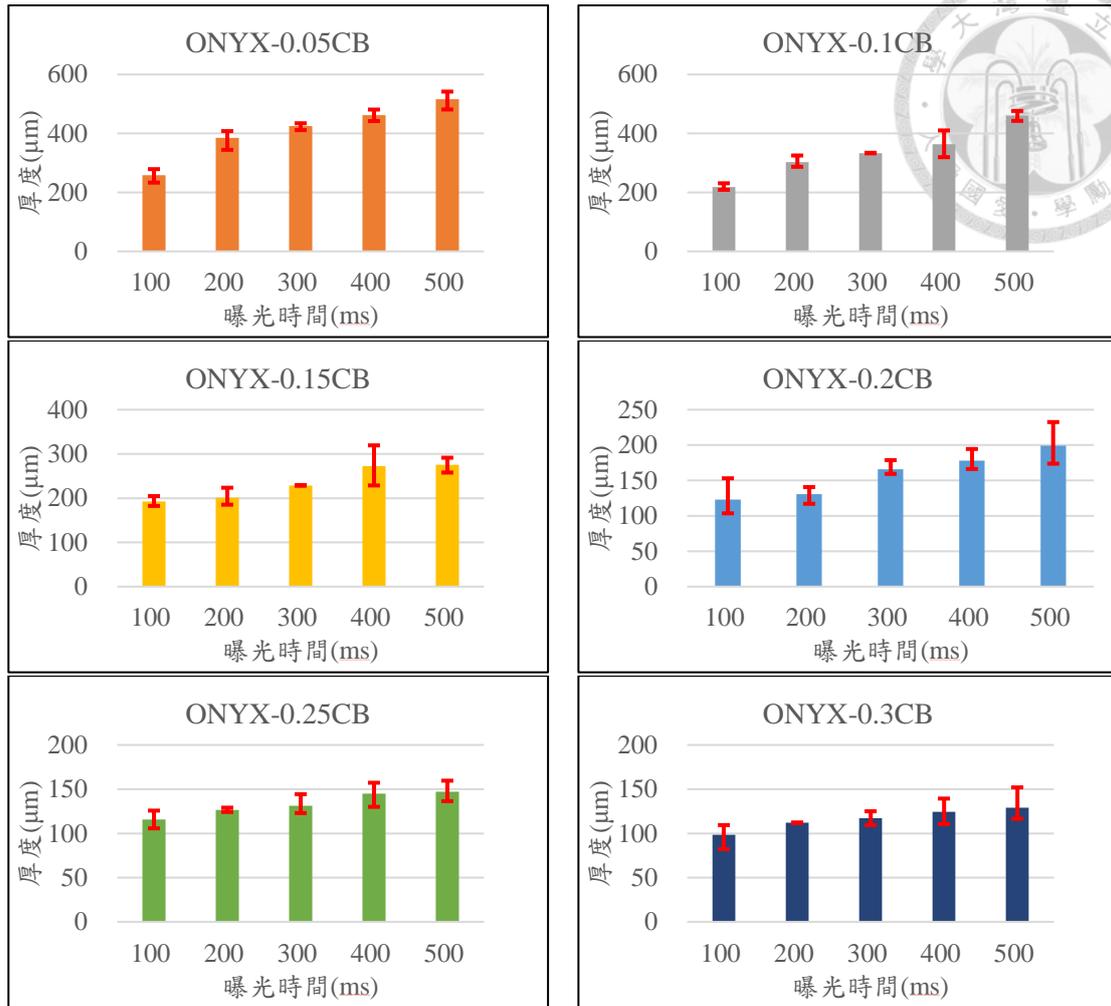


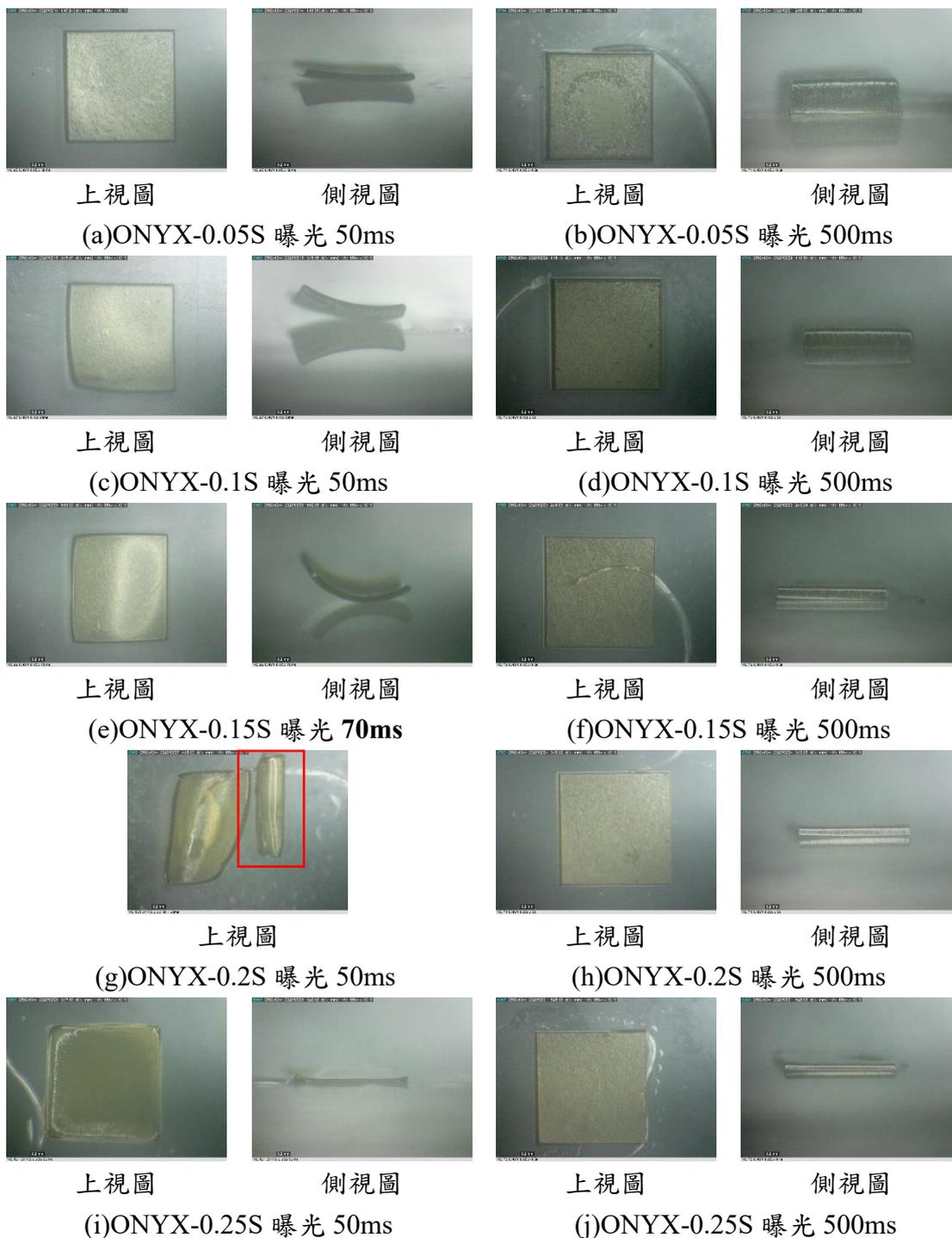
圖 5-21、ONYX-[X]CB 樹脂配方單層列印厚度數據



ONYX 樹脂加蘇丹紅

在純 ONYX 樹脂加入蘇丹紅的實驗中，共有十種不同加入的劑量，從 0.05g 起，以 0.05g 為單位依次加入直到 0.5g，每加入一次就做一次單層列印並量測厚度。

圖 5-22 為不同蘇丹紅劑量，分別曝光 50ms 和 500ms 之成品圖。



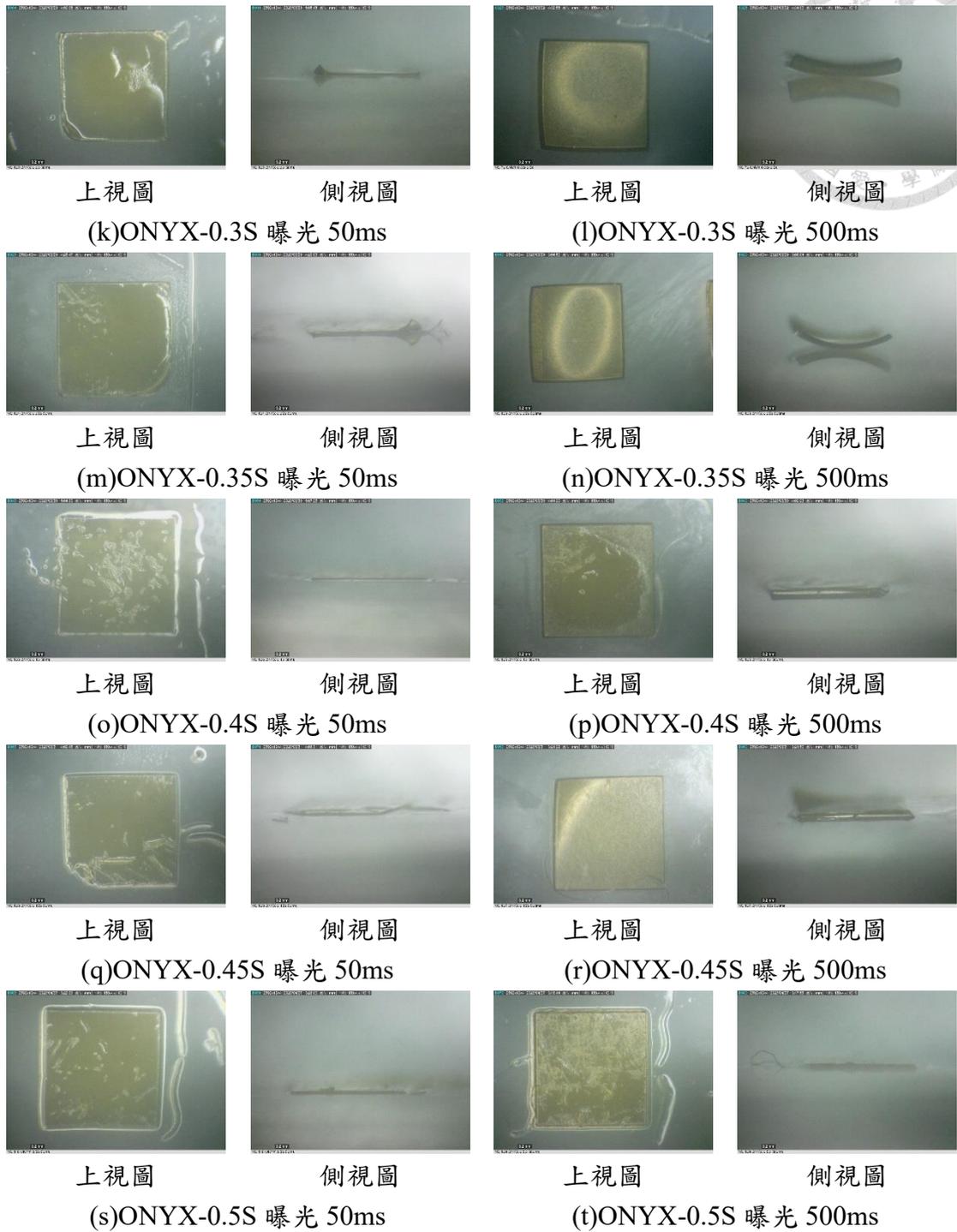


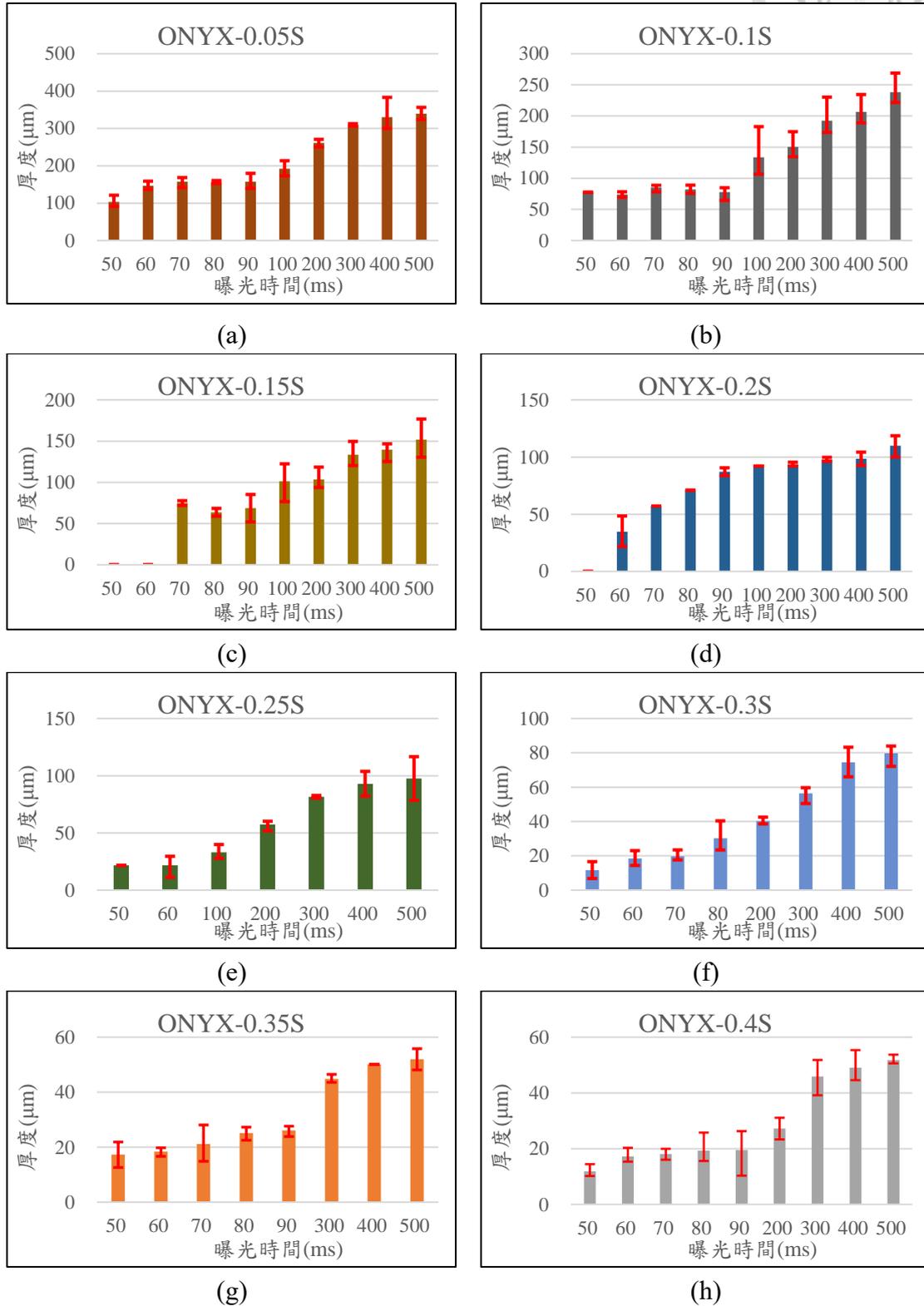
圖 5-22、ONYX-[X]S 部分列印成品上視圖、側視圖

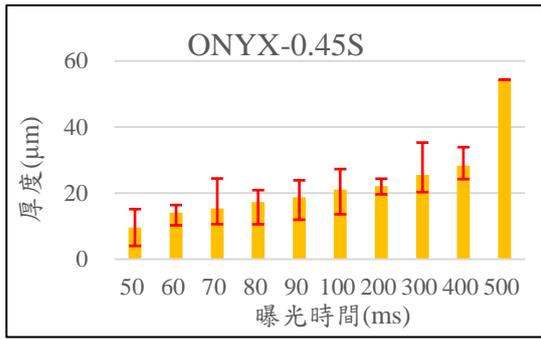
表 5-7、ONYX 樹脂加入不同劑量蘇丹紅單層列印之外觀情況表格

曝光時間(ms) 樹酯	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
ONYX	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ONYX-0.05S	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ONYX-0.1S	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ONYX-0.15S	▲	▲	◎	◎	◎	●	●	●	●	●
ONYX-0.2S	▲	◎	◎	◎	◎	●	●	●	●	●
ONYX-0.25S	●	●	●	◎	◎	●	●	●	●	●
ONYX-0.3S	●	●	●	◎	◎	▲	◎	◎	◎	◎
ONYX-0.35S	●	●	●	●	●	▲	▲	◎	●	●
ONYX-0.4S	●	●	●	●	●	▲	◎	●	●	●
ONYX-0.45S	●	●	●	●	●	●	◎	◎	●	●
ONYX-0.5S	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

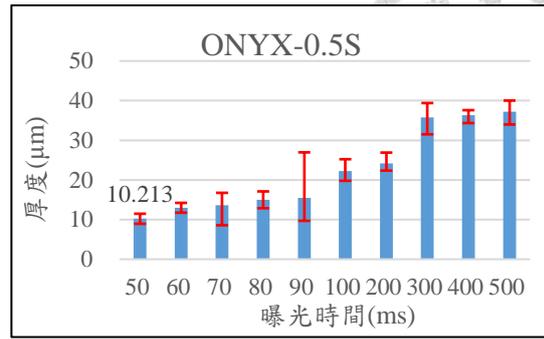
從圖 5-22 中可以觀察到，ONYX 樹脂中即使加入 0.5g 的蘇丹紅且曝光時間僅有 50ms，依然可印製出完整的正方形圖案，但在過程中部分成品有捲曲、翹曲的現象。

表 5-7 中，可推測只有在特定範圍的厚度會有該現象，確切的厚度範圍，需要結合以下(圖 5-23)的量測數據進行比對方可得出結論。





(i)



(j)

圖 5-23、ONYX-[X]S 樹脂配方單層列印厚度數據



ONYX 樹脂與不同添加物之結論

經過多種不同樹脂配方的數據呈現，將以上數據畫成分布圖並進行不同變因的比較。分別有不同劑量蘇丹紅、不同劑量碳黑進行比較。

首先，以不同劑量碳黑為變因，從圖 5-24 可以觀察出加入碳黑後，曝光時間與厚度的關係成正相關。當碳黑的劑量增加時，在相同曝光時間下，厚度可減少高達 5 倍之多。除此之外，當曝光時間增加，厚度增加幅度會隨碳黑劑量增加而下降，也就是斜率會隨之減小。因加入的碳黑粒子已經降低樹脂中的透光度，即使再延長曝光時間也無法再增加其厚度。

另外，在 ONYX 樹脂加入碳黑的實驗中，發現當碳黑加入 0.2g 後，甚至更多，在厚度減少上並沒有明顯的幫助，而且會造成樹脂的濃稠度變高，影響其流動性。此現象與前面 GS-[X]CB 的實驗有類似結果。

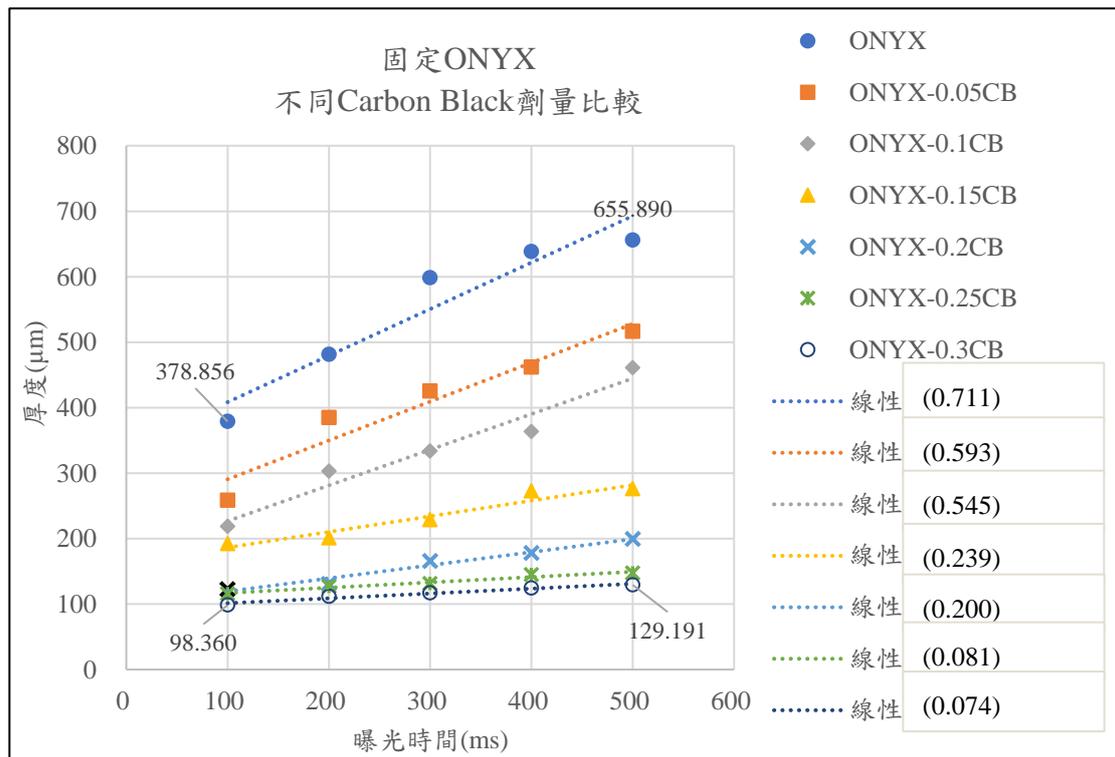


圖 5-24、固定 ONYX 不同 Carbon Black 劑量比較

接著，是以不同劑量的蘇丹紅為變因，從圖 5-25 中，可觀察出曝光時間與厚度成正相關。蘇丹紅的劑量增加至 0.5g，在曝光 100ms 下，厚度從約 400 μm 下降至約 22 μm ；在曝光 500ms 下，厚度從約 650 μm 下降至約 37 μm 。

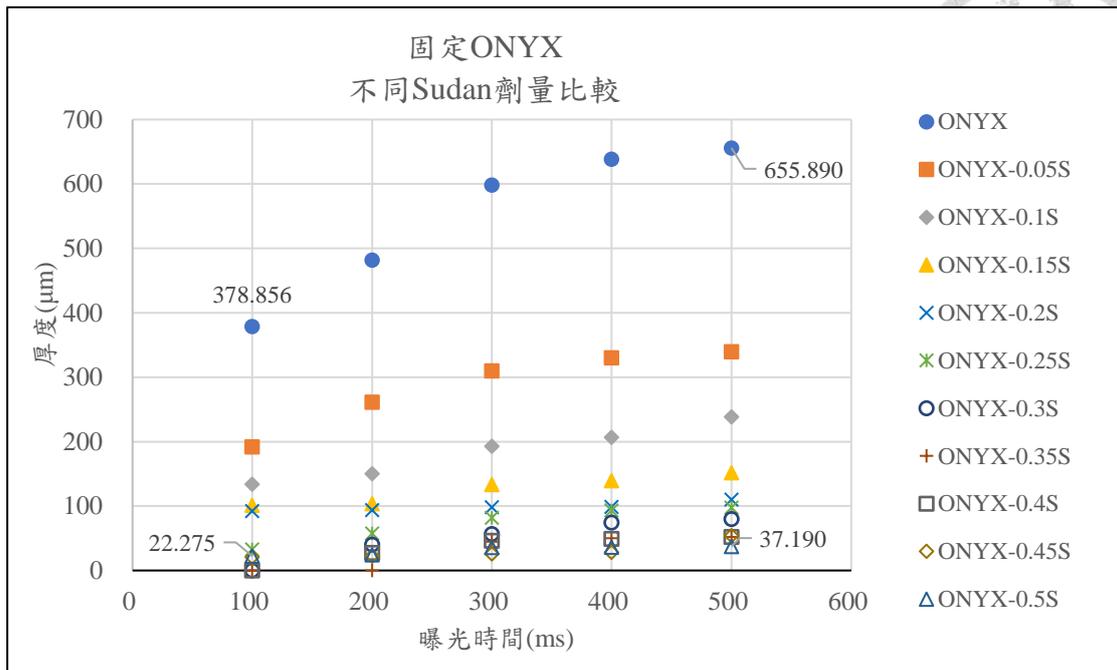


圖 5-25、固定 ONYX 不同 Sudan 劑量比較

在 5.1.3 中有說明，因 ONYX 樹脂光靈敏度極高，目前加入蘇丹紅和碳黑的實驗中，即使曝光時間縮短至單層 50ms (50ms 為極限，如若時間更短投影機會來不急反映)，都無法測出該樹脂的起始固化時間。加上目前最使用可列印最薄的配方 ONYX-0.5S 搭配 50ms 單層曝光時間，厚度只有約 10 μ m，還不到列印立體微結構單層厚度約 4、5 μ m 的目標。因此，後續會使用目前最薄的列印參數進行灰階法的實驗。

5.1 結論

經過諸多不同樹脂配方的單層列印，對兩種主樹脂原料進行比較(表 5-8)。第一項為顏差異，GS 是透明樹脂；ONYX 為黑色樹脂，這直接對應樹脂材料的透光度，GS 高透光性，相反 ONYX 低透光性。第二項起始固化時間比較，直接對應光靈敏度，GS 光靈敏度低，而 ONYX 光靈敏度高。第三項為收縮率比較，GS 收縮率大代表容易翹曲變形，ONYX 收縮率小代表不易變形。最後一項比較所有配方中可印最小層厚，GS 樹脂系列中，GS-0.3S 配方可印最薄層厚約 32 μ m，但有翹曲現象，圖 5-3(c)；ONYX 樹脂系列，加入 0.5g 蘇丹紅可印出最薄層厚約 10 μ m，但外觀平整沒有翹曲變形，圖 5-23(j)。

表 5-8、GS、ONYX 結果比較

樹酯 \ 項目	顏色	起始固化時間	收縮率	所有配方中 可印最小層厚
GS	透明	長 至少 1.5s	大 易翹曲變形	32 μ m 有捲曲
ONYX	黑色	短 50ms	小 不易變形	10 μ m 無捲曲

將研究使用的三種添加物進行比較，如表 5-9。三種添加物對起始固化時間有不同的影響，Sudan 延後、碳黑不影響、DB 縮短。對於劑量增加固化層厚影響和曝光時間增加，厚度增加幅度的影響，Sudan 和碳黑皆是減小，只是 Sudan 減小的幅度比較大。DB 和 Sudan 的情況就完全相反。

表 5-9、三種添加物比較

添加物 \ 項目	起始固化時間	劑量增加 對厚度影響	曝光時間增加， 厚度增加幅度(斜率)
Sudan	延長	大幅減小	大幅減小
Carbon Black	不影響	減小	減小
DB	縮短	大幅增加	增加



5.2 灰階法

灰階法是延續 5.1.2 結論中所說明，希望可以使用 ONYX-0.5S 樹脂配方，藉由降低曝光亮度，來達到減少層厚的目的。會使用 7 種不同單層曝光時間搭配不同灰階值進行單層列印，同時找出每個曝光時間的初始固化亮度。表 5-10 是各個參數列印成品的情況表格，從表格中可以看出單層曝光時間 50ms~90ms 灰階值下降到 125 時，就無法固化成形；曝光時間增加至 100ms 灰階值下降至 125 為起始固化亮度；而 200ms 的起始固化亮度為灰階值 100。

表 5-10、不同灰階值列印成品之外觀情況表格

單層曝光時間(ms) \ 灰階值(亮度)	50	60	70	80	90	100	200
255(最亮)	●	●	●	●	●	●	●
225	●	●	●	●	●	●	●
200	●	●	●	●	●	●	●
175	●	●	◎	●	●	●	●
150	●	●	●	●	●	●	●
125	x	x	x	x	x	●	●
100	x	x	x	x	x	x	●

圖 5-26 是以曝光時間(ms)為 x 軸、灰階值為 y 軸、厚度(μm)為 z 軸畫出 3D 曲面圖。從圖中可以發現灰階值和厚度呈正相關。另外，目前使用單層曝光時間 50ms、灰階值 150 的列印參數，可列印出層厚約 $5.884\mu\text{m}$ 為目前最接近目標的結果。

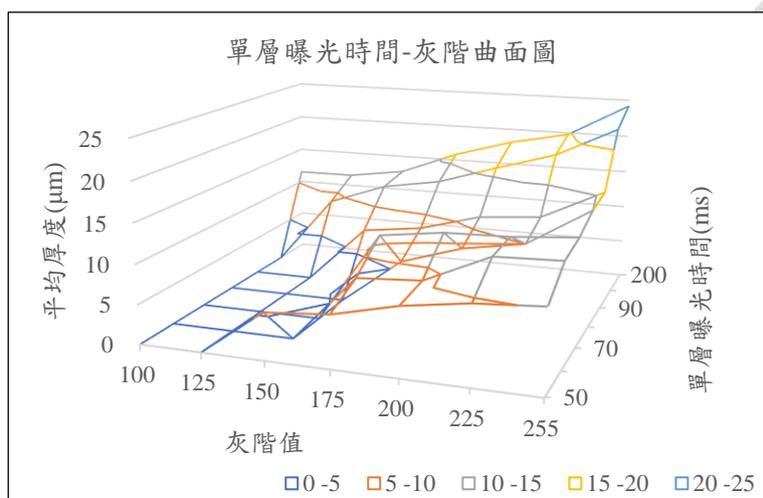


圖 5-26、灰階值、單層曝光時間與層厚之曲面圖

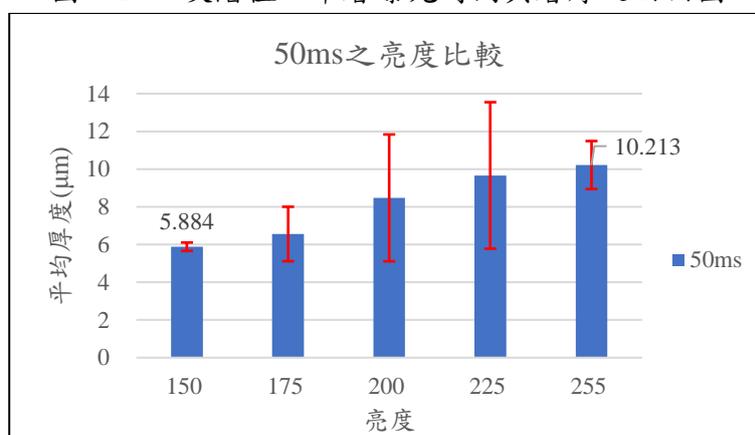


圖 5-27、50ms 之灰階值比較



5.3 改變給予能量方式實驗結果

在 4.1 節實驗方法說明中，有提到「改變給予能量方式實驗」可分成兩種方法。第一種是改變馬賽克尺寸，主要觀察馬賽克尺寸對層厚的影響；另一種則是單層分次曝光，顧名思義，就是在固定總曝光時間下，分次曝光對層厚的影響。

本次實驗使用的列印材料是 5.1 節所討論的結果，分別是 GS-0.15S-10DB 和 ONYX-0.5S 兩種樹脂配方。將在本小節分別呈現結果，並在最後進行綜合討論。

5.3.1 GS-0.15S-10DB

GS-0.15S-10DB 樹脂配方使用的參數為單層曝光 2 秒和單層曝光 8 秒。實驗變因分別為三種不同的馬賽克尺寸(參考 4.2.3.2)和三個不同的單層曝光次數(如表 5-11、表 5-12)。

表 5-11、單層曝光 2 秒的實驗詳細參數列表

馬賽克尺寸 單層曝光次數	None	mac15	mac10	mac5
1 次	1×2000ms (原始)	-	-	-
4 次	-	4×1000ms	4×1000ms	4×1000ms
8 次	-	8×500ms	8×500ms	8×500ms
10 次	-	10×400ms	10×400ms	10×400ms

表 5-12、單層曝光 8 秒的實驗詳細參數列表

馬賽克尺寸 單層曝光次數	None	mac15	mac10	mac5
1 次	1×8s (原始)	-	-	-
4 次	-	4×4s	4×4s	4×4s
8 次	-	8×2s	8×2s	8×2s
10 次	-	10×1.6s	10×1.6s	10×1.6s

依照上述列印參數進行實驗、量測，並以單層曝光次數為 x 軸、馬賽克尺寸為 y 軸、厚度(μm)為 z 軸畫出 3D 長條圖進行比較(圖 5-28、圖 5-29)。首先，將馬賽克尺寸設定為 x 軸、厚度(μm)為 y 軸進行比較，從圖 5-30 可以明顯看到馬賽克尺寸變小，層厚會降低。另外，再以單層曝光次數為 x 軸、厚度(μm)為 y 軸比較，從圖 5-31 同樣可以得出單層曝光次數增加，層厚也會降低。另外，可從趨勢線的絕對值斜率大小，發現單層曝光次數增加和馬賽克尺寸縮小，會交互影響，使厚度降低的幅度增加。

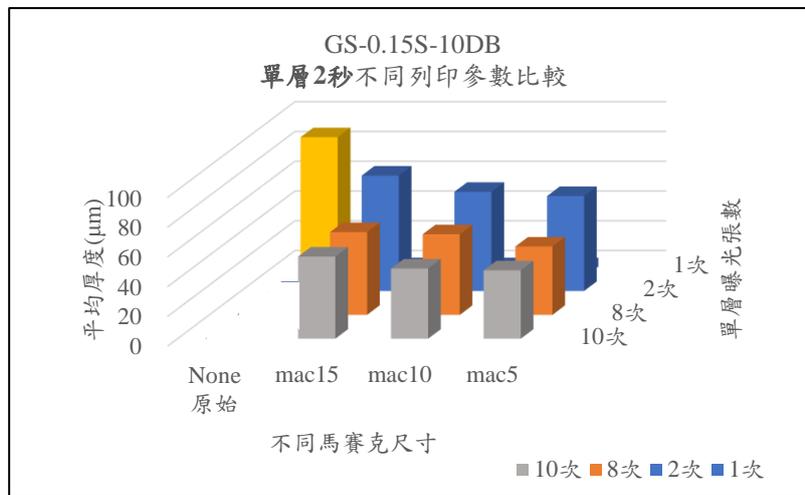


圖 5-28、GS-0.15S-10DB 單層 2 秒不同列印參數比較

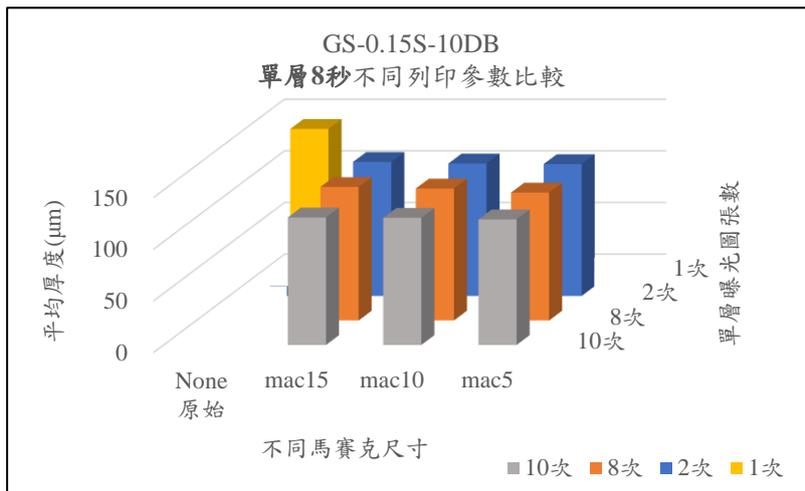


圖 5-29、GS-0.15S-10DB 單層 8 秒不同列印參數比較

單層曝光 2 秒

單層曝光 8 秒

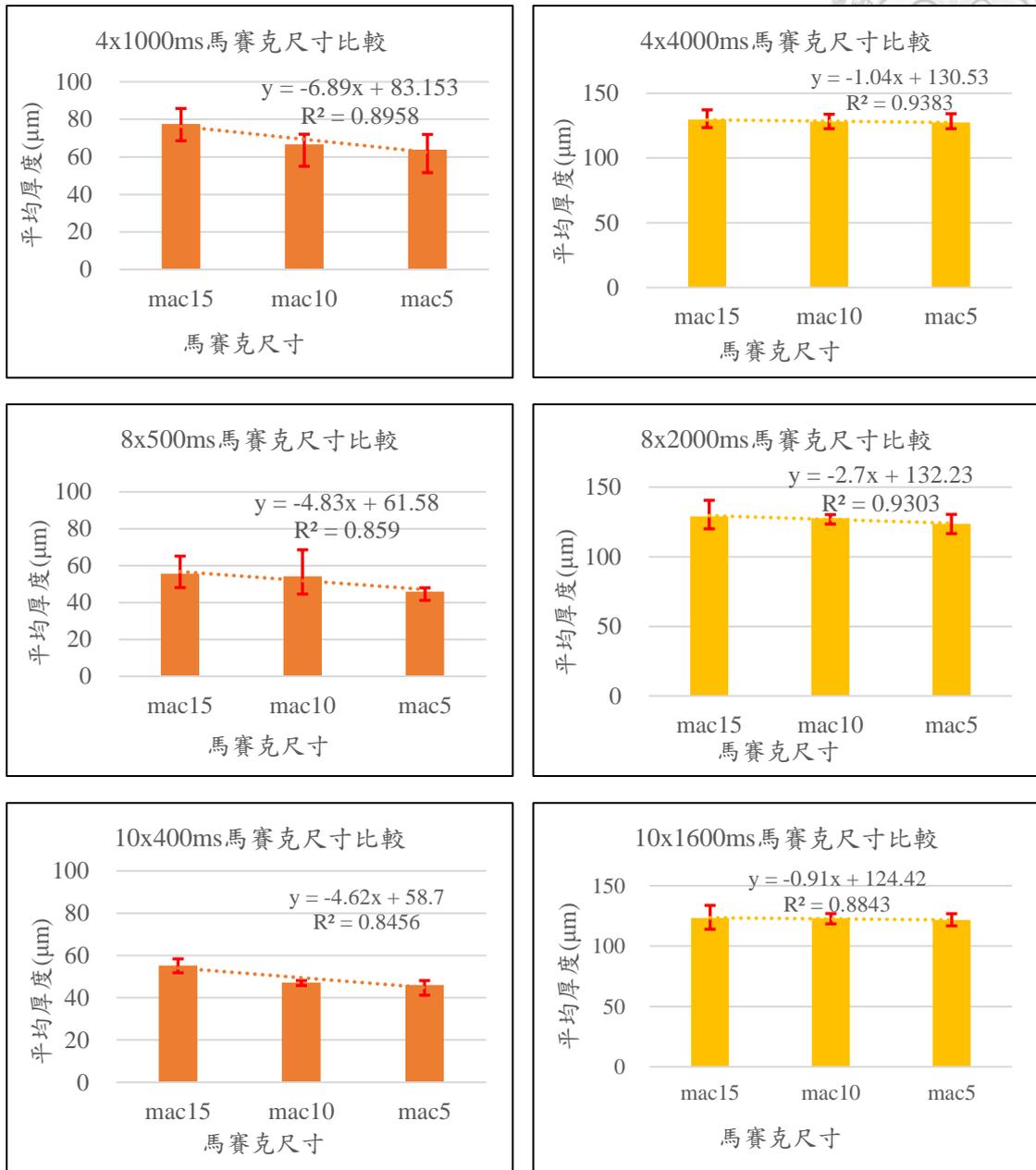


圖 5-30、GS-0.15S-10DB 以「馬賽克尺寸」為變因之比較圖

單層曝光 2 秒

單層曝光 8 秒

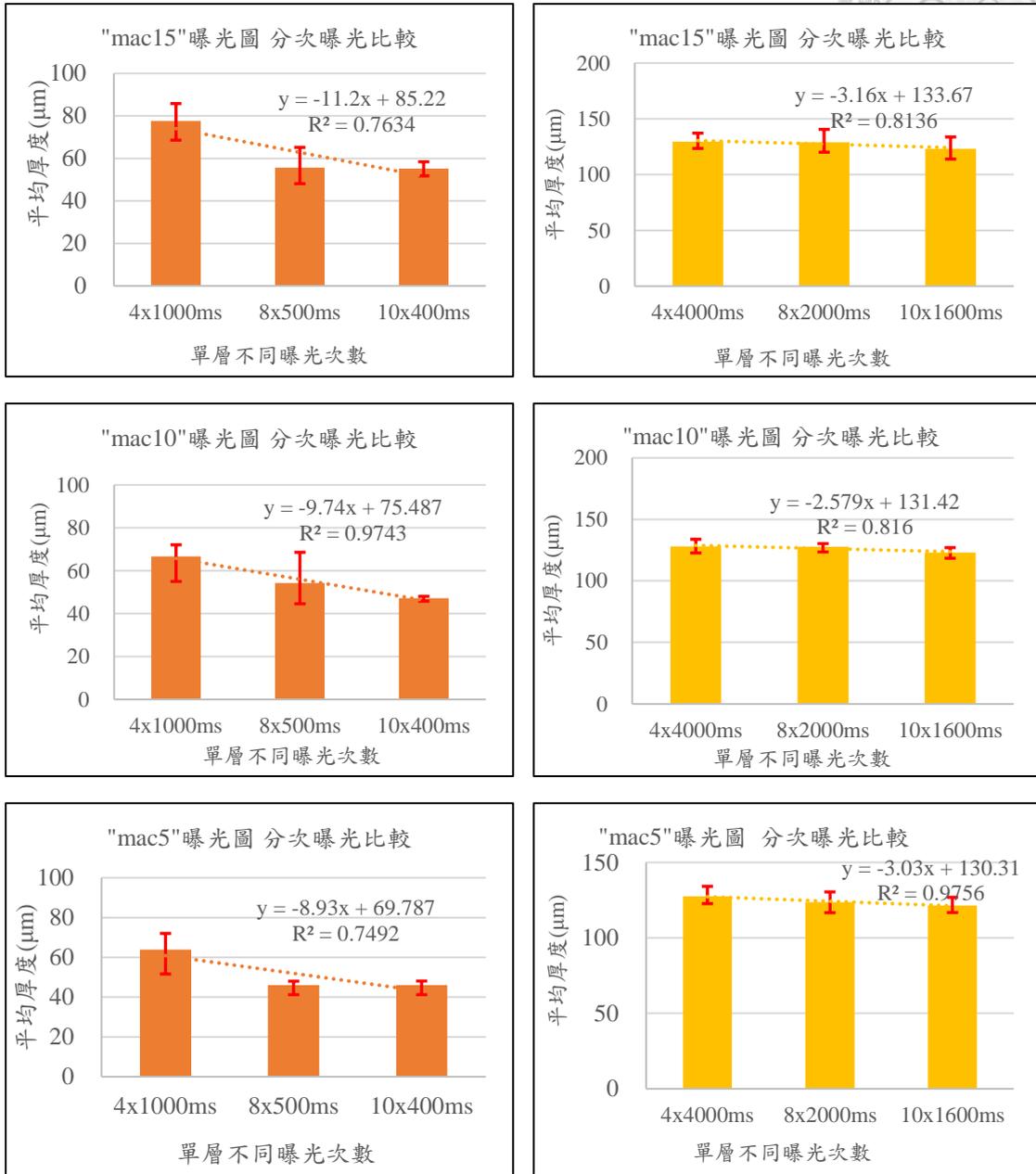


圖 5-31、GS-0.15S-10DB 以「分次曝光」為變因之比較圖

除了前文所述馬賽克尺寸縮小和單層曝光次數增加會降低層厚之外，從單層曝光 2 秒和單層曝光 8 秒進行比較，發現在過度曝光的情況下，厚度降低的效果整體會變差。如圖 5-32 中，單層曝光 2 秒的下降幅度約 47.38% 大於單層曝光 8 秒的下降幅度 11.89%。

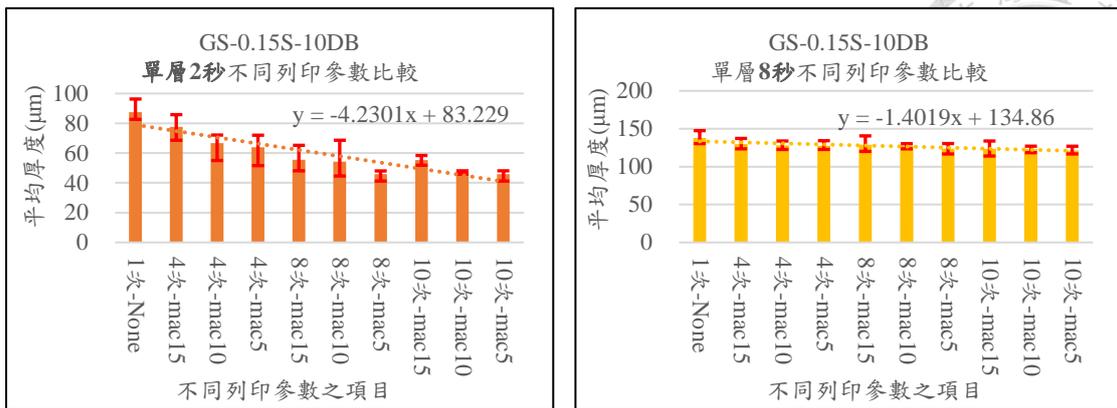


圖 5-32、GS-0.15S-10DB 單層曝光 2 秒和 8 秒不同參數比較

5.3.2 ONYX-0.5S

ONYX-0.5S 樹脂配方使用的參數為單層曝光 100 毫秒和單層曝光 500 毫秒。

實驗變因分別為三種不同的馬賽克尺寸(參考 4.2.3.2)和三個不同的單層曝光次數(如表 5-13、表 5-14)。

表 5-13、單層曝光 100 毫秒的實驗詳細參數列表

馬賽克尺寸 單層曝光次數	None	mac15	mac10	mac5
1 次	1×100ms (原始)	-	-	-
2 次	2×50ms	2×100ms	2×100ms	2×100ms
4 次	4×25ms	4×50ms	4×50ms	4×50ms
10 次	10×10ms	10×20ms	10×20ms	10×20ms

表 5-14、單層曝光 500 毫秒的實驗詳細參數列表

馬賽克尺寸 單層曝光次數	None	mac15	mac10	mac5
1 次	1×500ms (原始)	-	-	-
2 次	2×250ms	2×500ms	2×500ms	2×500ms
4 次	4×125ms	4×250ms	4×250ms	4×250ms
10 次	10×50ms	10×100ms	10×100ms	10×100ms

依照上述列印參數進行實驗、量測，並以單層曝光次數為 x 軸、馬賽克尺寸為 y 軸、厚度(μm)為 z 軸畫出 3D 長條圖進行比較(圖 5-33、圖 5-34)。首先，獨立將馬賽克尺寸為 x 軸、厚度(μm)為 y 軸進行比較，從圖 5-35 圖 5-30 可以看到馬賽克尺寸變小，層厚會降低。另外，再以單層曝光次數為 x 軸、厚度(μm)為 y 軸進行比較，圖 5-36 會發現以分次曝光為變因的結果與前面完全相反，單層曝光次數增加，無論是在何種尺寸的馬賽克下厚度皆增加。

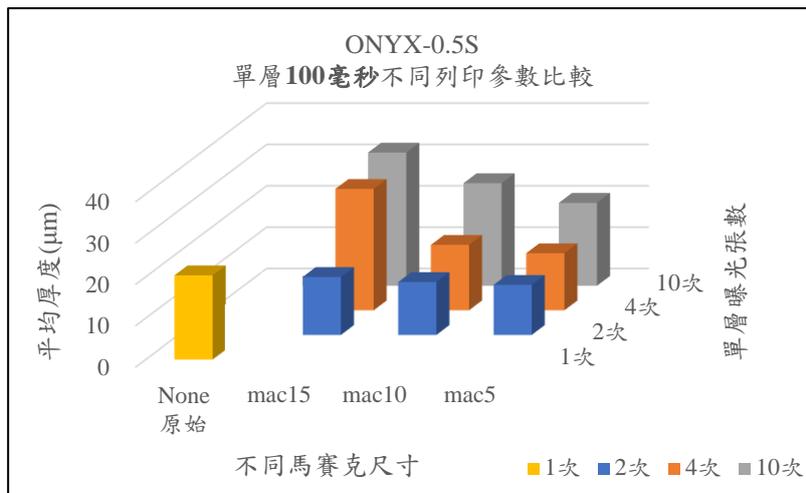


圖 5-33、ONYX-0.5S 單層 100 毫秒不同列印參數比較

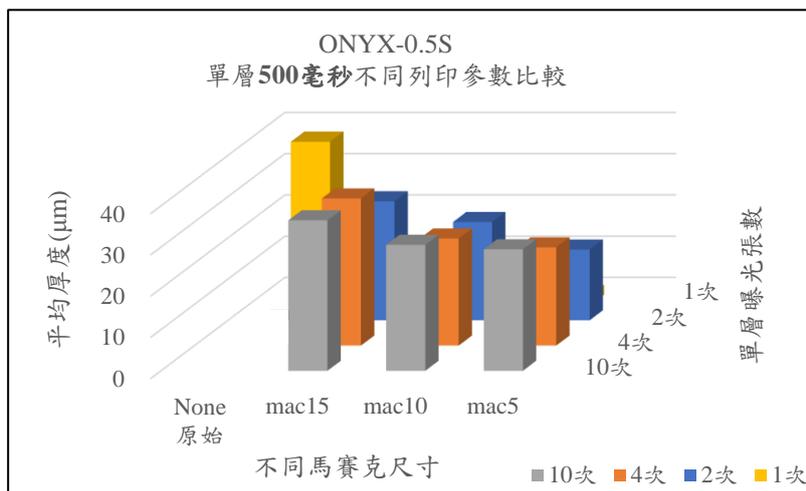


圖 5-34、ONYX-0.5S 單層 500 毫秒不同列印參數比較

單層曝光 100 毫秒

單層曝光 500 毫秒

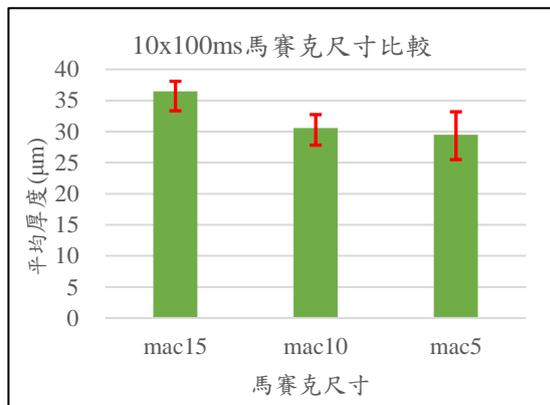
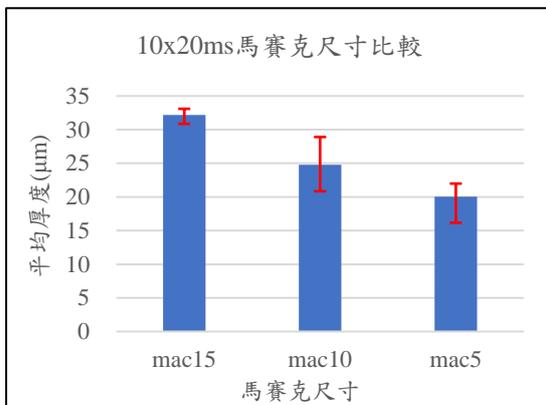
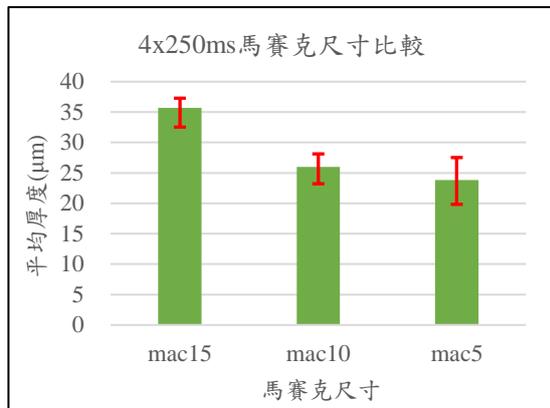
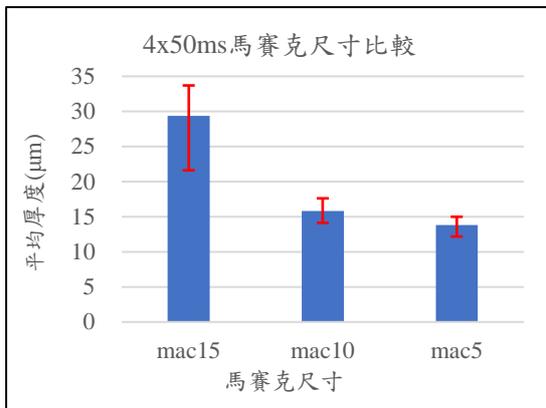
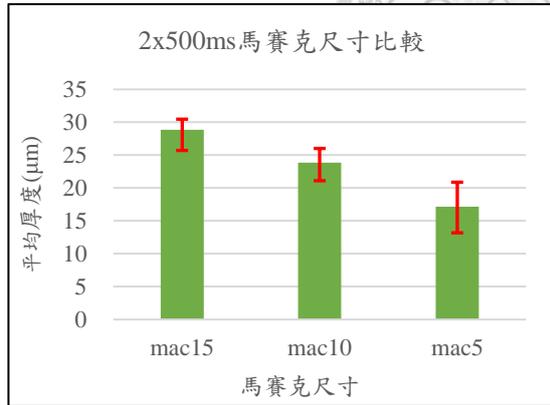
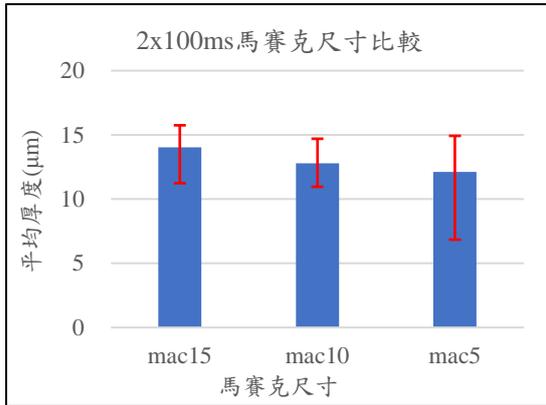
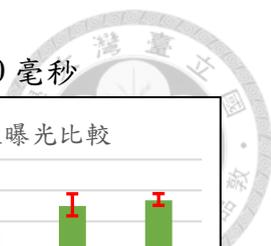


圖 5-35、ONYX-0.5S 以「馬賽克尺寸」為變因之比較圖



單層曝光 100 毫秒

單層曝光 500 毫秒

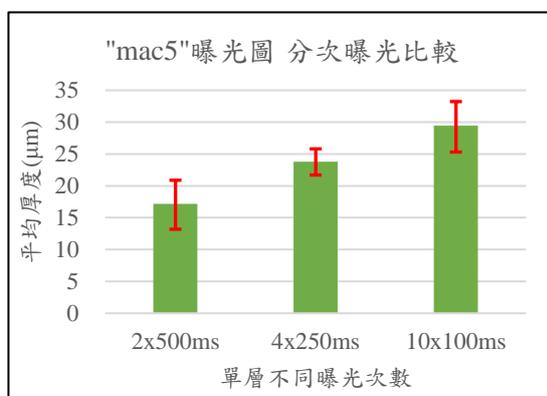
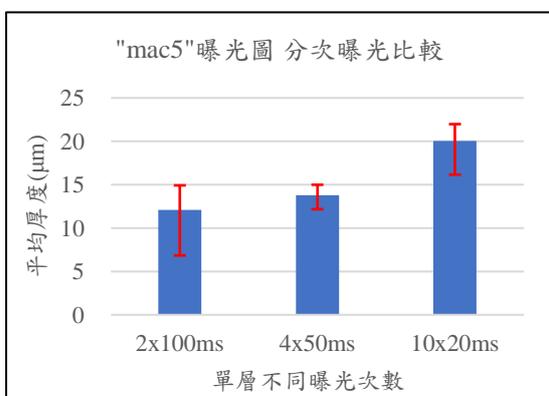
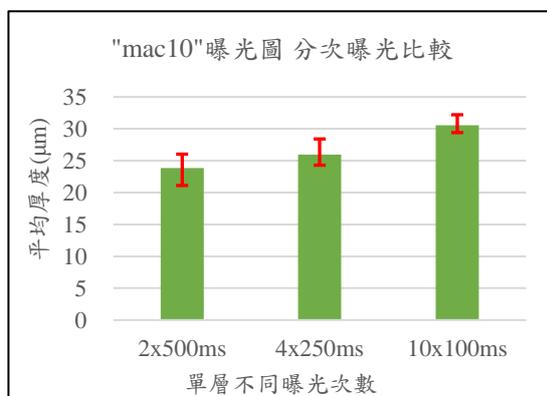
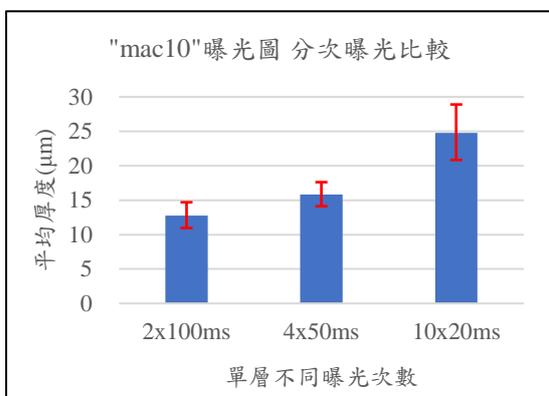
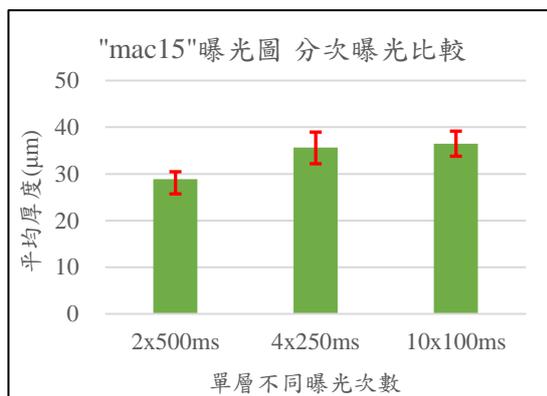
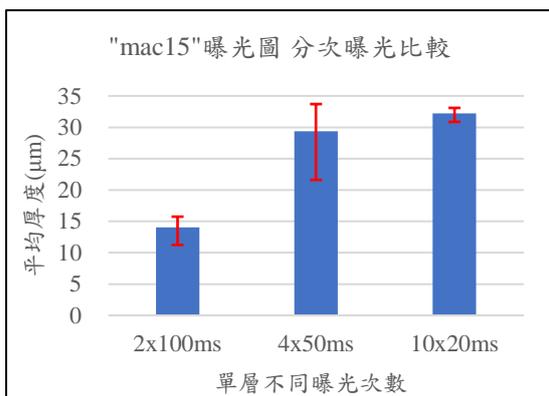
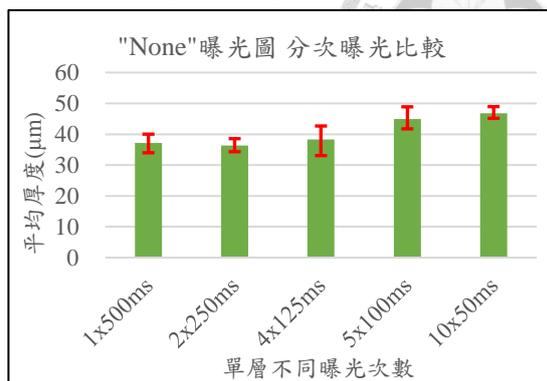
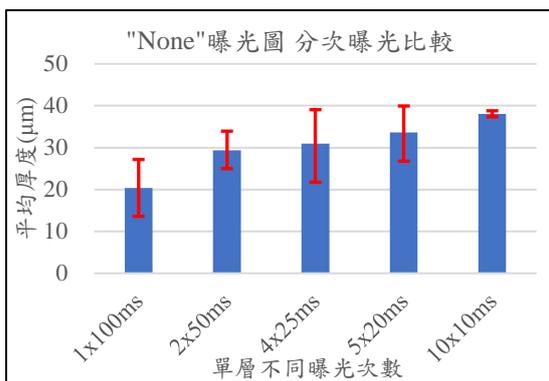


圖 5-36、ONYX-0.5S 以「分次曝光」為變因之比較圖

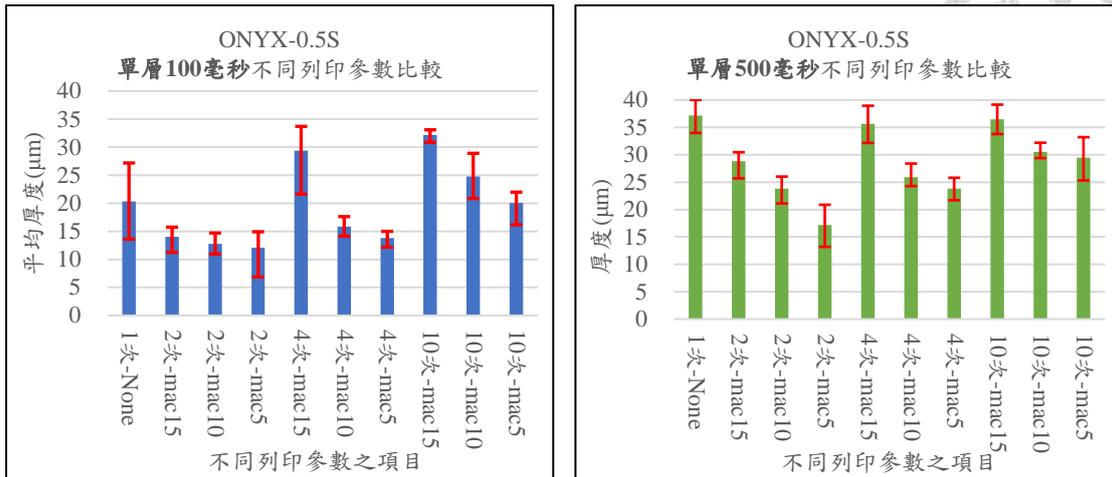


圖 5-37、 ONYX-0.5S 單層曝光 2 秒和 8 秒不同參數比較

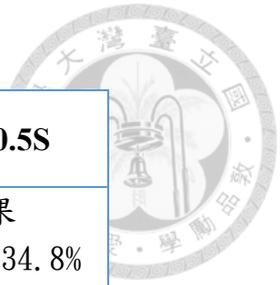
5.3.3 改變能量給予方式實驗結論

經過兩種不同樹脂配方的實驗比較(表 5-15)，可以簡單整理出兩種不同變因對降低層厚是否有效果。在 GS-0.15S-10DB 樹脂中，分別使用兩種方式皆對降低層厚有一定效果，尤其是在非過度曝光和兩個變因疊加使用的情況下會有更顯著效果；在 ONYX-0.5S 樹脂中，單一使用馬賽克法也有降低厚度的效果，但只有使用分次曝光方式結果就截然不同。如果將兩個變因結合使用，只有在單層曝光 2 次的條件下進行馬賽克法有一定效果，否則適得其反。

原本增加單層曝光次數的目的是讓產生多餘的自由基，可以藉由分次曝光的間隔進行擴散，以達到降低深度固化的目標。但在 ONYX-0.5S 樹脂中，卻呈現出反效果。推測即使分次曝光的間隔，沒有給予光能量，但已經被激發的自由基仍持續與單體產生交聯反應，導致樹脂仍可產生固化。因此，認為這些多停留的間隔時間成為助長固化層厚的原因。

表 5-15、改變能量給予方式實驗結果整理表格

變因	樹酯配方	GS-0.15S-10DB	ONYX-0.5S
馬賽克尺寸		有效果 (2s) ↓ 17.3% (8s) ↓ 2.4%	有效果 (100ms) ↓ 34.8% (500ms) ↓ 31.0%
分次曝光		有效果 (2s) ↓ 28.7% (8s) ↓ 4.6%	反效果
兩個變因疊加		更加有效果 (2s) ↓ 47.38% (8s) ↓ 11.89%	部分條件有效果 ↓ 40.52% (2次+mac5)





5.4 電極法

4.1 節有簡單介紹電極法實驗方法，在這項實驗中除了沒有明顯的實驗結果外，仍有諸多問題需要解決，有以下幾點：

1. 推測使用的樹脂經過光線激發後，產生的自由基不帶電荷，不受電場外力影響。即使是帶電荷，但實驗室目前可使用的電源供應器經過並聯最高供應電壓只有 $\pm 60V$ ，可能電壓還不夠。
2. 上方電極片共嘗試了兩種方式：
 - 甲、使用壓克力板貼銅箔膠帶再挖洞讓投影光線經過，因為洞的關係，導致有表面張力將樹脂往上帶，除了影響對焦外，也無法列印平整；且產生電場並不垂直。
 - 乙、上方電極片經過改良，由列印平台下方貼一片透明導電塑膠替代，再使用導電銀膠將電線貼上。直接使用單層列印的方式，列印單層在導電塑膠片上。但導電銀膠無法非常牢固的將電線黏住，且須耗時等它乾燥，即使電線固定完成，每次列印清洗都會將銀膠沖掉，下次又要再重新黏。

以上幾點為這項實驗先行停止的原因。若要解決問題，首先要確認光敏樹脂的成分，確保經過激發後的產物有帶電荷；上方電極片仍需要改良，否則耗工又耗時；電壓大小的部分需要長時間逐一測試，目前沒有找到相關文獻可以參考。



5.5 綜合與應用

本小節將前面 5.1~5.3 中使用的參數進行整合列印單層並且運用於動機所述之井字結構，觀察是否有改善深度方向過度固化的問題。

5.5.1 整合單層列印

選用 ONYX-0.5S 樹脂進行灰階法和馬賽克法結合之實驗，實驗參數和量測厚度如下表。從圖 5-38 中，可以觀察出當灰階法和馬賽克法進行結合使用，會使厚度有更進一步的減少。目前層厚最薄的參數為單層曝光兩次、單層曝光時間 100ms、馬賽克尺寸為 mac5、灰階值 150，其列印出之單層厚度為 4.618 μm 。因此，如果再將單層列印時間減少至 50ms，其餘參數為單層曝光兩次、馬賽克尺寸為 mac5、灰階值 150，列印出的單層厚度為 3.387 μm 。

馬賽克		灰階值			
		150	175	200	255
單層曝光次數	馬賽克尺寸				
1x100ms	None	12.114	15.070	15.943	22.275
2x100ms	mac15	9.094	14.663	14.952	15.408
2x100ms	mac10	5.342	10.145	12.663	12.783
2x100ms	mac5	4.618	8.382	10.904	12.107

單位: μm

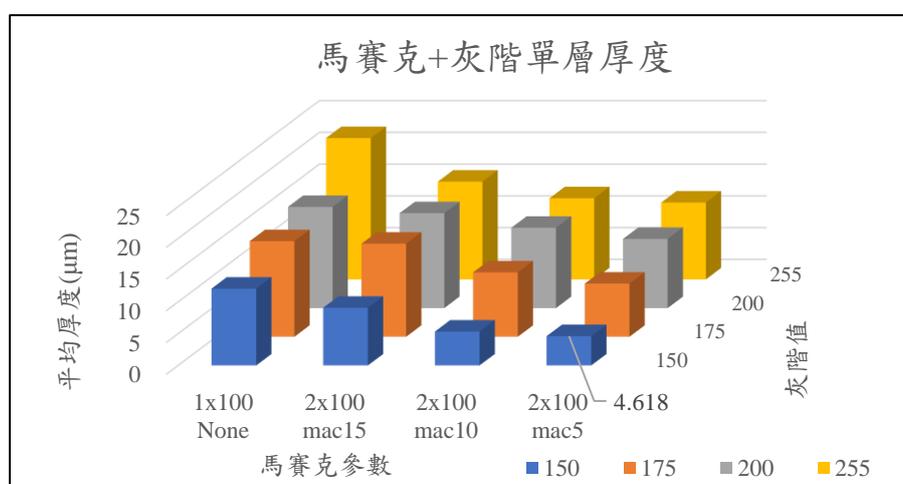


圖 5-38、馬賽克法結合灰階法之綜合比較



5.5.2 井字結構應用

經過前面單層列印，測試出五個不同參數對樹脂固化層厚之影響，分別是樹脂添加物、曝光時間、灰階值、馬賽克尺寸、單層曝光次數。本小節會使用不同參數列印井字結構，從一開始的原始參數，依序改善配方、單層曝光時間和灰階與最後加入馬賽克，並比較不同參數列印出的結果。表 5-16 是列印井字結構參數和量測最上層樓板的結果，量測方式參考 4.2.8。

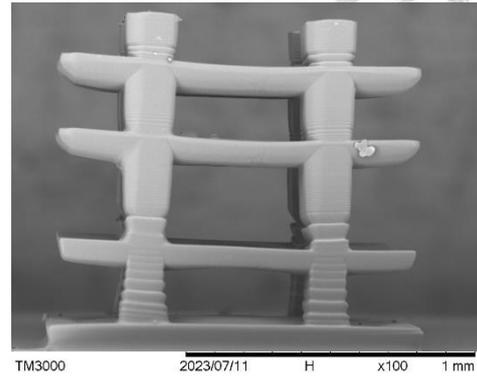
表 5-16、井字結構列印參數與列印簡易結果

編號	配方	光能量		馬賽克		列印結果(μm)	
		單層曝光時間	灰階	尺寸	單層分次	樓板厚度	間隔
O-1	ONYX	2000ms	255	無	無	實心	無
O-2	ONYX-0.5S	2000ms	255	無	無	94.38	213.17
O-3	ONYX-0.5S	500ms	150	無	無	89.08	215.87
O-4	ONYX-0.5S	500ms	150	mac5	2x500ms	40.38	190.93
G-1	GS	2000ms	255	無	無	實心	無
G-2	GS-0.15S-10DB	2000ms	255	無	無	178.38	44.66
G-3	GS-0.15S-10DB	1500ms	150	無	無	157.12	83.72
G-4	GS-0.15S-10DB	1500ms	150	mac5	8x375ms	91.40	155.76

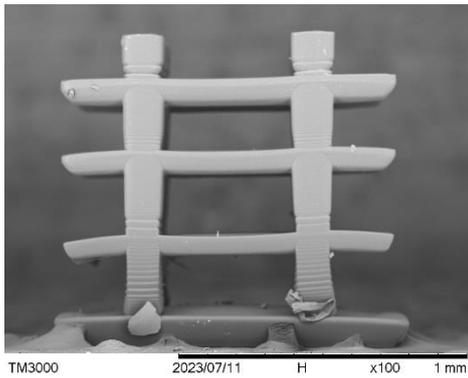
編號 O-1 樓板樹脂無加入任何添加物，因此樓板嚴重過度固化成為實心的立方體，圖 5-39 (a)；編號 O-2 樓板相較 O-1 在樹脂中加入 0.5g 的蘇丹紅，鏤空處有出現，但量測其最上層樓板厚度為 94.38μm，圖 5-39 (b)，與設計尺寸 60μm 還是有一定差距；編號 O-3 相較前者降低給予之光能量，將單層曝光時間下降至 500ms、灰階調整至 150，其最上層樓板厚度降低至 89.08μm，比起 O-2 厚度降低 5.62%，圖 5-39 (c)；編號 O-4 是以 O-3 參數為基礎再加上馬賽克，其外觀與設計圖形最為相似，而最上層樓板厚度也降低至 40.38μm，相較前者厚度降低 54.67%，圖 5-39 (d)。



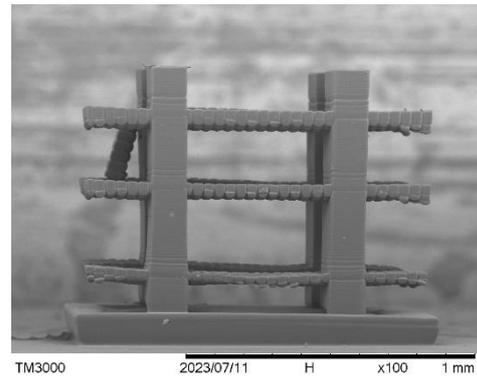
(a) 編號 O-1



(b) 編號 O-2



(c) 編號 O-3



(d) 編號 O-4

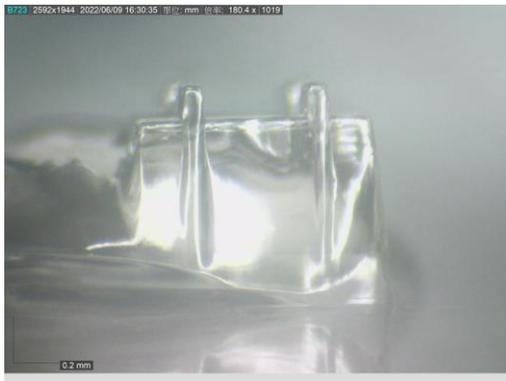
圖 5-39、ONYX 系列不同參數列印之樓板成品側視圖

表 5-17、ONYX 系列不同參數列印之樓板數據

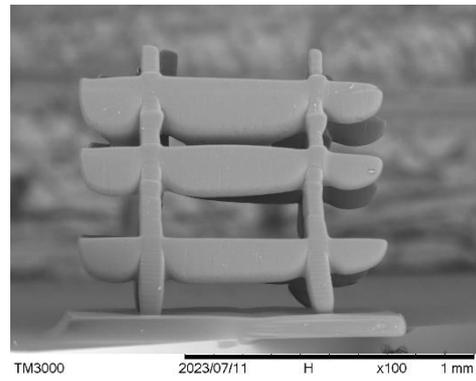
編號	O-2		O-3		O-4	
	樓板厚度	樓板間隔	樓板厚度	樓板間隔	樓板厚度	樓板間隔
位置 1	92.60	216.10	83.80	215.10	44.00	188.60
位置 2	92.70	211.70	88.20	225.20	37.70	192.10
位置 3	97.00	211.70	88.20	207.30	34.30	192.10
位置 4	97.00		88.20		44.70	
位置 5	92.60		97.00		41.20	
平均	94.38	213.17	89.08	215.87	40.38	190.93
正誤差	2.62	2.93	7.92	9.33	4.32	1.17
負誤差	1.78	1.47	5.28	8.57	6.08	2.33

單位: μm

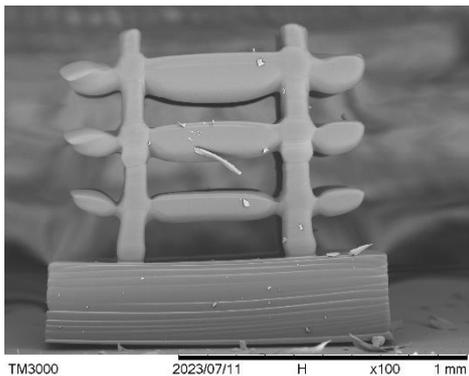
編號 G-1 樓板樹脂無加入任何添加物，因此樓板嚴重過度固化成為實心的立方體，圖 5-40 (a)；編號 G-2 樓板相較 G-1 在樹脂中加入 0.15g 的蘇丹紅和 10ml DB 樹脂，鏤空處有出現，但量測其最上層樓板厚度為 178.38 μ m，且有嚴重的吊床現象，圖 5-40 (b)；編號 G-3 相較前者降低給予之光能量，將單層曝光時間下降至 1500ms、灰階調整至 150，其最上層樓板厚度為 157.12 μ m，其厚度下降 11.92%，圖 5-40 (c)；編號 G-4 是以 G-3 參數為基礎再加上馬賽克，最上層樓板厚度為 91.40 μ m，與 G-3 相較平均厚度降低 41.83%。雖然在厚度上有明顯的減少，但實際尺寸與設計尺寸仍有一定差異，同時樓板與柱子之間卻出現了斷裂，如圖 5-40 (d) 右側柱子和樓板之間。



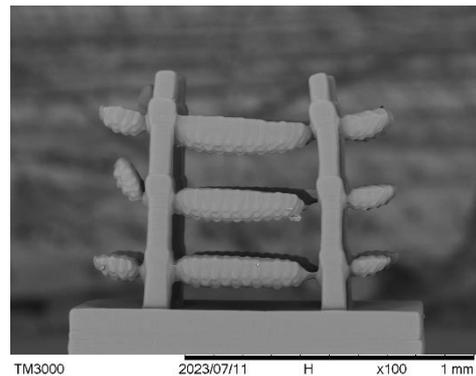
(a) 編號 G-1



(b) 編號 G-2



(c) 編號 G-3



(d) 編號 G-4

圖 5-40、GS 系列不同參數列印之樓板成品側視圖



表 5-18、GS 系列不同參數列印之樓板數據

編號	G-2		G-3		G-4	
	樓板厚度	樓板間隔	樓板厚度	樓板間隔	樓板厚度	樓板間隔
位置 1	146.20	73.10	123.50	126.90	89.80	178.40
位置 2	202.00	35.00	147.50	75.50	109.80	140.70
位置 3	212.40	17.70	171.50	61.80	109.80	137.20
位置 4	202.30	27.80	171.60	65.20	99.50	147.50
位置 5	129.00	69.70	171.50	89.20	48.10	175.00
平均	178.38	44.66	157.12	83.72	91.40	155.76
正誤差	34.02	28.44	14.48	43.18	18.40	22.64
負誤差	49.38	26.96	33.62	21.92	43.30	18.56

單位: μm

將兩種不同樹脂，經過四種不同參數印製井字結構比較後，從樓板厚度尺寸會發現使用馬賽克法對於樓板厚度降低比單純只降低曝光時間和灰階值更加有效果。

第六章、結論與未來展望



6.1 結論

本研究藉由不同方式來改善不同樹脂固化的層厚，以達到厚度盡可能的越薄越好。首先，加入添加物調整樹脂內容物，找出列印品質穩定且固化層厚較小的配方。將三種添加物進行比較會得到表 6-1。

表 6-1、添加物比較表格

比較項目 \ 添加物	蘇丹紅	碳黑	DB
單層厚度影響	大幅減少	減少	大幅增加
外觀影響	量大顏色變紅	表面坑洞、變黑	無
對樹脂影響	量大顏色變紅	濃稠	無

接著將選擇好的配方分別進行灰階法、馬賽克法，將兩種方法三種變因比較(表 6-2)。從結果得到，縮小馬賽克尺寸和降低灰階皆有減小層厚的效果，但分次曝光法在高光敏度的樹脂下，卻是反效果。

表 6-2、灰階法、馬賽克法比較表格

比較項目 \ 變因	馬賽克尺寸	分次曝光	灰階
單層厚度影響	減少趨勢	不一定	減少趨勢
外觀影響	有格子狀紋路	無	無
前置修改項目	曝光圖、G-code	G-code	曝光圖

最後將三種方法進行結合並應用於井字結構中，印製結果呈現出使用 ONYX-0.5S 樹脂和降低光能量皆可印製出鏤空樓板結構。然而，加上馬賽克後，能使樓板尺寸更為精確。



6.2 未來展望

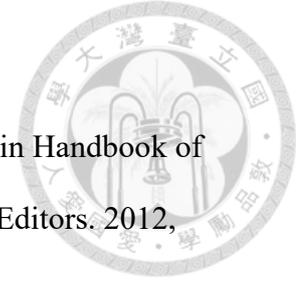
因本研究主要嘗試多種方式，來找出可以減少固化層厚的做法，未來可以針對單一方式進行更深入的實驗，將其數據化，並找出方程式，以利未來使用。

除此之外，無結果的電極法可依照推測原因改良。在調配不同樹脂配方的方法中，目前使用的添加劑都會導致樹脂材料外觀變色，可嘗試其他透明的添加物或光起始劑當作樹脂添加劑。馬賽克法中，會導致列印出的成品有格子紋路，目前構想可在曝光圖上修改漸層灰階，來淡化列印的格紋。

參考資料



- [1] 3D 列印的生活應用與未來趨勢，模具與成型智慧工廠雜誌，2020.9
[3D 列印的生活應用與未來趨勢 - SMARTMolding](#)
- [2] 適用於醫療產業之 3D 列印技術介紹，模具與成型智慧工廠雜誌，2021.5
[適用於醫療產業之 3D 列印技術介紹 - SMARTMolding](#)
- [3] 超高精密 3D 列印製造領軍全球企業，國際領先的 $2\mu\text{m}$ 精度「PμSL 光固化 3D 列印」技術：[微米高精密 3D 列印技術 - 智觀智造 \(makerwisdom.com\)](#)
- [4] 材料「尺寸效應」實現對微納 3D 列印結構的力學性能調控：[材料「尺寸效應」實現對微納 3D 列印結構的力學性能調控 - 智觀智造 \(makerwisdom.com\)](#)
- [5] Nakanishi S.; Shoji S.; Kawata S.; Sun H.-B. Giant elasticity of photopolymer nanowires. Applied Physics Letters, 2007, 91, 063112-063112-3.
- [6] D. Stick, W. K. Hensinger, S. Olmschenk, M. J. Madsen, K. Schwab & C. Monroe, "iron trap in a semiconductor chip", Nature Physics 2006:p36-39.
- [7] Guo, N. and M.C. Leu, Additive manufacturing: technology, applications, and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, 2013. 8(3): p. 215-243.
- [8] 經濟部技術處：
https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=101
- [9] 沈育芳、謝明佑、陳怡文，3D 成型技術之介紹與應用，科儀新知 219 期，108.6:p90-98.
- [10] 葉雲鵬、鄭正元，智慧機械與數位製造 3D 列印的發展，科儀新知 222 期，2020: p. 101-102.
- [11] Zhang, A.P., et al., Rapid Fabrication of Complex 3D Extracellular Microenvironments by Dynamic Optical Projection Stereolithography. Advanced



- Materials, 2012. 24(31): p. 4266-4270.
- [12] Urey, H., S. Madhavan, and M. Brown, MEMS Microdisplays, in Handbook of Visual Display Technology, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, Editors. 2012, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 2067-2080.
- [13] Costa, C., et al., Modeling of video projectors in OpenGL for implementing a spatial augmented reality teaching system for assembly operations. 2019. 9.
- [14] Liu, H., and B. Bhushan, Nanotribological Characterization of Digital Micromirror Devices Using Atomic Force Microscope. Ultramicroscopy, 2004. 100(3): p. 391-412
- [15] Hornbeck, L., Projection Displays and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future. Micromachining and Micromachining. Vol. 2640. 1995: SPIE.
- [16] Hornbeck, L.J., From Cathode Rays to Digital Micromirrors — A Historical of Electronic Projection Display Technology. Texas Instruments Technical Journal, 1998. 15: p.7-46.
- [17] Hornbeck, L.J., Digital Light Processing for High Brightness High Resolution Applications. Display III in Projection. 1997.
- [18] 蔡福森, DLP 投影
- [19] James V. Crivello and Elsa Reichmanis , Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies , Chemistry of Materials: [Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies | Chemistry of Materials \(acs.org\)](#)
- [20] 維基百科-光聚合物
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E8%81%9A%E5%90%88%E7%89%A9>
- [21] 優締股份有限公司-產品說明:
<https://www.eutec.com.tw/zh-TW/article/detail/57>

- 
- [22] 何志松、王維廷，探討聚酯壓克力樹脂配方對性質之影響，科學與工程技術期刊，第十三卷，第二期，民國 106 年:p.33~43.
- [23] 楊日昌，”可視化 DLP 列印系統開發與探討” 國立台灣大學機械工程學系研究所，2022.
- [24] LIQCREAT 公司官網:
[樹脂 3D 打印：Ec、Dp、固化深度等解釋 \(liqcreate.com\)](http://liqcreate.com)
- [25] 普羅森科技(Phrozen)官網:
Onyx Rigid Pro410 – 普羅森科技 光固化 3D 列印機 (phrozen3d.com.tw)
- [26] 陳亮嘉、林宗毅、張奕威、林世聰，線型彩色共焦三維形貌顯微術，科儀新知，第三十四卷。第二期，民國 101 年 10 月:p.55~64
- [27] 大永真空設備股份有限公司，智庫文章，濺鍍(Sputtering)原理
- [28] Phil Mooney, Projection Micro Stereolithography 3D Printing, JULY 9, 2020:
<https://bmf3d.com/blog/projection-micro-stereolithography-3d-printing/>
- [29] Mo, Jianhua & Groot, Mattijs & Boer, Johannes. (2013). Focus-extension by depth-encoded synthetic aperture in Optical Coherence Tomography. Optics express. 21. 10048-61. <https://doi.org/10.1364/OE.21.010048>
- [30] Hur, Jungyu, and Seo, Manseung. Optical Proximity Corrections for Digital Micromirror Device-Based Maskless Lithography.” J. Optical Soc of Korea, 16, 3, Sept. 2012, pp. 221–227. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2012.16.3.221>
- [31] Z. Xiong, H. Liu, R. Chen, J. Xu, Q. Li, J. Li, and W. Zhang, "Illumination uniformity improvement in digital micromirror device based scanning photolithography system," Opt. Express 26, 18597-18607, 2018.
<https://doi.org/10.1364/OE.26.018597>



附錄

附表 1、GS 樹脂配方系列不同曝光時間之量測厚度

編號	GS																									
	列印參數-曝光時間(s)																									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
GS	x	x	x	x	x	x	288.642	436.746	1069.492	857.600	1142.200	1485.000	1827.600	1665.300												
							288.965	417.679	926.512	1353.000	1420.000	1701.300	1866.800													
							301.295	436.519	985.907	1022.735	1179.900	1492.000	1658.433	1670.459												
							45.843	18.813	103.585	338.267	240.100	309.300	210.367	5.159												
GS-0.05S							32.699	18.840	64.189	165.133	202.400	202.300	187.533	5.159												
							80.659	167.925	155.829	171.544	228.421	227.150	249.099	279.484												
							76.852	102.417	171.424	165.674	218.973	222.288	247.744	279.273												
							68.307	125.968	153.532	222.140	199.121	214.122	244.780	285.177												
GS-0.15S							68.606	132.103	160.192	186.453	214.838	221.187	247.208	274.645												
							8.246	35.822	11.232	35.687	11.583	5.963	1.891	4.839												
							7.947	29.686	6.660	20.779	15.717	7.965	2.428	9.468												
															69.399	91.492	94.794	83.187	111.809	113.442	135.410	140.037	128.808	127.177		
GS-0.3S																										
GS-100B																										
GS-300B																										
GS-0.15S-100B																										
GS-0.15S-300B																										
GS-0.3S-100B																										
GS-0.3S-300B																										
GS-0.05CB																										
GS-0.1CB																										
GS-0.15CB																										
GS-0.2CB																										
GS-0.25CB																										
GS-0.3CB																										
GS-0.35CB																										

附表 2、ONYX 樹脂加入碳黑不同曝光時間之量測厚度

ONYX樹脂															
編號	材料成分				列印參數-曝光時間(ms)										
	ONYX(ml)	Sudan(g)	DB(ml)	CB(g)	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500	
ONYX樹脂	100	0	0	0	265.702	262.153	347.580	364.899	351.744	370.274	485.457	577.396	602.061	642.856	
					258.583	259.402	373.060	351.559	342.905	348.076	490.935	593.896	653.099	667.810	
					260.815	259.554	349.099	351.271	347.538	378.856	481.526	598.127	638.416	655.890	
					4.887	2.599	23.961	13.629	4.206	39.361	9.409	24.961	21.672	11.920	
					2.655	2.446	22.443	13.917	4.633	30.780	13.339	20.731	36.355	13.034	
ONYX-0.05CB	100	0	0	0.05	169.588	211.486	205.958	225.095	217.856	233.296	344.358	429.417	441.943	481.218	
					181.502	197.173	229.934	222.573	244.589	262.739	407.837	411.279	462.131	541.887	
					170.346	209.277	215.684	212.075	236.435	278.956	401.930	434.447	480.958	526.561	
					173.812	205.979	217.192	219.914	232.960	258.330	384.708	425.048	461.677	516.555	
					7.690	5.507	12.742	5.181	11.629	20.626	23.129	9.399	19.281	25.332	
4.224	8.806	11.234	7.839	15.104	25.034	40.350	13.769	19.734	35.337						
ONYX-0.1CB	100	0	0	0.1	211.756	176.687	229.031	201.586	219.246	208.792	296.003	334.303	360.238	476.389	
					152.882	179.154	193.423	186.080	166.497	215.934	286.868	332.544	410.132	463.030	
					142.105	138.341	196.116	233.116	177.213	231.006	325.251	333.446	319.427	442.743	
					168.914	164.727	206.190	206.927	187.652	218.577	302.707	333.431	363.266	460.721	
					42.842	14.427	22.841	26.189	31.594	12.429	22.544	0.872	46.866	15.668	
26.809	26.386	12.767	20.847	21.155	9.785	15.839	0.887	43.839	17.978						
ONYX-0.15CB	100	0	0	0.15	137.525	150.244	170.990	191.856	177.021	148.108	206.437	234.796	281.643	302.432	
					134.832	139.758	160.221	163.122	182.009	178.082	195.178	216.857	267.663	268.844	
					162.553	146.974	180.752	164.758	194.902	250.495	201.649	234.822	268.273	256.198	
					144.970	145.659	170.654	173.245	184.644	192.228	201.088	228.825	272.526	275.825	
					17.583	4.585	10.098	18.611	10.258	58.267	5.349	5.997	9.117	26.607	
10.138	5.901	10.433	10.123	7.623	44.120	5.910	11.968	4.863	19.627						
ONYX-0.2CB	100	0	0	0.2	NO.						153.051	134.153	178.690	173.309	173.662
											112.263	117.060	159.651	166.243	191.576
											103.544	140.703	159.270	194.502	232.553
					#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	122.953	130.639	165.870	178.018	199.264	
					#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	30.098	10.064	12.820	16.484	33.289	
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	19.409	13.579	6.600	11.775	25.602						
ONYX-0.25CB	100	0	0	0.25	NO.						125.777	124.209	122.982	157.278	136.407
											105.729	129.101	126.569	129.990	159.584
												144.332	147.105	145.806	
					#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	115.753	126.655	131.294	144.791	147.266	
					#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	10.024	2.446	13.038	12.487	12.318	
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	10.024	2.446	8.312	14.801	10.859						
ONYX-0.3CB	100	0	0	0.3	NO.						103.444	111.957	125.023	110.428	116.520
											82.220	109.441	123.417	119.072	
											109.417	116.729	139.352	151.982	
					#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	98.360	111.957	117.064	124.399	129.191	
					#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	11.057	0.000	7.959	14.953	22.791	
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	16.140	0.000	7.623	13.971	12.671						

附表 3、ONYX 樹脂加入 Sudan 不同曝光時間之量測厚度

ONYX樹脂															
編號	材料成分				列印參數-曝光時間(ms)										
	ONYX(ml)	Sudan(g)	DB(ml)	CB(g)	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500	
ONYX樹脂	100	0	0	0	265.702	262.153	347.580	364.893	351.744	370.274	485.457	577.396	602.061	642.856	
					258.160	257.108	326.656	337.354	347.965	418.217	468.187	623.088	660.088	657.003	
					258.583	259.402	373.060	351.551	342.905	348.076	490.935	593.896	653.099	667.810	
					260.815	259.554	349.099	351.266	347.538	378.856	481.526	598.127	638.416	655.890	
					4.887	2.599	23.961	13.627	4.206	39.361	9.409	24.961	21.672	11.920	
ONYX-0.05S	100	0.05	0	0	121.125	145.156	161.503	155.112	179.918	189.252	262.359	312.520	383.162	356.441	
					91.424	136.771	141.624	152.151	151.881	173.084	250.366	306.640	307.126	323.900	
					97.248	158.727	168.408	160.575	139.374	213.729	270.904		300.052	337.635	
					103.266	146.885	157.178	155.946	157.058	192.022	261.210	309.580	330.113	339.325	
					17.859	11.842	11.230	4.629	22.860	21.707	9.694	2.940	53.049	17.116	
ONYX-0.1S	100	0.1	0	0	77.473	69.426	88.631	88.838	83.683	182.960	141.229	174.123	234.608	268.925	
						78.190	78.033	75.552	64.356	111.664	134.597	230.212	196.491	224.289	
							87.873		84.710	106.624	174.833	173.619	188.996	221.762	
					77.473	73.808	84.846	82.195	77.583	133.749	150.220	192.651	206.698	238.325	
					0.000	4.382	3.785	6.643	7.127	49.211	24.613	37.561	27.910	30.600	
ONYX-0.15S	100	0.15	0	0	▲	▲	77.729	58.854	85.216	122.409	98.609	149.517	125.161	176.806	
							71.864	68.448	51.909	76.621	93.744	130.675	146.705	147.687	
					#DIV/0!	#DIV/0!	74.797	63.651	68.563	101.348	103.599	133.498	139.389	151.645	
					#DIV/0!	#DIV/0!	2.932	4.797	16.654	21.061	14.844	16.019	7.316	25.161	
					#DIV/0!	#DIV/0!	2.933	4.797	16.654	24.727	9.855	13.196	14.228	21.204	
ONYX-0.2S	100	0.2	0	0	▲	48.428	57.104	71.037	90.650	92.075	95.462	99.695	104.332	110.664	
						21.837			83.747		92.026	96.165	92.685	100.167	
						33.439								118.610	
					#DIV/0!	34.568	57.104	71.037	87.199	92.075	93.744	97.930	98.509	109.814	
					#DIV/0!	13.860	0.000	0.000	3.452	0.000	1.718	1.765	5.824	8.796	
ONYX-0.25S	100	0.25	0	0	21.558	29.558				31.068	60.187	80.361	103.871	116.696	
						24.497	▲	▲	▲	39.905	51.818	82.820	82.216	78.558	
						11.117				27.824	59.982				
					21.558	21.724	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	32.932	57.329	81.591	93.044	97.627	
					0.000	7.834	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	6.973	2.858	1.230	10.828	19.069	
ONYX-0.3S	100	0.3	0	0	16.600	14.345	18.244	23.413			39.823	59.044	83.333	83.953	
					6.771	22.999	23.428	40.369		▲	▲	38.550	50.454	66.024	72.155
						18.184	17.584	26.729				42.539	59.676	74.188	83.038
					11.686	18.509	19.752	30.170	#DIV/0!	#DIV/0!	40.304	56.391	74.515	79.715	
					4.915	4.490	3.676	10.199	#DIV/0!	#DIV/0!	2.235	3.285	8.818	4.238	
ONYX-0.35S	100	0.35	0	0	12.620	18.780	14.865	27.280	26.792				44.407	50.169	48.092
					17.527	16.664	28.091	22.535	23.865		▲	▲	46.504		55.853
					21.890	19.785	20.664	25.583	27.652				43.597		
					17.346	18.410	21.207	25.133	26.103	#DIV/0!	#DIV/0!	44.836	50.169	51.973	
					4.544	1.375	6.884	2.147	1.549	#DIV/0!	#DIV/0!	1.668	0.000	3.881	
ONYX-0.4S	100	0.4	0	0	10.199	15.347	16.013	16.595	10.316			31.106	46.610	44.602	51.224
					10.965	16.028	19.937	15.599	21.874		▲	23.324	39.190	47.268	50.618
					14.446	20.300	18.268	25.795	26.300				51.845	55.377	53.770
					11.870	17.225	18.073	19.330	19.497	#DIV/0!	27.215	45.882	49.082	51.871	
					2.576	3.075	1.864	6.465	6.803	#DIV/0!	3.891	5.963	6.295	1.899	
ONYX-0.45S	100	0.45	0	0	4.044	10.272	24.451	10.599	23.891	13.600	22.490	20.322	33.921	54.284	
					9.606	16.425	10.631	20.562	11.965	22.371	24.368	21.083	24.264		
					15.180	15.615	11.072	20.926	20.431	27.300	19.647	35.306	26.688		
					9.610	14.104	15.385	17.362	18.762	21.090	22.168	25.570	28.291	54.284	
					5.570	2.321	9.066	3.564	5.129	6.210	2.200	9.736	5.630	0.000	
ONYX-0.5S	100	0.5	0	0	11.486	11.743	16.758	14.997	9.858	25.231	22.350	31.514	34.351	40.026	
					8.940	14.227	8.588	12.876	26.962	19.790	23.321	36.299	37.610	33.989	
							15.493	17.121	9.701	21.804	26.902	39.403	37.078	37.555	
					10.213	12.985	13.613	14.998	15.507	22.275	24.191	35.739	36.346	37.190	
					1.273	1.242	3.145	2.123	11.455	2.956	2.711	3.664	1.264	2.836	

附表 4、ONYX-0.5S 樹脂單層曝光 100ms 馬賽克量測厚度

單層曝光次數	1x100ms	2x100ms			4x50ms			10x20ms		
馬賽克尺寸	None 原始	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5
位置1	13.592	11.239	10.957	6.844	21.614	14.127	12.177	33.091	20.848	16.159
位置2	20.291	15.069	12.696	14.924	33.704	15.701	14.996	32.632	24.622	21.963
位置3	27.178	15.746	14.697	14.554	32.763	17.619	14.236	30.860	28.907	21.983
平均厚度	20.354	14.018	12.783	12.107	29.360	15.816	13.803	32.194	24.792	20.035
正誤差	6.824	1.728	1.914	2.817	4.344	1.803	1.193	0.897	4.115	1.948
負誤差	6.762	2.779	1.826	5.263	7.746	1.689	1.626	1.334	3.944	3.876

附表 5、ONYX-0.5S 樹脂單層曝光 500ms 馬賽克量測厚度

單層曝光次數	1x500ms	2x500ms			4x250ms			10x100ms		
馬賽克尺寸	None 原始	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5
位置1	40.026	25.714	21.111	17.435	32.165	24.295	23.933	36.498	29.407	25.309
位置2	33.989	30.407	24.417	13.188	35.898	25.159	21.702	33.793	32.208	29.847
位置3	37.555	30.468	26.023	20.882	38.960	28.411	25.809	39.161	30.037	33.230
平均厚度	37.190	28.863	23.850	17.168	35.674	25.955	23.815	36.484	30.551	29.462
正誤差	2.836	1.605	2.173	3.714	3.286	2.456	1.994	2.677	1.657	3.768
負誤差	3.201	3.149	2.739	3.980	3.509	1.660	2.113	2.691	1.144	4.153

附表 6、GS-0.15S-10DB 樹脂單層曝光 2000ms 馬賽克量測厚度

單層曝光次數	1x2000ms	4x1000ms			8x500ms			10x400ms		
馬賽克尺寸	None 原始	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5
位置1	96.30	75.50	55.00	51.60	48.10	44.60	48.00	58.30	48.10	48.00
位置2	86.00	85.80	72.00	65.20	51.40	51.40	41.20	52.40	45.80	41.20
位置3	82.60	68.60	72.10	72.00	65.20	68.60	48.00	58.40	48.10	48.10
位置4	82.60	79.00	68.70	68.60	58.40	54.90	44.60	51.80	45.80	44.60
位置5	89.40	79.20	65.50	61.80	55.00	51.40	48.00	55.20	48.10	48.00
平均厚度	87.380	77.620	66.660	63.840	55.620	54.180	45.960	55.220	47.180	45.980
正誤差	8.920	8.180	5.440	8.160	9.580	14.420	2.040	3.180	0.920	2.120
負誤差	4.780	9.020	11.660	12.240	7.520	9.580	4.760	3.420	1.380	4.780

附表 7、GS-0.15S-10DB 樹脂單層曝光 8000ms 馬賽克量測厚度

單層曝光次數	1x8000ms	4x4000ms			8x2000ms			10x400ms		
馬賽克尺寸	None 原始	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5	mac15	mac10	mac5
位置1	130.40	123.50	122.69	127.00	120.10	127.30	126.90	117.90	122.40	123.90
位置2	140.60	130.30	130.40	130.40	140.60	127.00	127.00	123.90	125.80	126.90
位置3	147.50	137.20	133.80	134.20	133.80	130.30	130.50	133.80	127.00	120.10
位置4	137.20	130.30	130.30	123.50	127.10	123.50	116.70	127.00	121.30	116.80
位置5	133.80	126.90	123.50	122.70	123.90	130.30	117.40	114.00	118.40	119.80
平均厚度	137.900	129.640	128.138	127.560	129.100	127.680	123.700	123.320	122.980	121.500
正誤差	9.600	7.560	5.662	6.640	11.500	2.620	6.800	10.480	4.020	5.400
負誤差	7.500	6.140	5.448	4.860	9.000	4.180	7.000	9.320	4.580	4.700

附表 8、ONYX-0.5S 樹脂不同單層曝光時間(ms)灰階值量測厚度

灰階值 單層曝光時間	100	125	150	175	200	225	255
50	-	-	5.884	6.556	8.473	9.663	10.213
60	-	-	-	8.508	9.033	12.692	12.985
70	-	-	-	11.676	12.737	12.957	13.613
80	-	-	-	6.129	8.661	10.016	14.998
90	-	-	7.620	8.650	10.889	11.563	15.507
100	-	9.265	12.114	13.427	15.943	18.324	22.275
200	11.496	11.549	12.716	15.833	18.130	19.784	24.191