# 電磁控制對 EPOXY 基材不鏽鋼纖維配向之研究

李平惠*　林明俊

南亞技術學院機械工程系

## 摘要

本研究應用 EPOXY 材料，添加導電性材料(金屬纖維)形成導電性複合材料，利用模具外部增設電磁場裝置以電磁輔助射出成型方式達成導電添加物之分佈與配向控制，探討靜/動態流體中纖維配向與分佈之影響，評估感應電磁鐵設計之線圈匝數、電流大小和工作氣隙對磁通密度的影響，並找出最佳磁場分佈，進而探討該區域對環氧樹脂基材之纖維配向的影響。

研究結果顯示，在電磁鐵中心區域，其磁通密度較其他區域高，且排向一致。當電流增加，磁通密度則越高，尤其在感應電磁場中心兩側區域較其他區域高。在工作氣隙方面，當工作氣隙越小時，磁通密度越高，工作氣隙為 3mm 時，其最高磁通密度為 1132G。在線圈匝數方面，隨著匝數的增加，其磁通密度也越高。無磁場控制之纖維配向沿著流動方向而排列，而有磁場控制之纖維配向都較趨近垂直流動方向，且靜態流體磁場控制的纖維配向較動態流體磁場控制更佳。

**關鍵字：**電磁控制、不鏽鋼纖維、纖維配向

*Email：phui@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070#6403　Fax：03-4384670

# STUDY ON THE STAINLESS STEEL FIBER ORIENTATION OF EPOXY SUBSTRATE FOR ELECTROMAGNETIC CONTROL

P. H. Lee*, M. J. Lin

Department of Mechanical Engineering

Nanya Institute of Technology, Taoyuan, Taiwan

## Abstract

Polymers filled with conducting fibers to provide electrical conductivity performance have received great attention due to the requirements of many engineering applications. This study using electromagnetic aided controlling fiber orientation and distribution in flow field to investigate effect of distribution of fiber orientation angle and penetrating conductivity. The data were analyzed and the static / dynamic fluid and the effect of working air gap on the magnetic flux density of the induction electromagnet was evaluated, and the optimum magnetic field distribution was found out. Then, the influence of the area on the epoxy resin substrate fiber orientation.

The results show that the magnetic flux density is higher than that of other regions in the central region of the electromagnet. When the current increases, the magnetic flux density is higher, especially in the center of the induced electromagnetic field on both sides of the region than other areas. In the working air gap, when the working gap is smaller, the higher the magnetic flux density, the working gap is 3mm, the maximum flux density of 1132G. In the number of turns in the coil, with the increase in the number of turns, the magnetic flux density is higher. The fiber alignment with no magnetic field control is arranged along the flow direction, while the fiber alignment with magnetic field control is closer to the vertical flow direction, and the static fluid magnetic field control fiber alignment is better than the dynamic fluid magnetic field control.

**Keyword:** Electromagnetic Control, Stainless Steel Fiber, Fiber Orientation

*Email：phui@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070#6403　Fax：03-4384670

# 壹、前言

隨著科技的進步、人民生活水準的提高，使得電腦、電子等相關產品使用更為普及，尤其是資訊產品朝著輕、薄、短、小的方向發展，致使電磁波對身體或電子系統之影響問題愈來愈加重要。因此，防電磁波干擾(EMI)之屏蔽效果是目前資訊產業發達首先要克服的重要問題。目前市場上的大部分 4C 產品通常都是以高分子材料做為外殼之材料，且是經射出成型來製作。然而塑膠本身絕緣不導電，因此並不具有防 EMI 的效果，為增加塑膠防 EMI 之屏蔽效果，目前主要的加工方式以在塑膠中添加導電性填充材料（例如：導電碳黑、碳纖、金屬纖維、鍍鎳碳纖維等）再經由射出成型方式來成型是最為符合經濟效益的加工方式，也是目前較受到重視且未來比較有發展性的方法。而導電性填充材鍍鎳碳纖維以及不鏽鋼纖維，是目前最常被提出來討論的兩種金屬纖維填充材料，但是在成型時應注意纖維之分佈以及排向性，纖維與纖維之間搭接情況如果較佳，所形成的導電通路也會比較大，防電磁波的遮蔽效果也會比較好。成型過程中運用某些機制控制導電添加物的排向或分佈即能以少量導電添加物達到成品的異方向性性能之需求。本研究所提出之電磁輔助射出成型方式，主要是應用於當塑料內含導電添加物時，利用模具外部增設電磁場裝置使在成型過程中來影響充填過程高分子的流動或是導電添加物的分佈與排向，並藉由可視化系統去觀察其纖維受磁場控制時之流動行為，探討導電添加物的分佈與排向變化，並量測對應成型品電學性質之變化情形，藉導電添加物之分佈與配向控制，提昇成型品之導電度效果。

在複合材料方面的文獻研究中，應用材料導電度多寡之主要關鍵於填充材料，而填充材料影響導電度因素，包括添加種類、體積/重量含量、表面/界面性質、展弦比(Aspect Ratio)與填充材本身導電值[1]，其中展弦比與含量關係特別密切，因為較低展弦比往往需添加較多含量，才能達到最低導電之滲透門檻(Percolation Threshold)。Saleem[2]說明充填物中碳纖維之機械性能、導電度與熱傳導皆優於碳粒；Kortscho[3]結果指出碳纖維之間之接觸橋梁愈多，則導電度滲透門檻較低，也因此較大展弦比而造成纖維之間容易形成搭接通路。

Heinzel [4]等人指出成型品所混合之導電性材料，若能正交(Orthogonal)於平板之平面能有效提高導電性。而在 Davenport [5]研究中亦指出導電度隨展弦比(Aspect ratio)增加而增加，較大的展弦比較易形成導電通路，此外展弦比增加亦可降低導電碳纖維量，並且改進塑膠製品機械性質，其展弦比定義為填充材料最大與最小尺寸比值，一般都為纖維長度與直徑之比值且範圍設定於 20~1000 之間。Motlagh

等人[6]提出使用超臨界微細發泡成型製程，使用微細發泡影響碳纖維配向，改善穿透導電度,其厚度方向與橫向方向之導電度相比下至少可改善 10 倍。Gardocki[7]則藉由添加特殊磁性材料在高分子複合材料中，來增加以射出成型方式成型時之穩定性。Tannenbaum[8]等人針對在磁場狀態下將奈米碳管混摻在環氧樹脂基材中形成奈米複材後，其性質所受之影響來進行研究，結果顯示其機械強度會受到所使用之環氧樹脂基材種類以及磁場強度所影響，若是奈米碳管能受到磁場作用而確實排列，則其性質則可明顯優於未暴露於磁場中之情況。在 2010 年許[9]等人藉由澆注成形(Casting Process)之固化過程中，利用電場與電磁場產生裝置，誘發高導電性之鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂基材中進行研究，實驗過程以光學顯微鏡進行纖維配向觀察，並以穿透導電性量測裝置進行導電度量測，最後並探討藉由銑床加工方式將其運用於燃料電磁雙極板之可行性。實驗結果顯示使用電場誘發其纖維配向於環氧樹脂材料，在不產生電荷轉移與聚集的情況下，其纖維是不會完成聚集與配向。而在電磁場中其纖維幾乎是完全垂直磁場方向整齊排列(圖 1)，且在與沒有配向處理試片相比較，可量測到其試片穿透導電性數目由原本的 18.75%提升至 84.37%。

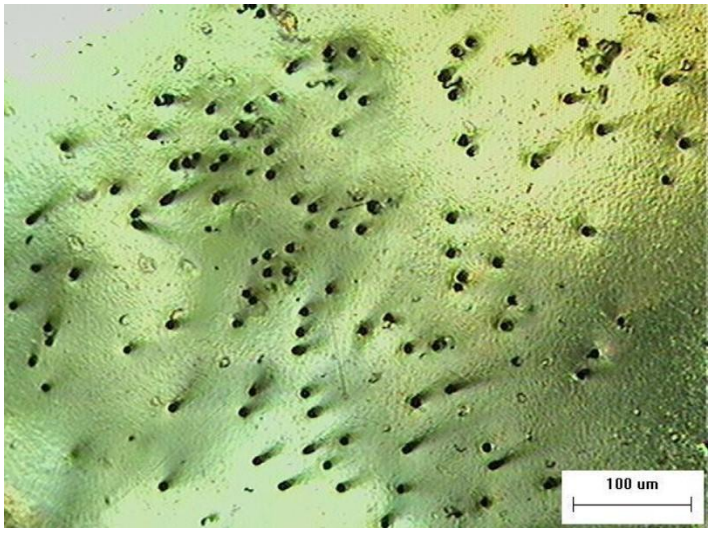



圖 1 纖維排向一致 [9]

因此，如果能適當的提升其系統磁通量密度，對於使用電磁場誘發纖維排向，在製造與開發具有異方向性性能需求產品上的可行性是很高的。綜合射出成型製程方面，成型參數與成型製程之所以可提升穿透導電度，乃是控制纖維垂直於橫

截面之表面做配向排列，成型參數、射出壓縮與超臨界微細發泡成型製程皆能影響纖維配向，而要能使纖維流動過程中，直接控制纖維流動排列之製程，電磁輔助射出成型製程提供較佳之選擇，因此本研究所提出之電磁輔助射出成型方式，主要是應用於當塑料內含導電添加物時，利用模具外部增設電磁場裝置以達成導電添加物之分布與配向控制，來提昇成型品之導電度效果。此研究計畫之執行，對於導電複合材料技術之發展將有一定之貢獻。

# 貳、實驗方法

## 一、複合材料與製備

本研究採用達濬公司環氧樹脂型號為 JA193-1、JA193，其黏度為 3000、6000 cps，作為本實驗之基材，具有良好的操作性，透明度極佳，能夠在低溫量少時快速硬化。而添加的纖維材料是採用北京金富邦纖維科技有限公司所生產之 AISI 316L 不銹鋼剪切短纖維，直徑為 8μm、長度分別為 1、3、6 mm 共三種，其柔軟不銹鋼剪切短纖維抗拉強度及切斷強度大，耐高溫，熔點高可以使用於高溫的環境。在模具設計與試片設計上，為了能方便觀察纖維在試片內流動配向的情形，所以將試片設計成簡單之矩形長平板試片，而模具設計成一凹一凸，由於確保流體在模具中順利流動，因此在模具充填末端處開設一 5×17 mm 的排氣孔，並且在模具兩側邊緣使用螺絲栓緊，以確保射出時模具緊閉。而模具尺寸以及試片尺寸如圖 2~4 所示。

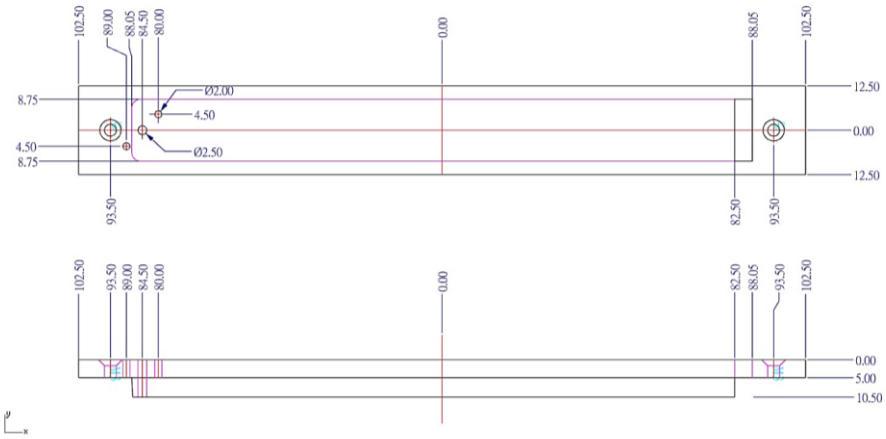



圖 2 模具公模側尺寸 (厚度 5 mm)

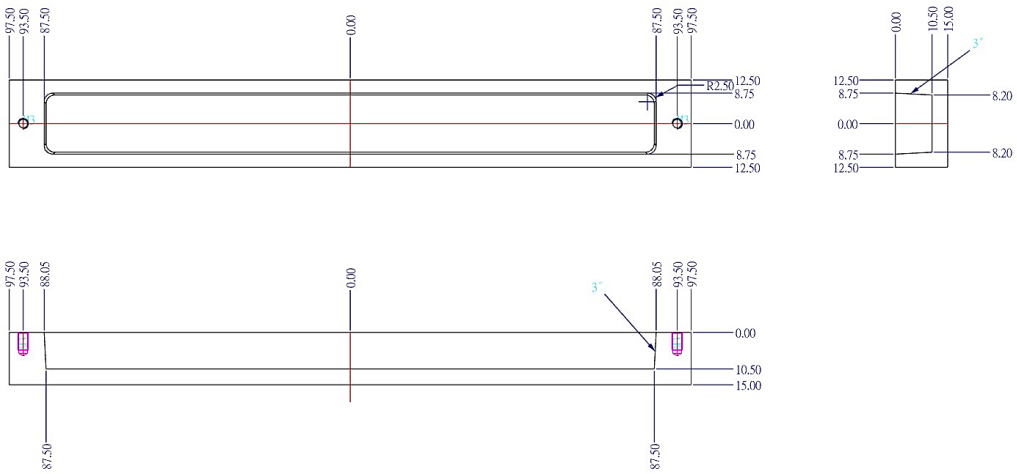



圖 3 模具母模側尺寸

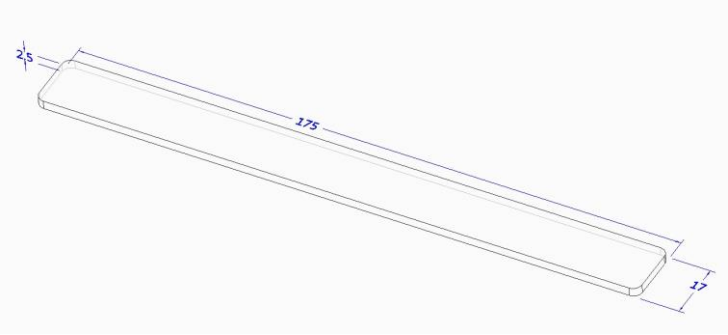
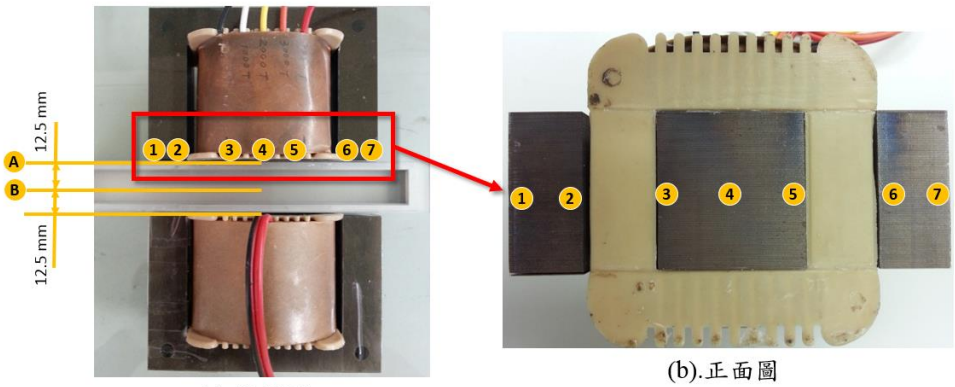



圖 4 試片尺寸

## 二、磁通量密度測試

以三個部份來觀測磁通量大小，分別為激磁電流、線圈匝數以及兩電磁鐵之工作間距。在激磁電流測試中，固定線圈匝數為4000匝、兩電磁鐵工作間距為25 mm，分別通以0.1~0.7安培去觀察磁場中之磁通量大小。而磁通量測位置分別量測A、B兩側，A側為感應電磁鐵之磁場作用面的7個點，而B側是界於兩電磁鐵之中心區域的7個點，此7個點在高度位置是位於導磁鐵芯正中心，且點與點之間間距為19 mm，共14個點，其量測位置之俯視圖與正面圖如圖5所示。而在線圈匝數測試中，只測試單顆電磁鐵並固定電流大小為0.6A，分別觀察1000、2000、3000、4000匝其磁通量大小，而量測位置為A側7點。最後在兩電磁鐵工作間距測試中，固定電流大小為0.6A以及線圈匝數為4000匝，分別測試間距距離為1、3、5、7……54 mm對磁通量大小之影響，量測位置為A測之7個點。




(a).俯視圖　(b).正面圖

圖 5 磁通量密度量測位置示意圖(a).俯視圖；(b).正面圖

## 三、磁場分佈測試

在實際磁場分佈觀察中，將導磁鐵粉平均鋪平於模具內部，在利用感應電磁鐵通以一外加磁場，觀察磁場分佈情形，並以電腦輔助工程分析軟體ANSYS®去分析磁場分佈情形與實際實驗分佈作比較，但在建立感應電磁鐵模型時，感應線圈的部份沒有辦法與實際線圈的匝數配合，所以會以電流值大小作補償，使分析磁通量大小貼近實際實驗值，來作相對比較，分析模型如圖6。使用環氧樹脂(Epoxy)加入不銹鋼金屬纖維，以不同控制因子：Epoxy黏度、纖維長度以及磁通強度來成型試片，成型參數如表1。在成型的過程中分別觀察無磁場時之一般射出成型纖維配向情形，以及在感應磁場控制下複合材料充填時纖維配向情形，跟充填完畢後流體靜止狀態下開啟感應磁場對纖維配向的影響。

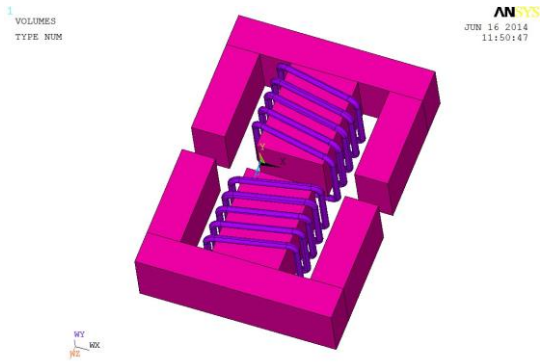



圖6 ANSYS®之感應電磁鐵模型

表 1 成型參數表

| A-靜態流體,B-動態流體,N-無磁場 | | | |
|---|---|---|---|
| 組別 | 黏度(cps) | 磁力大小(G) | 纖維長度(mm) |
| 1 | 3000 | 200 | 1 |
| 2 | 6000 | | |
| 3 | 3000 | 200 | 1 |
| 4 | | 125 | |
| 5 | | 50 | |
| 6 | 3000 | 200 | 1 |
| 7 | | | 3 |
| 8 | | | 6 |

# 叁、結果與討論

本研究在電磁場產生裝置製作完成後，使用高斯計進行磁通量密度量測，分別觀察電流、線圈匝數及電磁鐵工作間隙對電磁鐵的影響，並觀測電磁場分佈情形，找出最佳磁場分佈區域。磁力線之間不會相交，其密集的程度即代表磁場的強弱。在感應電磁鐵的工作間隙內撒上一些鐵粉，通以一磁場將每一粒鐵粉磁化後，鐵粉相當於一個小磁針，藉此方法可以觀察出磁力線曲線趨勢，得到磁場的分佈。

## 一、比較實際實驗與分析之磁場分佈情形

從圖7中可以得知，編號4的區域其鐵粉密度和排向最為明顯，代表此處磁作用力最強；而編號2~3及6~7之間完全沒有鐵粉，也就代表此區域其磁場作用力最弱。利用高斯計實際量測，圖8為A側不同電流下各位置之磁通強度，編號3、5由於磁場邊緣效應的影響，此處之磁通強度最大且電流大小如果越高，其邊緣效應也會越來越明顯，另外邊緣兩側磁通強度則最小。圖9為B側不同電流下各位置之磁通強度，編號4磁通強度最強且與A側之磁通強度值相近，也就代表此處之磁力線是較密集的通過編號4這個區域，其越遠離中心位置的區域，其磁通強度越小。

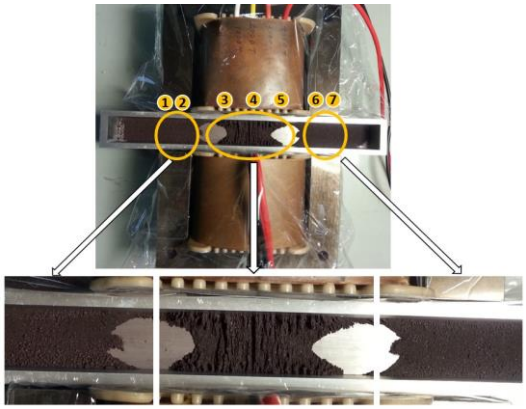



圖7感應電磁鐵磁場分佈

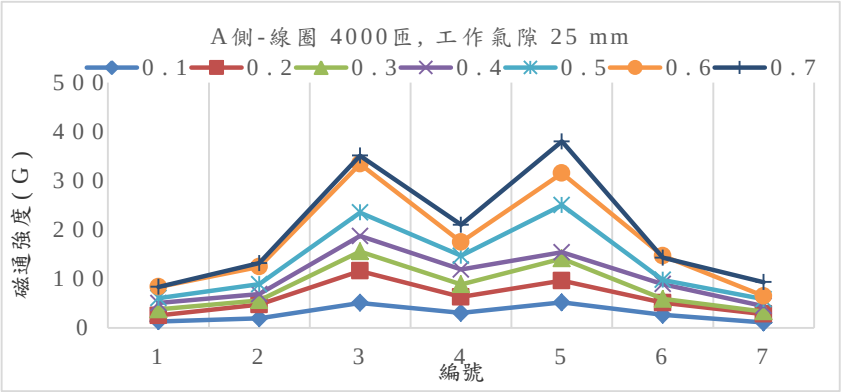



圖 8　A 側-不同電流大小於各位置之磁通密度

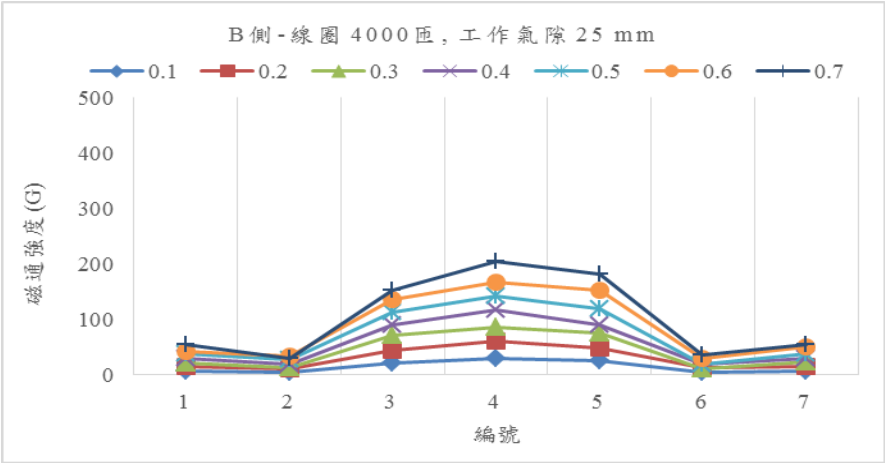



圖 9　B 側-不同電流大小於各位置之磁通密度

在分析部分由於建立線圈模型時線圈匝數沒辦法與實際線圈吻合，所以藉以調整電流量使得磁通量與實際實驗相互對應，因此只參考分析之磁場分佈與實際

實驗驗證。圖10為感應電磁鐵模型之上視圖，分別觀測電磁鐵中心(編號3~5)以邊緣(編號5~7)之磁場分佈。由圖11(a)可得知，感應電磁鐵中心區域其磁場均勻分布且排向一致，而在圖11(b)邊緣處之磁場是成弧形分佈，磁場從中心的導磁鐵芯流向邊緣之導磁鐵芯形成一迴路。中心磁場密度比邊緣密集，分析與實際實驗之結果相互吻合。圖12為實際成型試片，其纖維配向也有如上述之磁場分佈相符，藉此描繪出整個電磁場磁力線分佈示意圖，主要的磁場迴路有6條，如圖13所示。

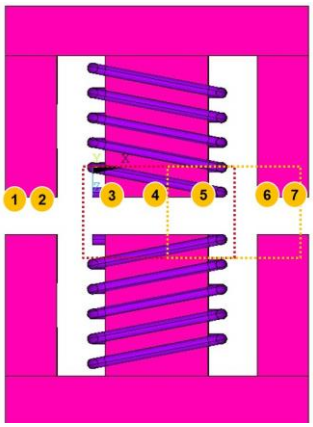



圖 10　ANSYS 感應電磁鐵模型之磁場分佈觀測位置

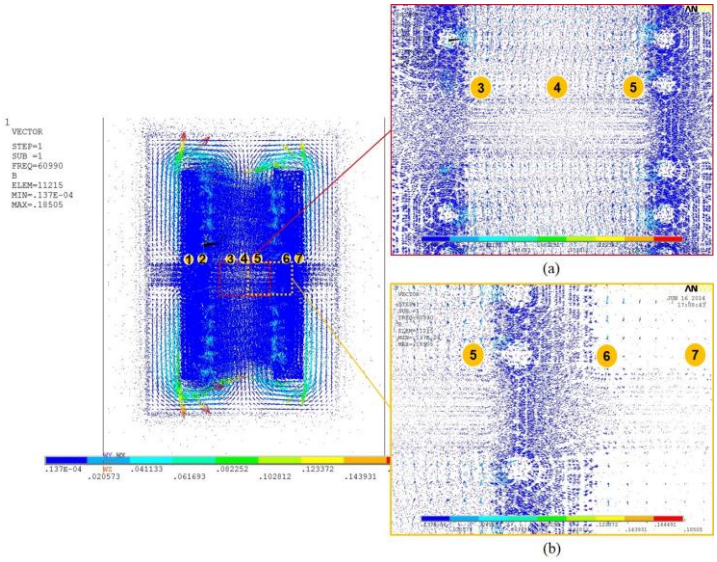



圖 11 ANSYS 磁場分佈及局部放大圖(a)電磁鐵中心放大圖(編號 3~5)；(b)電磁鐵邊緣放大圖(編號 5~7)

圖 12 實驗試片之纖維分佈

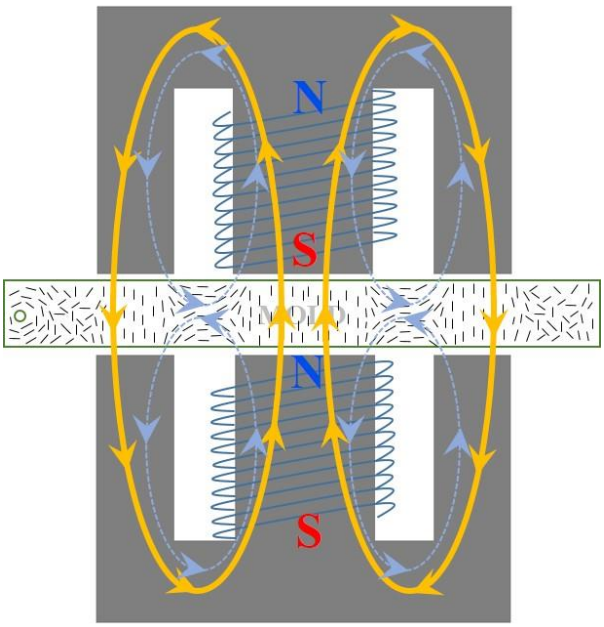



圖 13 磁力線分佈示意圖

經由上述所提到的磁場分佈情形，我們知道位於編號4這個區域其磁場最均勻、強度最高且排向一致垂直於流動方向，所以在第二階段時的觀測區域會設定於感應電磁鐵之正中心(編號4)，藉此觀察當流體從左邊進澆口處往右充填時，其纖維受感應電磁場控制時配向的情形。

## 二、各控制變因對感應電磁場之影響

(一) 電流大小與磁通量強度之關係

在考慮磁場邊緣效應與不銹鋼金屬纖維配向效果下製作電磁場產生裝製，其系統電流與磁通量強度之關係如圖14。可得知當電流越高其磁通量強度越強，且A側會比B側還要高。

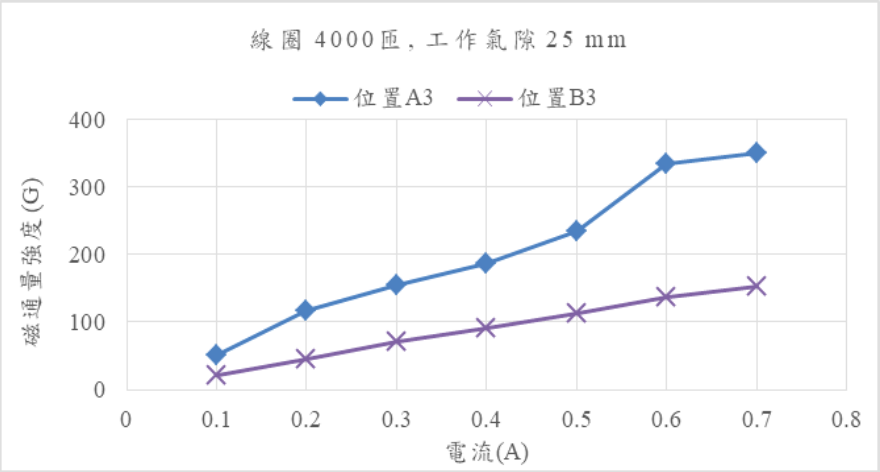



圖 14 電磁場產生裝置-系統電流與磁通量強度的關係

(二) 工作氣隙與磁通量強度之關係

圖15為不同間距下各位置之磁通量強度，可得知當工作氣隙越小時，磁通密度越高，工作氣隙為3mm時，其最高磁通密度為1132G。反之，工作氣隙越大，其磁通強度越弱，當工作氣隙到27 mm之後，其磁通量強度已經趨於平穩，也就代表說兩顆感應電磁鐵之間已經互相遠離彼此的磁場區域了，所以不會形成對通的磁力線。

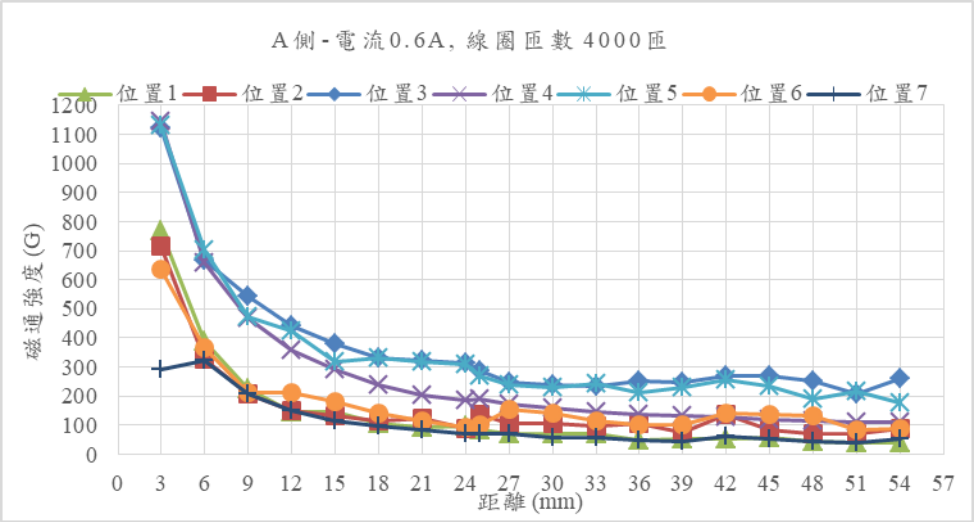



圖 15 不同工作氣隙下各位置之磁通量強度關係

(三) 線圈匝數與磁通量強度之影響

圖16為不同線圈匝數與磁通量強度之關係圖，線圈匝數分別以1000、2000、3000、4000來觀測其磁通量大小。從圖中可得知隨著線圈匝數的增加，其磁通量強度亦增加，且編號3、5由於磁場邊緣效應的影響使得磁通量較於其他位置來的高。

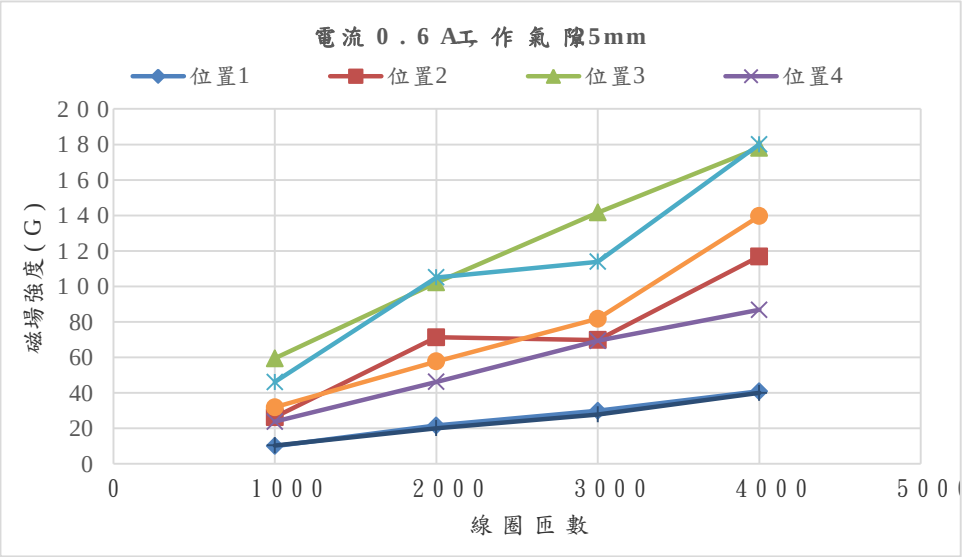



圖 16 不同線圈匝數下各位置之磁通量強度關係

經由上述提到的三個控制變因與磁通強度之關係，我們可以了解，當電流越高、工作氣隙越小、線圈匝數越多，其磁通強度越大。

## 三、比較靜/動態流體有無磁場之纖維轉向情形

(一) 無磁場控制之纖維配向情形

在一般無磁場射出過程中，環氧樹脂經流變儀量測其黏度後發現，黏度並不會因剪切速率的增加而下降或上升(圖17)，所以在本論文中將環氧樹脂的流體特性歸類為牛頓流體。其流動方式有別於熱塑性材料，環氧樹脂在充填時並不會因模壁低溫造成流體快速冷卻凝固而有噴泉流效應的流動形為，會因流體與模壁之間的摩擦而造成流動波前速度的差別。但其整體流動行為是如層流的方式流動，所以從CCD拍攝之平面圖(圖18(a))中可得知 top、core、bottom這三層之纖維配向並不會相差太多，因質心受力方向與流動方向會相同，所以在此纖維受力方向幾乎平行於流動方向而使得纖維配向沿著流動方向排列。在無磁場之纖維配向角度分佈圖(圖19)中，將配向角度分為6個區間且每個區間為30°，當角度為90°時，代表纖

維配向平行於磁場方向。在無磁場控制之纖維配向中，纖維角度數量分佈區間主要集中在0°~30°及151°~180°這兩個區間中，這曲線趨勢代表著纖維配向是與流動方向平行，與磁場方向垂直排列。

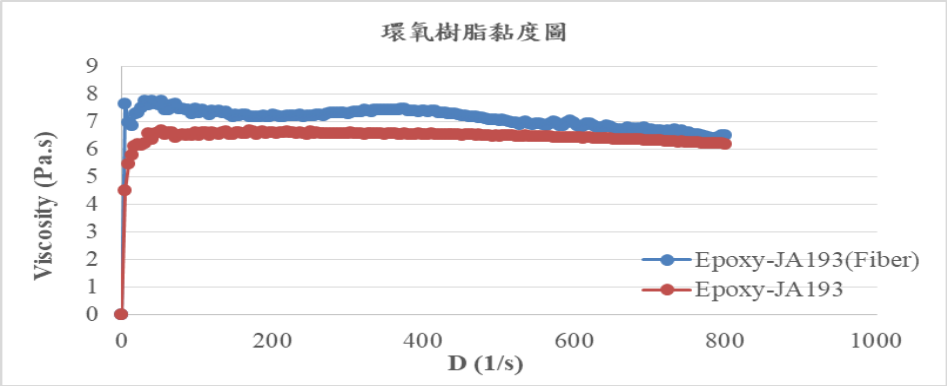



圖 17 Epoxy-JA193 有無纖維之黏度圖

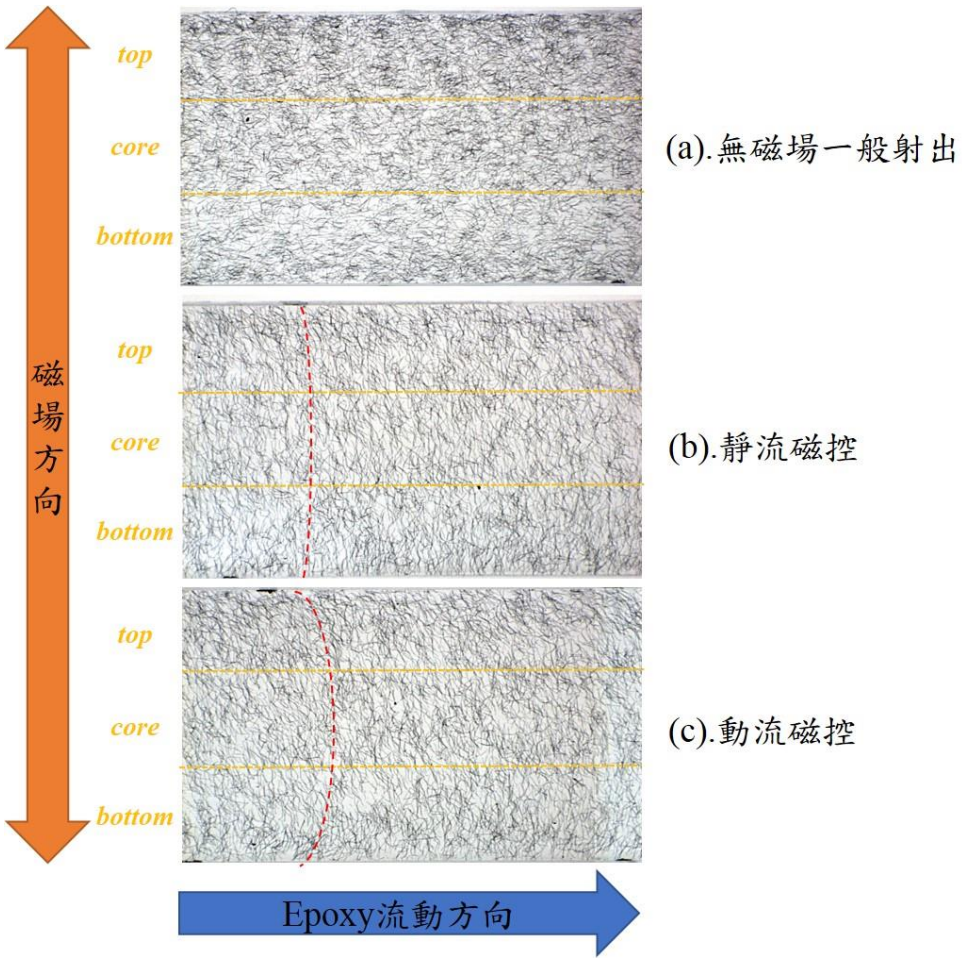



圖 18 靜動態流體磁控與無磁控之 CCD 影像擷取圖比較

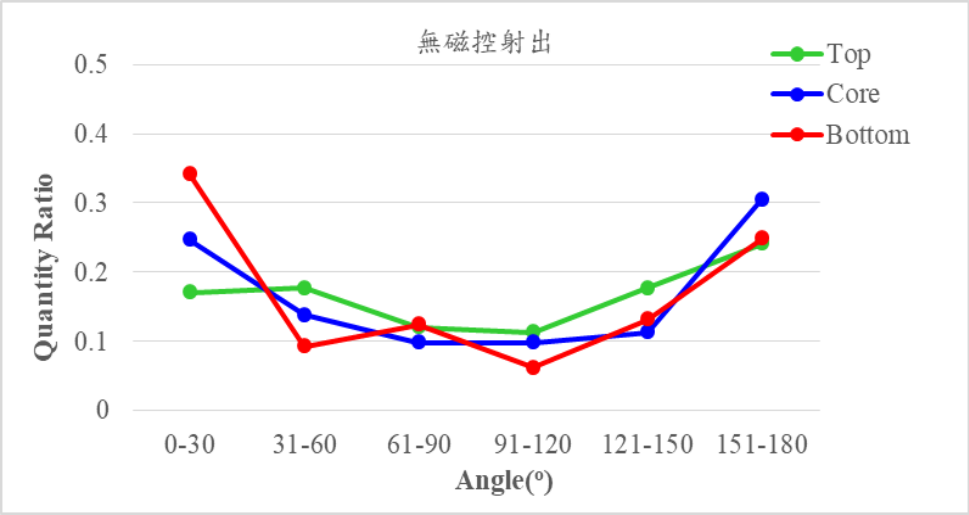



圖 19 無磁場控制射出成型之各層纖維角度分佈圖

(二) 靜態流體於感應電磁場控制纖維配向情形

其實驗過程是當充填結束後，流體於靜止狀態時開啟感應電磁場觀察纖維轉向之情形，磁通量密度為200G時且開啟磁場20sec確保每根纖維磁化。從圖18(b)可得知，纖維配向幾乎垂直於流動方向，這是因為纖維在靜止的環氧樹脂中，只需要克服流體本身黏度的阻力，纖維受磁場磁化後之磁扭力纖維矩大於環境阻力使得幾乎完全平行於磁場方向。從圖20可以看出由於纖維受磁場作用，整體角度區間數量分佈都及中於60~120度的區間較多，代表纖維垂直於流動方向且平行於磁場方向排列。

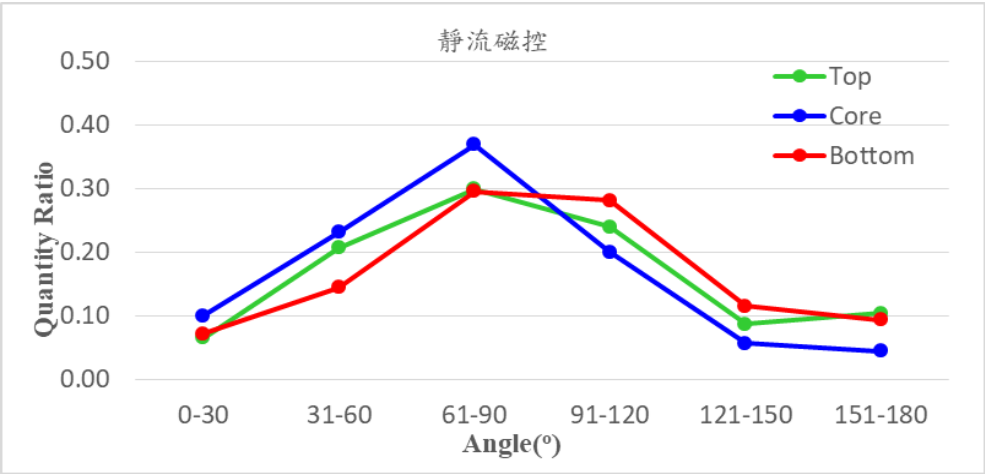



圖 20 靜態流體之磁場控制各層之纖維角度分佈圖

(三) 動態流體於感應電磁場控制纖維配向情形

所謂動流磁控指的是當充填開始時感應電磁場開啟直到充填結束感應電磁場才關閉，觀察流動中纖維配向受磁場控制之影響。每次充填時間7 sec，磁通量密度為200G，從圖18(c)得知，因受到流體流動的影響，其纖維配向會隨著流動波前而排向，其結果對應到圖21可以觀察出，當纖維距離感應電磁鐵越近時，其感應電磁鐵與纖維之磁極作用力就越強，所以在近模壁處兩側之top層纖維多分佈於31°~90°，而bottom層之纖維分佈在91°~120°較為多；當纖維距離感應電磁鐵越遠時，纖維與感應電磁鐵之相互磁極作用力就越低，但由於core層之纖維是受對稱之電磁鐵磁極影響，所以在纖維配向上大多集中於90°，也就是平行於磁場方向。

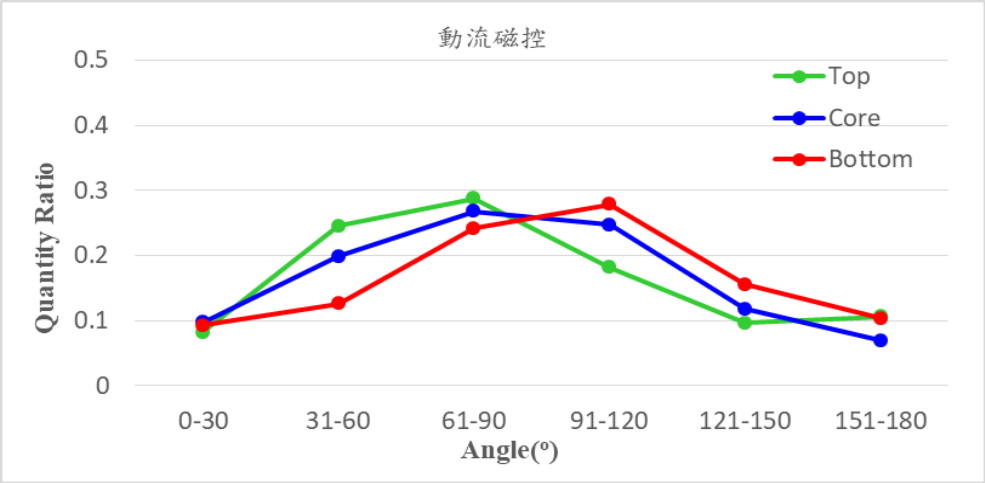



圖 21 動態流體之磁場控制各層之纖維角度分佈圖

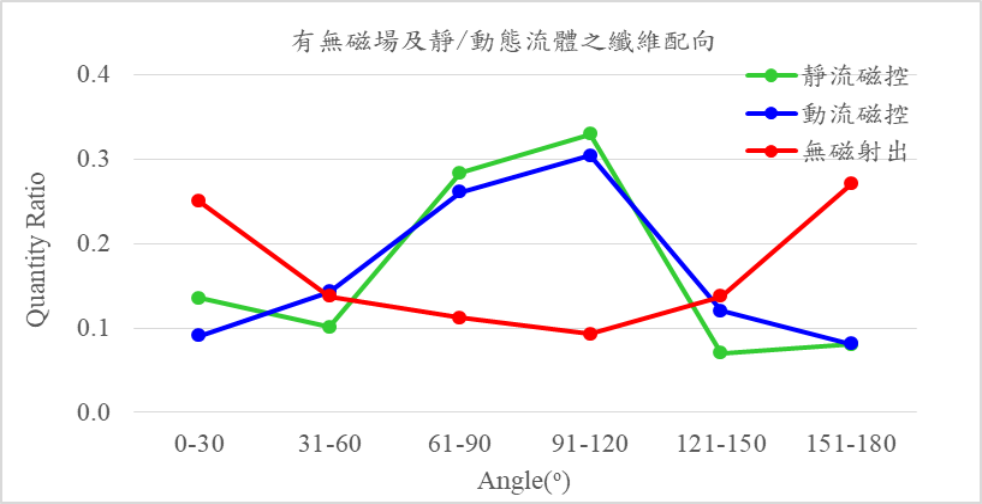



圖22 比較有無磁場與靜/動流磁控之纖維配向角度分佈

最後比較有無磁場控制與靜流與動流之整體纖維配向角度，分佈如圖22所示，無磁場控制之纖維配向主要沿著流動方向而排列，而有磁場控制之纖維配向都較趨於90º，且靜態流體控制纖維配向角度區間在60º~120º，較動態流體控制高。

## 肆、結論

本研究從感應電磁鐵設計的可行性，到使用感應電磁鐵控制靜/動態流體之金屬纖維配向，證明纖維配向之效果是成功的，其結果歸納結論如下:

一、實際實驗與分析都顯示，在電磁鐵中心區域，其磁通密度較其他區域高，且排向一致。當電流增加，磁通密度則越高，尤其在感應電磁場中心兩側區域較其他區域高。

二、三個控制變因與磁通強度之關係，當電流越高，其磁通強度越強；而工作氣隙越小時，磁通密度越高，工作氣隙為 3mm 時，最高磁通密度為 1132G；線圈匝數越多，其磁通強度越大。

三、在無磁場控制之纖維配向中，纖維配向與流動方向平行，與磁場方向垂直排列；在靜流磁控方面，感應電磁場磁化纖維使得其磁扭力矩大於環境阻力，纖維幾乎與流動方向垂直，完全平行於磁場方向；在動流磁控方面，受噴泉流效應的影響使纖維配向與流動方向垂直，平行於磁場方向。

## 伍、參考文獻

[1] V. S. Mironov, M. Park, C. Choe, J. Kim, S. Lim, and H. Ko, “Influence of Carbon Fiber Surface Treatments on the Structure and Properties of Conductive Carbon Fiber/Polyethylene Films”, Journal of Applied Polymer Science, 84 , No.11, (2002) 2040-2048.

[2] A. Saleem, L. Frormann and A. Iqbal, “Mechanical, Thermal and Electrical Resistivity Properties of Thermoplastic Composites Filled with Carbon Fibers and Carbon Particles”, Journal of Polymer Research 14, No. 2, (2007) 121-127.

[3] M. T. Kortschot and T. R. Woodhams, “Computer Simulation of the Electrical Conductivity of Polymer Composites Containing Metallic Fillers”, Polymer Composite, 9, Issue 1, (1988) 60–71.

[4] A. Heinzel, F. Mahlendorf, O. Niemzig and C. Kreuz, “Injection moulded low cost bipolar plates for PEM fuel cells”, Journal of Power Sources, (2004) 35–40.

[5] D. E. Davenport, “Metalloplastics : High Conductivity Materials”, Polymer News, (1982).

[6] G. H. Motlagh, A. N. Hrymak, and M. R. Thompson, “Properties of a Carbon Filled Cyclic Olefin Copolymer”, Journal of Polymer Chemical B: Polymer Physical, 45, (2007) 1808-1820.

[7] Gardocki, A. and Drummer, D., "Improvement of the Stability of Polymer Bonded Rare-Earth-Magnets During the Injection Molding Process", SPE ANTEC, p.1009, (2004).

[8] Camponeschi, E., Vance, R., Garmestani, H. and Tannenbaum, W., "Properties of Carbon Nanotube-Polymer Composites Aligned in a Magnetic Field", Polymer Engineering and Science, Vol.45, p.2037, (2007).

[9] 許富明，"電場/電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂基材之研究及其在燃料電池雙極板之應用"，交通大學碩士論文，2010 年。