

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫第三年期末報告

磁性流體電能轉換裝置於流場量測之開發與應用

計畫編號：NSC 98-2811-E-009-058

執行期間：98年8月1日至101年7月31日

主持人：陳慶耀 教授 國立交通大學機械工程系

研究生：吳啟鳴、黃國安、陳柏瑋、王聖焱、王隆福

博士後研究員：林忠豪

摘要

第一年度以實驗來探討當不同速度和不同體積的磁流體通過線圈裝置時，其電磁感應變化的特性。在資料分析上，本文利用快速傅立葉轉換將原始量測訊號加以處理。當磁流體通過線圈時，在磁通量密度的量測上會出現一明顯的波峰訊號，而感應電動勢的方向也會產生改變。感應電動勢的大小會隨著磁液體的體積和速度的增加而增大；速度效應對於感應電動勢的增加比較明顯。此外，為了預測最大感應電動勢，本研究首先提出單位體積修正因子的觀念。依據本文的實驗條件與結果，此修正因子約為 0.006。

第二年度則嘗試把磁液滴實際應用在流場實驗中，來觀察該液滴在實際管流內的運動型態以及是否能偵測到使用微小磁液滴時所產生的感應電壓訊號，並且進一步設計出能得到最好訊號之實驗機制。從實驗結果可以發現將磁鐵取代激磁線圈後，訊號以及感應電壓明顯。此外，本研究也嘗試以 COMSOL 軟體進行模擬計算，計算結果顯示磁通量變化的趨勢與實驗量測一致，未來將搭配此模擬成果更深入理論探討磁液滴大小與形狀對電動勢之影響。

而第三年度則利用磁性流體在管流中的熱傳行為，在實驗中欲結合磁性流體與奈米熱傳，試以改變磁性流體的體積分率與流場中的雷諾數，探討磁性奈米流體之基本性質以及提高流體熱傳性質。在實驗中可以發現，增加流場中的雷諾數與磁性流體的體積分率對於磁性流體的熱傳係數的確有所提

升，所得到實驗數據相當符合與文獻中的經驗公式。此外，利用法拉第電磁感應原理，因激磁線圈通於交流電而產生時變之磁通量，使磁性流體通過此時變均勻磁場時產生感應訊號，藉由改變磁性流體之體積分率以及溫度，產生多組感應電壓之訊號並作分析及比較。

關鍵字：磁流體、磁通量密度、感應電動勢

一、前言

鐵磁性流體 (ferrofluids，或簡稱為磁性流體) 為一人工合成流體，在 1960 年代早期已被成功的合成出來，其組成為利用化學方法將界面活性劑 (surfactant) 包覆於奈米級磁性顆粒上 (例如氧化鐵粒子)，並使之均勻分散於載基流體例如水或油之中，使其具有流體之流動性以及磁性的雙重特性 [1]。目前，已有許多學術研究以及工業應用被發表出來 [2,3]。此外，磁性流體也可被應用在微機電系統 (MEMs) 中閥門 (valves) 和幫浦 (pumps) 的設計以及生化工程領域 [4,5]。為了因應全球能源危機以及環境保護，利用磁流體電能轉換 (electricity conversion) 的特性來設計電磁轉換裝置也是一項引人注意的研究。依據法拉第定律 (Faraday's law) [6,7]，磁流體磁通量 (magnetic flux) 的變化可以產生感應電動勢 (induced emf)，而磁通量的變化可歸因於電流為交流電 (AC)，磁流體和磁場之間有相對運動出現和磁流體的磁化強度

(magnetization) 因不同濃度和體積而產生變化。因此，可以利用此電能轉換的特性來量測磁流體流動的物理特性，例如速度、濃度、體積分率等等。Zhan [8] 利用磁流體在渦輪產生器中的流動來描述廢熱如何被轉換成電能的概念。在最近幾年，此特性則被應用在量測靜態氣液兩相系統中氣泡的空包率 (the void fraction of bubble) 和速度 [9-14]。此外，當磁液滴 (ferrofluids droplet) 於微小通道中流動時，電能轉換的觀念也可應用於量測其動態流場的性質上。此觀念未來可以應用於微型裝置 (micro-devices) 設計以及藥物傳遞 (medicine transportation) 的發展上 [15,16]。

在其他未來應用方面，磁流體粒子之奈米級尺度及其於溫度變化下所產生之磁力變化，亦可運用在新一代之電子冷卻系統，配合新發展之微流道機構，可將磁性粒子加入原本於微流道中用於散熱用之工作流體，再利用磁性粒子吸熱產生之磁化現象，並推動流體循環以進行熱量傳輸，達到散熱效果。此外，隨著微機電系統之發展，磁流體可受外部磁場加以控制之特性，更可被充分利用，以取代傳統煩瑣之壓力驅動流場裝置；其中一項具體之應用為磁性液滴通過一微小通道口，因其磁吸引力、黏滯力與表面張力之不平衡作用下，液滴會產生持續性之分裂為數個微次液滴，此現象可運用為一新型之微液滴產生或液滴分割之簡易裝置 [16]。磁性粒子因其優異之生物相容性，及其奈米特質，亦已被應用於生物醫學技術上，如細胞分離、精準釋藥與腫瘤細胞之追蹤與治療技術。

然而，對了解上述未來應用方向上，磁流體運動與其相關資料之量測極為重要。如於產生微液滴或有效液滴分割時，一項重要控制條件如微次液滴之體積，因其液滴分割速度極為快速，一個別液滴分割時間均於數百微秒間，即便以控制產生個別微液滴並實際收集量測亦有相當之困難度。因此，本計畫將利用磁性流體電能轉換裝置特性，預定於三年內進行磁性流體電能轉換裝置之開發，並首先將此裝置應用於磁性流體流場之速度與磁粒子濃度之量測，研究內容包括實驗與理論模擬相互搭配。為了建立關於電能轉換裝置以及量測動態磁流體流場性質的基

礎，本計畫在第一年的重點主要是規劃與架設完整的實驗裝置並進行實驗，首先探討當磁流體通過線圈裝置時，其磁通量密度 (magnetic flux density) 和感應電動勢的大小。不同的實驗條件如磁流體體積、速度和容器的大小均考慮在第一年計畫的研究中。此外，在第一年計畫中也首先提出單位體積修正因子 (unit volume correction parameter) α 的觀念來預測最大感應電動勢。相信本計畫除開發一創新型態量測磁性流體流場速度與磁粒子濃度之技術之外，亦可以為日後若須進行更具困難度之具實用價值磁性流體電能轉換裝置開發之基礎。第二年度則嘗試把磁液滴實際應用在流場實驗中，來觀察該液滴在實際管流內的運動型態以及是否能偵測到使用微小磁液滴時所產生的感應電壓訊號，並且進一步設計出能得到最好訊號之實驗機制。此外，本研究也嘗試以 COMSOL 軟體進行模擬計算，計算結果顯示磁通量變化的趨勢與實驗量測一致，未來將搭配此模擬成果更深入理論探討磁液滴大小與形狀對電動勢之影響。而第三年度則利用磁性流體在管流中的熱傳行為，在實驗中欲結合磁性流體與奈米熱傳，試以改變磁性流體的體積分率與流場中的雷諾數，探討磁性奈米流體之基本性質以及提高流體熱傳性質。

二、第一年度研究成果

1. 實驗量測理論基礎與裝置

1.1 實驗量測之理論基礎

當施加電流於和感應線圈 (induction coils) 共軸的激磁線圈 (excitation coils) 時，其感應線圈上所產生的感應電動勢可以表示為

$$V = -N \left(\frac{d\phi}{dt} \right). \quad (1)$$

其中， V 為感應電動勢； N 為感應線圈匝數； ϕ 為磁通量； t 為時間。磁通量 ϕ 可以再表示成

$$\phi = \int (\vec{B} \cdot \vec{n}) dA. \quad (2)$$

其中， \vec{n} 和 A 分別為法向量和與磁場垂直的面積大小。磁通量密度 \vec{B} 的大小可以表示為

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}). \quad (3)$$

其中， μ_0 、 \vec{H} 和 \vec{M} 分別為真空磁導率 (the permeability of vacuum)、磁場強度 (the magnetic field strength) 和磁流體的磁化強度。因此，(1) 式可以改寫成

$$V = -N \frac{d}{dt} \int \{[\mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \cdot \vec{n}]\} dA. \quad (4)$$

依據 (4) 式，感應電動勢可以經由 \vec{H} 和 \vec{M} 來求得。

在本研究中，因磁場強度未能讓磁流體達到飽和磁化率，所以假設 \vec{M} 和磁流體的體積成正比。此外，由於感應線圈在製作時其線圈重疊的現象在所難免；因此，本文首先提出單位體積修正因子 α 來預估最大感應電動勢。故 (4) 式可以再改寫成

$$V = -\alpha N \frac{d}{dt} \int \{[\mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \cdot \vec{n}]\} dA. \quad (5)$$

因此，最大感應電動勢可利用 α 、 \vec{H} 和 \vec{M} 來求得而不必量測 \vec{B} 的大小。

1.2 實驗裝置

實驗裝置如圖 1(a) 所示，包含激磁線圈、感應線圈和裝滿磁流體 4 毫升的容器。激磁線圈和感應線圈的直徑分別為 160 mm 和 100 mm 且此兩個線圈為共軸。圖 1(b) 則為線圈裝置的放大圖，其中 A' 和 E' 點為激磁線圈的邊緣；B' 點和 D' 點則為感應線圈的邊緣；C' 點則為線圈裝置的中心點。透過電源供應器 (power source)，施加穩定直流電 (DC) 0.75 安培於激磁線圈上。高斯計 (gauss meter) 可以量測激磁線圈所產生的磁場強度，其大小隨線圈裝置高度的變化如圖 2 所示。其中， L_i 表示感應線圈的範圍。裝滿磁流體的容器則利用三相馬達 (three-phase induction motor) 並以玻璃管為通道以等速向上移動。探棒 (transverse probe) 則置於感應線圈的中央處以量測磁通量密度的變化，而感應線圈生成感應電動勢；磁通量密度和感應電動勢均可被記錄於資料擷取器 (data logger) 中。此外，本實驗所使用的磁流體為 EMG905，其飽和磁化率、黏度與密度分別為 473.7 Oe、 9×10^{-3} Ns/m² 和 1.24 g/ml。我們也假設磁性顆粒均勻分佈於磁流體中。本實驗的操作溫度固定在 25 °C。

2. 訊號分析

由於實驗裝置所造成的誤差，故所得的磁通量密度和感應電動勢的原始訊號有雜訊 (noise signal) 產生。故若能有效消除雜訊，則得到的訊號將更有利於數據分析。本研究採用快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) [17] 來消除雜訊，其步驟如下：

(1) 原始訊號的時間域 (time domain) 可利用 (6) 式來轉換成頻率域 (frequency domain)

$$G\left(\frac{n}{N \cdot \Delta T}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k \cdot \Delta T) e^{-j2\pi nk/N} \quad (6)$$

其中， N 和 ΔT 分別為數據個數和時間間隔，時間域和頻率域的函數分別為 $g(k \cdot \Delta T)$ 和 $G\left(\frac{n}{N \cdot \Delta T}\right)$ ；

(2) 過濾高頻的雜訊；

(3) 再將過濾完畢的頻率域利用逆傅立葉轉換 (inverse FFT) 轉變成時間域

$$g(k \cdot \Delta T) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G\left(\frac{n}{N \cdot \Delta T}\right) e^{-j2\pi nk/N} \quad (7)$$

在第四節中的訊號量測結果除了原始訊號之外，均已利用上述的轉換方法加以處理分析。

3. 結果與討論

3.1 磁通量密度與感應電壓變化

以磁流體 4 毫升且向上移動速度為 0.04 m/s 為例，圖 3(a) 描述當磁流體通過線圈裝置時，其原始磁通量密度大小隨時間變化的關係。由圖中可以觀察出當磁流體尚未通過 A' 和 B' 點時 (圖 1(b))，磁通量密度大小維持在一個範圍內。當磁流體開始進入感應線圈後再逐漸離開的情況下 (依序通過 B'C'D' 點)，其值會逐漸升高，並在線圈中心處 C' 點達到最大值 (約 81 Oe)，然後再下降，最後降回先前的固定範圍，可知磁通量密度的變化非常迅速。這是由於磁通量密度逐漸被磁流體的磁化強度影響所造成的。因此，在量測磁通量密度時會出現一個相當明顯的波峰訊號。利用 FFT 方法轉換後的訊號如圖 3(b) 所示，圖中 x 軸為線圈高度 y 的函數。由圖中可以觀察到磁通量密度突然變化的範圍，如線段 FG 所示。

感應電動勢大小的原始訊號如圖 3(c) 所示，可以得知其值很小，約為 4×10^{-4} V，但是本實驗仍然可測出其值。當磁流體依序通過 A 至 E 點時，感應電動勢的方向會改變，此結

果與文獻18和19的現象一致。感應電動勢的方向會改變是由於磁通量改變所造成的。當磁流體開始進入感應線圈時，磁通量隨時間變化而增加，並有初始方向；相反地，當磁流體開始逐漸離開感應線圈時，磁通量隨時間變化而減少，故造成與初始方向相反的結果。經由FFT方法轉換後的訊號如圖3(d)中的藍線所示。比較FFT轉換後的磁通量密度和感應電動勢可以得知，最大磁通量密度約出現在0.07 m左右，此點對時間的微分值為0，表示此點的感應電動勢為0。同時，我們也可以發現到圖3(d)藍線中0.07 m左右的位置，其感應電動勢也為0。因此，本實驗所測量到的磁通量密度以及其相對應的感應電動勢大小是非常相符的。此外，經由FFT轉換後以及經由(5)式所計算得到的感應電動勢大小比較也表示於圖3(d)中(黑線)。誤差的發生是由於本實驗的磁場強度和磁通量分布均不一致所導致的。然而，比較產生感應電動勢方向的位置是十分接近的。因此，在第2節中假設磁流體的磁化強度跟液體體積成正比的假設以及透過單位體積修正因子來求得最大感應電動勢的想法均是正確的。從圖3(d)的比較所獲得的 α 值約為0.0056。

3.2 不同磁流體體積對磁通量密度與感應電壓變化的影響

在固定磁流體與線圈裝置之相對速度下，圖4說明磁流體在不同體積的情況下，磁通量密度與感應電動勢的大小。由於磁化強度隨磁流體體積增加而增加的關係，故磁通量密度最大值隨磁液體體積增加而增加。因此，最大感應電動勢也隨之增加。此外，磁通量密度大小突然改變的範圍也隨著體積增加而增加。此結果也暗示著當相同磁液體體積被裝入相同容器時，由於底面積相等的關係，此範圍會隨著容器中磁液體高度增加而增加。

3.3 不同磁流體速度對磁通量密度與感應電壓變化的影響

在固定磁液體體積下，圖5為不同相對速度時，磁通量密度與感應電動勢的大小。從圖上可以發現到，磁通量密度最大值不會被不同的相對速度影響。這是因為磁通量密度是磁場強度和磁流體磁化強度的函數。此

外，感應電動勢的最大值則隨著相對速度增加而增加。比較圖4(b)和圖5(b)，可以得知磁液體體積和相對速度的增加均可以提升最大感應電壓；不同的相對速度效應影響最大感應電動勢比較明顯，而不同磁液體體積的效應則顯著影響磁通量密度大小突然改變的範圍。

3.4 不同容器體積對感應電壓的影響

在本年度計畫中，不同容器大小裝有相同體積的磁液體對感應電壓的影響也被考慮進來。表1說明2毫升磁液體加入10 cm³、8 cm³、6 cm³和4 cm³的容器後，其高度以及與磁場垂直之截面積的大小；圖6則表示其感應電動勢的大小。從圖6可以發現到，因截面積大小不同，所以在不同截面下所對應到的磁顆粒數也有所差異，故使得10cm³情況下的感應電動勢較大。然而，此結果與圖4和圖5比較，不同容器大小對於感應電壓的影響比較不明顯。

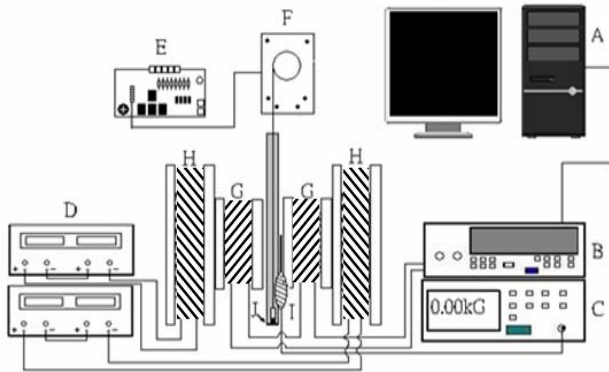
3.5 單位體積修正因子

圖7表示基於不同體積、速度和不同容器大小下的單位體積修正因子 α 。從圖中可以觀察到此修正因子並不會隨上述的實驗條件不同而改變。本研究所得到的 α 大約為0.006。因此，依據圖7的結果，可以再次證明本研究提出的單位體積修正因子的觀念是正確的。

4. 第一年度結論

為了建立未來動態磁性流體流場特性量測的基礎與開發電能轉換裝置，本年度計畫首先以實驗探討當磁性流體通過線圈裝置時，其磁通量密度與感應電動勢的變化。我們利用FFT方法來轉換原始量測訊號。當量測磁通量密度大小時，會出現一明顯的波峰訊號；磁通量密度最大值出現的位置為感應線圈的中央。在相同相對速度不同磁液體體積的情況下，由於磁化強度和磁液體體積成正比，故磁通量密度會隨著磁液體體積增加而增加。在相同磁液體體積不同相對速度時，最大磁通量密度不會被不同的相對速度所影響，因為磁通量密度是磁場強度和磁化強度的函數。當磁流體通過線圈裝置時，感應電動勢的方向會改變。感應電動勢會隨著

磁液體的體積和相對速度的增加而增加；相對速度的效應對感應電壓的增加比較明顯。此外，本文首先提出單位體積修正因子的觀念來預測最大感應電動勢。在不同磁液體體積、相對速度和不同容積的容器下，我們可以得到一定值 $\alpha = 0.006$ 。本研究也針對不同容積的容器對感應電動勢的大小作探討，發現容積較大其感應電動勢較大。



- A: 個人電腦
- B: 資料擷取器
- C: 高斯計
- D: 電源供應器
- E: 馬達控制晶片
- F: 三相馬達
- G: 感應線圈
- H: 激磁線圈
- I: 探棒
- J: 磁流體

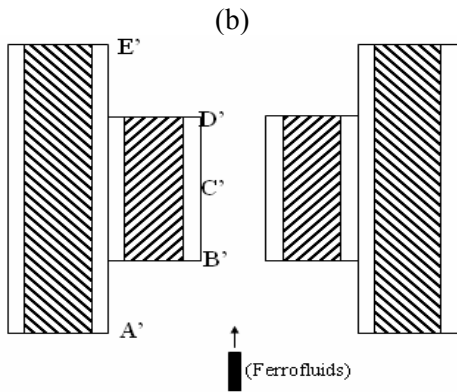


圖 1 (a) 實驗設備示意圖和 (b) 線圈裝置放大圖。

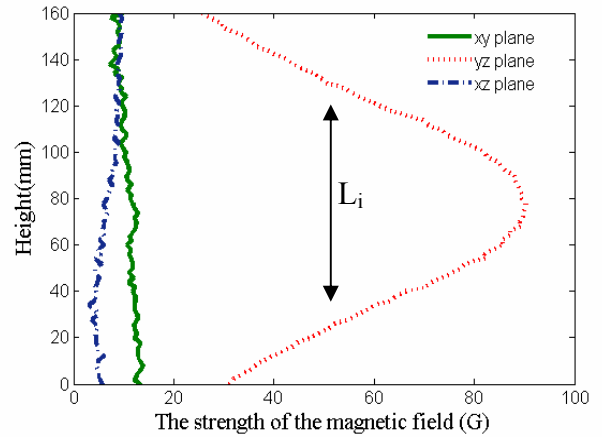
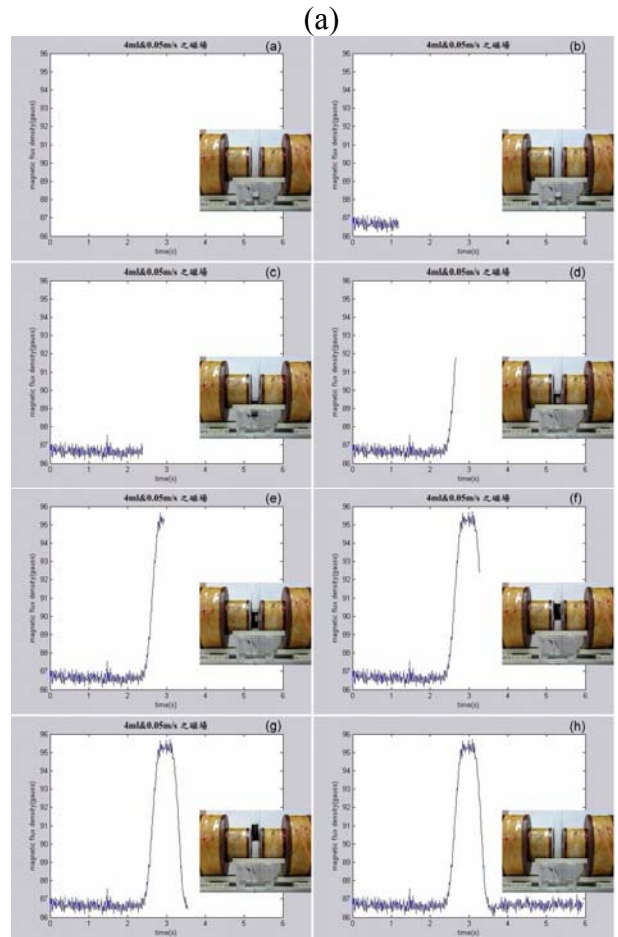


圖 2 磁場強度隨線圈裝置高度變化之分佈圖。



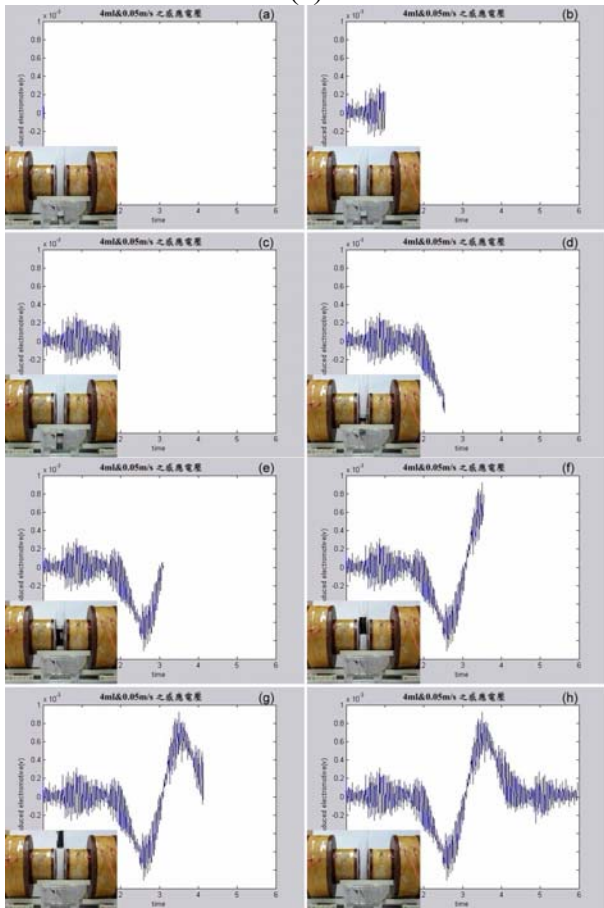
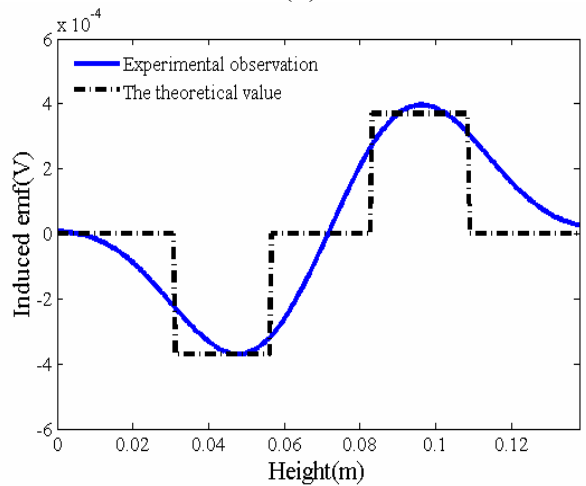
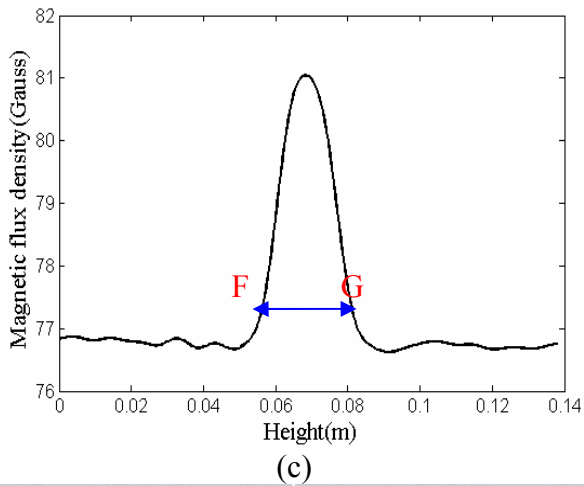
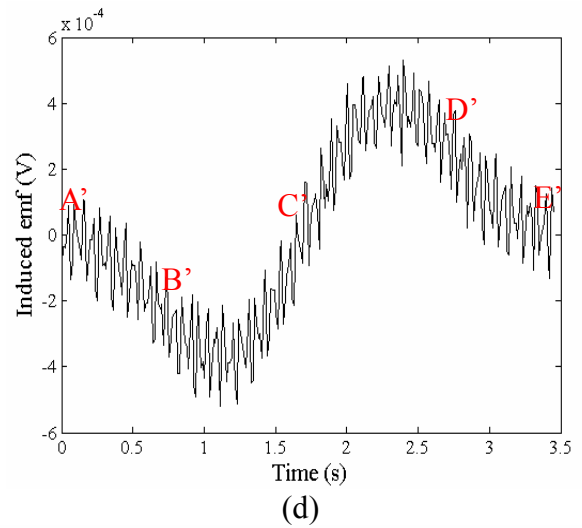
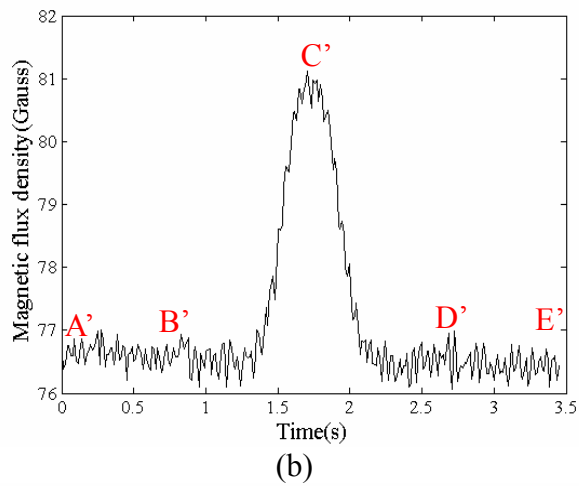
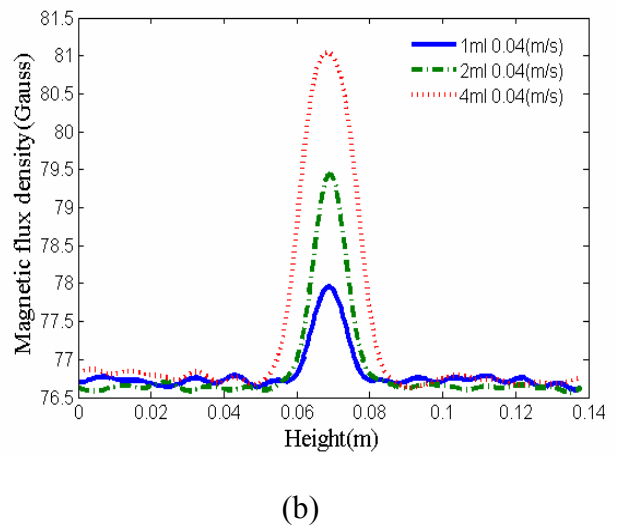


圖 3 磁液體體積 4 毫升且向上移動速度為 0.04 m/s 情形下之 (a) 原始磁通量密度訊號；(b) 以 FFT 方法過濾之磁通量密度訊號；(c) 原始感應電動勢訊號；和 (d) 以 FFT 方法過濾之感應電動勢訊號以及與理論值的比較。

(a)



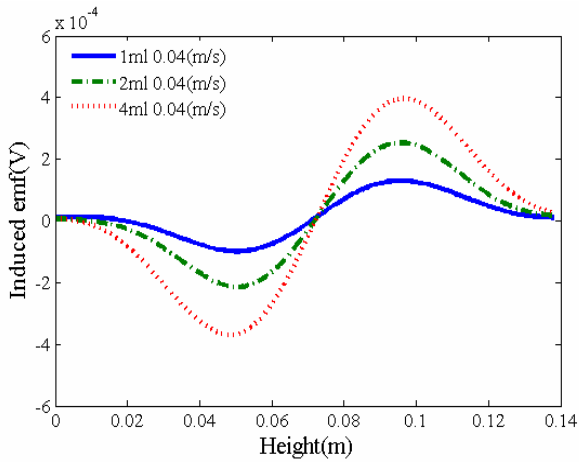


圖 4 固定相對速度不同磁液體體積下之 (a) 磁通量密度和 (b) 感應電動勢的比較

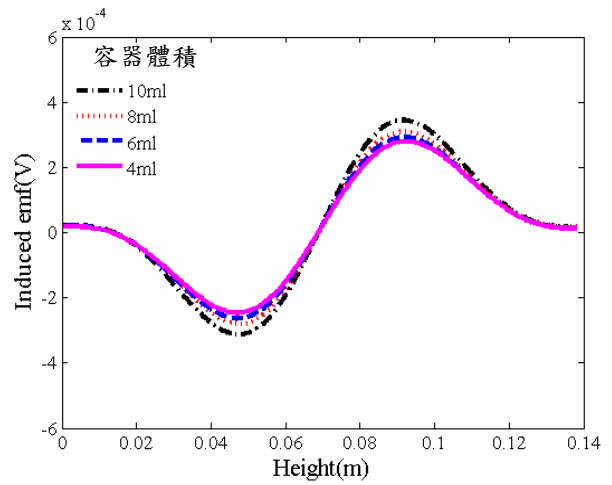
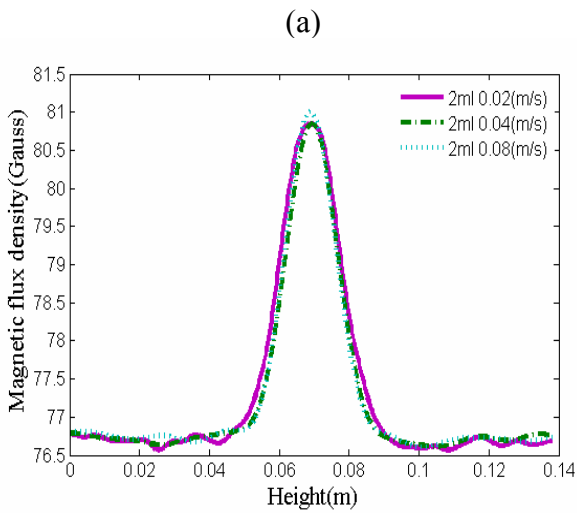


圖 6 不同體積容器對感應電動勢的影響



(b)

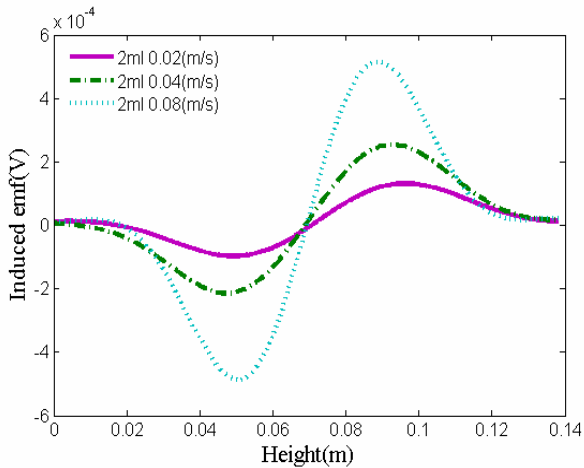


圖 5 固定磁液體體積不同相對速度下之 (a) 磁通量密度和 (b) 感應電動勢的比較

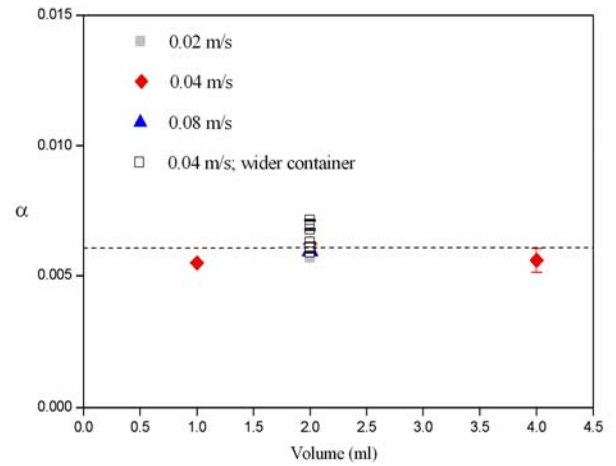


圖 7 不同相對速度、磁液體體積和不同容器體積下之單位體積修正因子 α 。本研究所得之 α 約為 0.006。

三、第二年度研究成果

1. 研究目的

磁液體可由磁生電可由先前成果中得知，而從磁性流體電能轉換量測之實驗也可得知，當速度越大或磁通量密度越大時，感應電動勢會增大，因此用磁液體來做電能轉換是可行的。在本研究中，將把磁液滴實際應用在流場實驗中，來觀察其液滴在實際管流內的型態及使用微小磁液滴是否能抓到產生的感應電壓訊號，並設計出能得到最好訊號之機制，且對量測到之感應電壓訊號做進一步分析。方法為底部放置永久磁鐵，上方

放置一組感應線圈，使產生一均勻磁場，故可直接量取流體狀態(如磁液體之體積、速度)，再利用不同大小的磁液滴在管內的快速移動來量取不同的電壓值，以及量取不同的磁場密度，若都能抓到這些訊號，就使用這些數據來驗證是否可套入法拉第定律中驗證。

2. 實驗量測

2-1 實驗裝置及說明

本實驗有使用到的裝置有激磁線圈(長)、激磁線圈組(兩側)、感應線圈組(中)、感應線圈組(小)、電子天秤、玻璃管、塑膠軟管、量杯、鐵棒、永久磁鐵、高斯計、探棒、資料擷取器、高速攝影機、磁性流體(EMG905)及電腦。其中使用的玻璃管外徑為 14mm、內徑為 11.7mm、長 250mm，激磁線圈(長)的外徑為 78mm、內徑為 14.5mm、長 89mm，有 3600 匝，激磁線圈組(兩側)的外徑為 138mm、內徑為 20mm、長 58mm，有 5280 匝，感應線圈組(中)的外徑為 78mm、內徑為 15mm、長 50mm，有 2160 匝，感應線圈組(小)的外徑為 40mm、內徑為 6mm、長 58mm，有 1200 匝，所使用的永久磁鐵(大)直徑為 40mm、厚度 3mm，永久磁鐵(小)直徑為 20mm、厚度 3mm。圖 8 為垂直管流的裝置示意圖，利用重力的關係，使磁液滴慢慢下落至磁場的吸引範圍，受到磁場吸引加速落下，可使液滴經過感應線圈時速度更快，更能抓到感應電動勢。管內混合流體的數據為甘油 33g 蒸餾水 8g，使用的裝置為激磁線圈(長)及感應線圈組(中)。

2-2 實驗步驟

實驗開始的前置作業為，先倒出 30g 甘油及 12g 蒸餾水到量杯內，之後步驟與水平管流相同，將混合液倒入玻璃管後再把玻璃管插入至底部線圈裡，並仔細調整兩邊的感應線圈和磁鐵到達平行，然後開啟高速攝影機，將攝影鏡頭調整到適當範圍，並檢查高速攝影機設定是否正確。為了確保實驗時所使用的磁場為正向磁場，實驗前先以高斯計探棒進行磁場的量測，接著輸入激磁線圈所需之電壓及電流至電源供應器中，但先不要輸出電流以免發生危險，連接資料擷取器和

高斯計於電腦，接著開啟資料擷取器及 Fluke DAQ 4.0，檢視步驟與水平管流相同。接著使用 1cc 之針管吸取磁液滴，方法與水平管流相同，注入時並保持液滴在正中心的位置，接著開啟資料擷取器及高速攝影機，並當液滴下落至離管口約 5 公分的距離時，將電源供應器電流輸出使下方線圈產生磁場，磁液滴被加速吸入後完成實驗。當單一實驗結束後，關閉電源供應器的電流輸出以免線圈過熱，如要繼續實驗，記下新的針管刻度，則重附上述步驟即可，如果當線圈溫度溫熱時，必須停止實驗，並等待線圈溫度冷卻至常溫，方可繼續進行。

當實驗全部結束後，將量測數值以 Excel 形式匯出，並且以 MATLAB 進行繪圖，並將影像跟訊號做同步處理以及後續分析訊號與速度動作。

因實驗裝置所造成誤差(來自於環境、儀器...等)，固使得感應電動勢之原始訊號有雜訊產生，如能將雜訊濾除，則能更有利於數據分析。本研究採用 Matlab 內建之快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)來消除雜訊。轉換後之圖形，經由 FFT 過濾後留下主要頻域，雖然刪除雜訊波後，感應電動勢會稍微變小，但訊號表現的比原訊號更平滑。

2-3 實驗結果與討論

影片截圖如圖 9，圖 10 則為當磁液滴為 0.15cc 時測量得到的感應電動勢，可以發現訊號成一個 sin 波，而下峰值比上峰值還要來得大，其原因為磁液滴在管子內的移動速度是加速度，所以速度會越來越快之關係，因此下峰處所產生之感應電壓會更大。圖 11 顯示為當磁液滴通過一顆感應線圈時，由探棒所量測出感應磁場，圖中之範例說明磁場產生之關係，圖中右方部份為感應磁場與時間之關係圖，其餘部分為磁液滴與線圈之關係圖。感應磁場的生成是由線圈磁場以及磁流體導磁率所造成，在圖 11(A)及圖 11(B)所受的磁場大小單純只受永久磁鐵所影響，圖 11(C)為磁液滴通過探棒時，由圖中可以發現，當磁液滴未與探棒相接觸時，磁場亦不會受改變。而當磁液滴正進入感應線圈，此時磁場開始變化，其變化原因是磁通量(Φ)

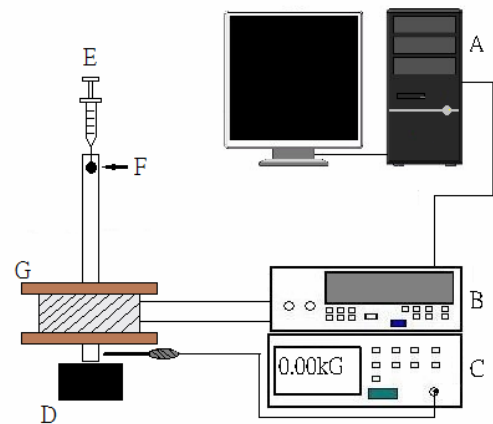
受到改變，且磁通量包含變數為面積(A)與磁通量密度(B)，因磁力線分布為一單方向性(垂直線圈方向)，所以當磁液滴通過探棒時，磁液滴會受線圈磁場影響，出現最大值，此時磁液滴位置恰好與磁棒平行，表示磁液滴對磁場之影響最大(磁流體感磁率(M)為最大)。當磁液滴離開探棒時，磁液滴之感磁率已經不受線圈磁場影響，所以磁場變成由永久磁鐵的磁場主導。

感應電壓是由磁場之不穩定所產生，造成磁場不穩定是因為感應線圈與磁性流體有相對運動所造成。圖 12 為當磁液滴(0.16cc)通過一組永久磁鐵時，所量測到的感應電動勢，圖中右邊部份為感應電壓與時間之關係圖，其餘部分為磁液滴與線圈之關係圖。如圖 12(A)所示，當磁性液滴未進入感應線圈時，感應線圈與磁流體並無相對運動，所以電壓持續維持在零左右，這可證明法拉第定律中(dΦ/dt)項，表示此段時間為穩態之狀態，永久磁鐵之磁力線為垂直線圈側面，且磁力線較均勻，所以當磁液滴未進入感應線圈時，磁場亦不會變化。圖 12(B)顯示當磁液滴剛進入感應線圈，就開始微微的產生感應電壓，圖 12(C)等到液滴進入感應線圈中心時，先產生了向上突起的感應電動勢，接著圖 12(D)當液滴經過感應線圈後半段時，產生了向下突起之感應電動勢，而下峰值比上峰值高，其原因為液滴移動速度為加速度，因此通過感應線圈下半部時速度較快，電壓訊號也較大。當磁性液滴離開感應線圈時，感應線圈與磁液滴並無相對運動，所以電壓持續維持在零左右。

在先前中有提及感應電壓產生方法，在這討論當不同容積磁液滴在相同實驗數據下所產生之感應電壓比較。圖 13 之實驗條件為在使用旁邊為永久磁鐵及下方線圈為 120V、3A 時，分別用 0.1cc、0.14cc 及 0.16cc 之磁液滴來量取感應電壓，圖 3-21 之實驗條件為在使用底部為永久磁鐵及將感應線圈橫放時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取感應電壓，由圖中可以看出在相同實驗數據下，以不同的量時，會產生不相同的感應電壓，磁液滴量越大，則磁通量密度越大而產生更大的感應電壓。圖 14 之實驗

條件為在使用下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別使用不同體積之磁液滴量取的感應電壓，經由多組的實驗比較後可發現，當液滴量越大時，則感應電壓也越大。而圖 15 為使用底部為永久磁鐵及將感應線圈橫放之機制量測出多組的感應電壓誤差圖。

在這討論當不同大小之磁場在相同實驗數據下所產生之感應電壓比較。圖 16 之實驗條件為在使用底部為永久磁鐵及將感應線圈橫放時，分別使用數目不同之磁鐵來產生 0.5KG、1.5KG、3KG 的磁場來量取感應電壓。由圖中可以看出在相同實驗數據下，以不同的磁場時，會產生不同的感應電壓，所給予的磁場越大，則磁通量密度越大而產生更大的感應電動勢。



- A: PC
- B: Data Logger
- C: Gauss Meter
- D: Magnet
- E: Needle
- F: Magnetic Droplet
- G: Induction Coil

圖 8 垂直管流之裝置示意圖(感應線圈橫放)

容器體積 (cm ³)	高度 (mm)	截面積 (mm ²)
10	6.30	319.51
8	10.76	185.82
6	15.57	128.43
4	16.56	120.74

表 1 磁液體 2 毫升加入不同容器後之高度以及與磁場垂直之截面積大小

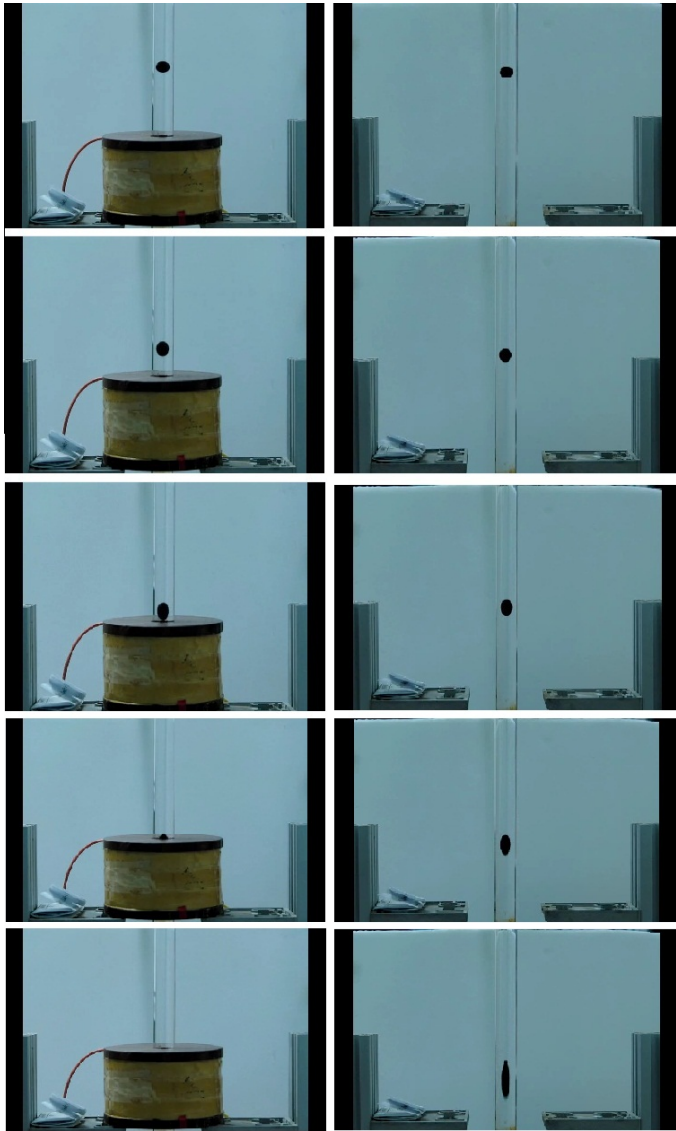


圖 9 將感應線圈橫放之影片截圖

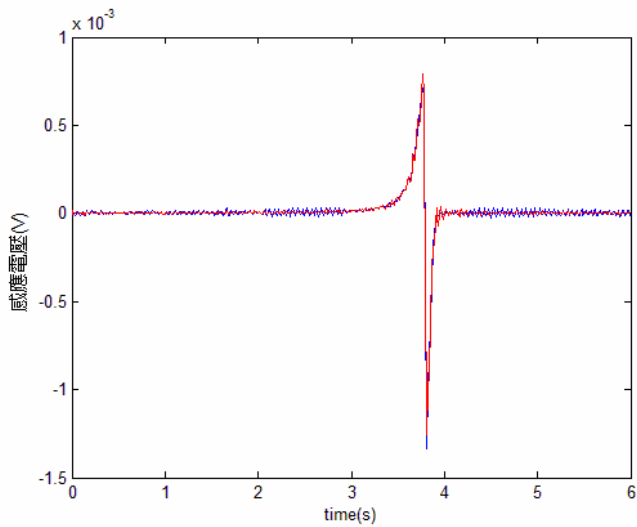


圖 10 磁流體為 0.19CC 時之原始訊號與利用 FFT 過濾後之訊號

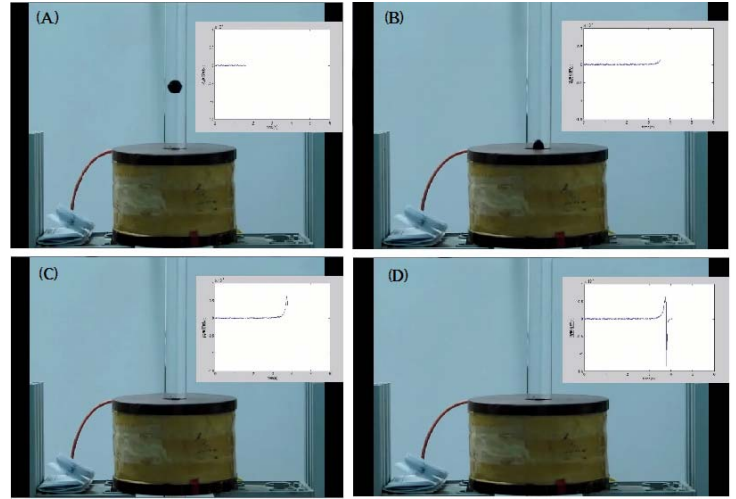


圖 11 當磁液滴(0.21cc)通過一顆感應線圈時，由探棒所量測出感應磁場

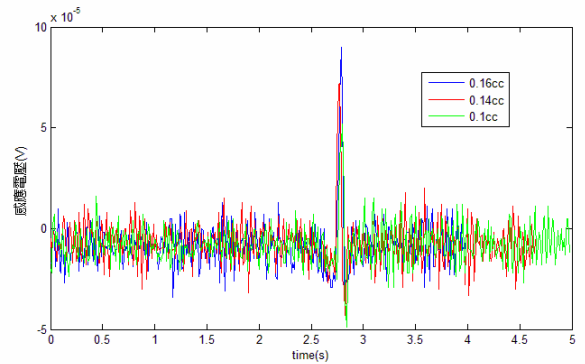


圖 12 當磁液滴(0.16cc)通過一顆感應線圈時，所量測到的感應電動勢

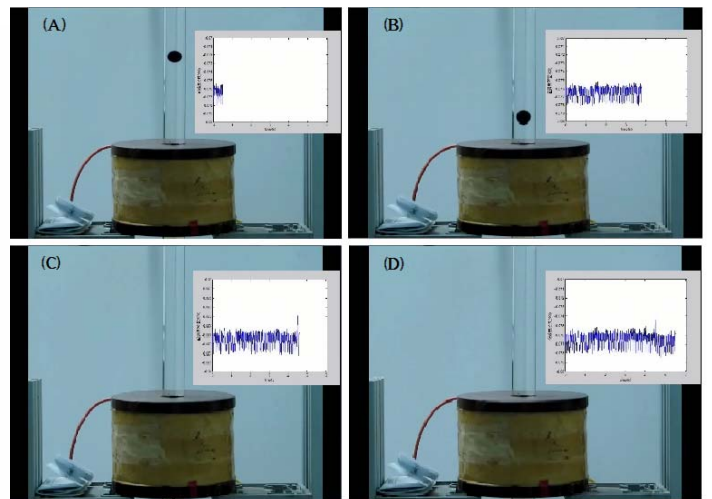


圖 13 為在使用旁邊為永久磁鐵及下方線圈為 120V、3A 時，分別用 0.1cc、0.14cc 及 0.16cc 之磁液滴來量取感應電壓

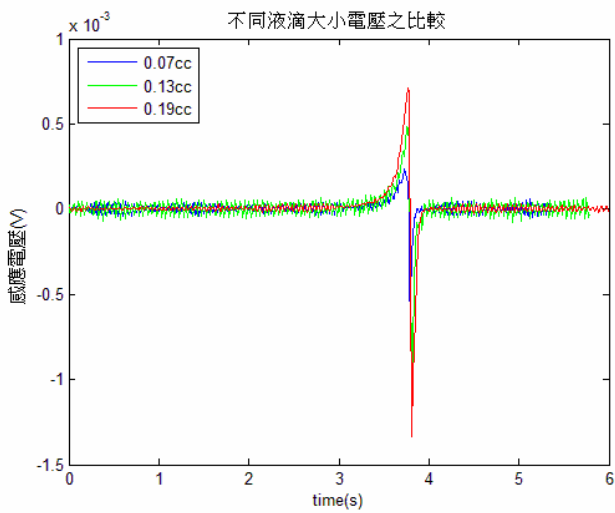


圖 14 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取的感應電壓

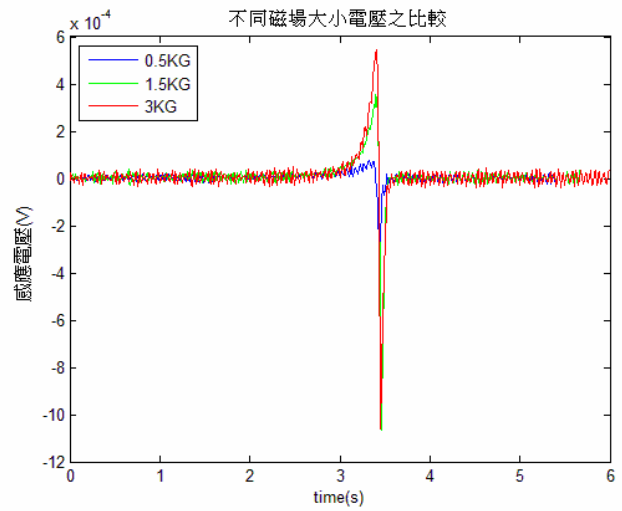
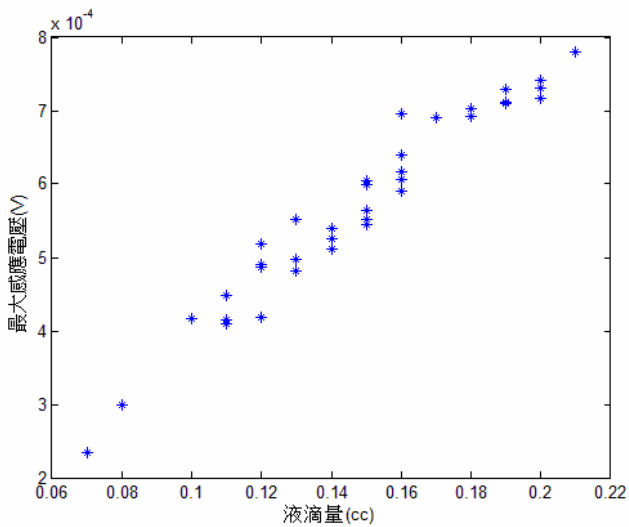


圖 16 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別使用數目不同之磁鐵來產生 0.5KG、1.5KG、3KG 的磁場來量取感應電壓

圖 15 為下方為永久磁鐵及橫放感應線圈



時，分別用不同體積之磁液滴來量取的電壓

3. 數值模擬

本研究嘗試採用 COMSOL 軟體針對文獻進行模擬計算，若能與文獻之實驗量測值一致，則可以再延伸至目前之管流實驗。下圖 17、18、19 為針對不同體積之磁流體於不同底截面積時之磁場分佈。一般而言較多量之磁流體於較大截面積之容器可產生區域性較強之磁場強度。未來將搭配此模擬成果更深入理論探討磁液滴大小與形狀對電動勢之影響。

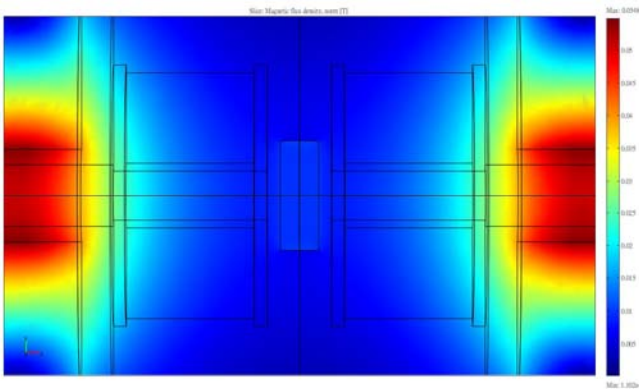


圖17 4ml磁流體所呈現之磁場分佈。

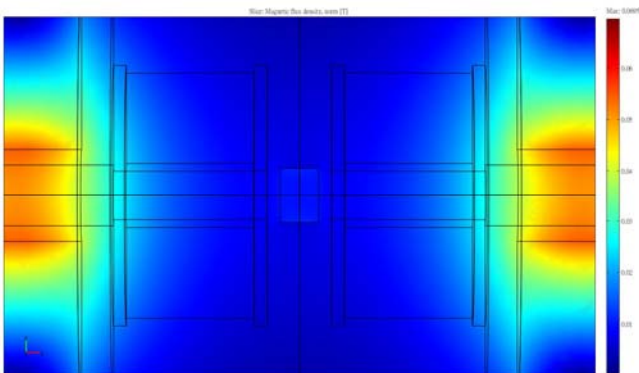


圖18 2ml磁流體所呈現之磁場分佈。

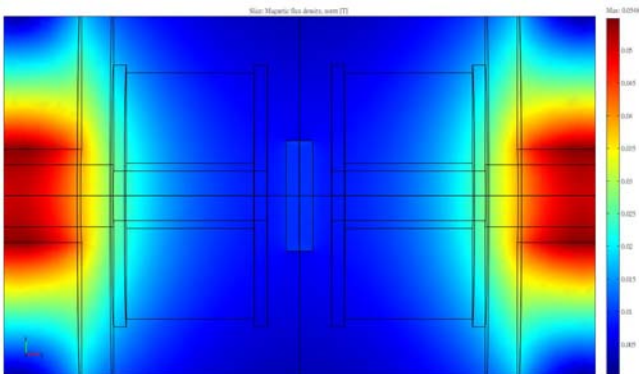


圖19 2ml磁流體於較小截面積容器所呈現之磁場分佈。

四、第三年度研究成果

1. 實驗量測理論基礎與裝置

1.1 實驗量測之理論基礎

本年度結合量測磁性流體之對流熱傳係數與電磁轉換之訊號截取，實驗設備包括磁性流體(油基及水基)、工作流體(純水及白蠟油)、冷卻循環水槽、隔膜式幫浦、軟式矽膠電熱片、鋁圓管、K-type熱電耦(一般型及液用型)、資料擷取器、交流電電源供應器、激磁線圈、感應線圈、個人電腦，將本研究之實驗設備簡單繪製成實驗示意圖，如圖2所示，先將流體放置於冷卻循環水槽中達到預設之冷卻溫度，流體再藉由隔膜式幫浦產生強制對流作為驅動，當流體通過加熱片(熱端)時使流體加熱，搭配多組熱電耦測量熱端管壁不同位置之溫度與流體流經熱端之出入口溫度，其熱電耦連結資料擷取器，所量測之溫度值再傳至電腦做紀錄，最後再進行計算與分析。

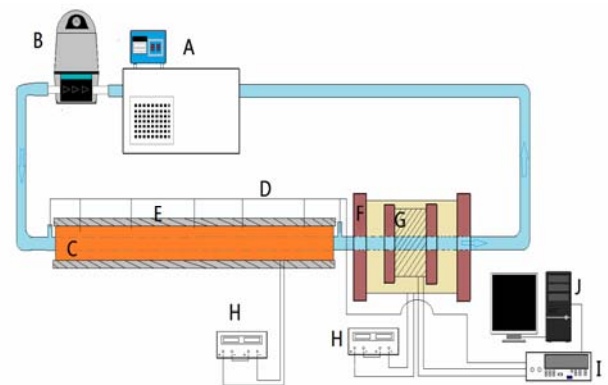


圖 2 量測磁性流體之奈米熱傳與訊號轉換裝置示意圖，A 卻循環水槽；B 隔膜式幫浦；C 軟式矽膠加熱片；D 熱電耦；E 玻璃纖維絕熱棉；F 激磁線圈；G 感應線圈；H 交流電電源供應器；I 資料擷取器；J 個人電腦。

另外，輸入一電壓為 40V、頻率為 1Hz 之交流電於激磁線圈，會使激磁線圈產生一時變磁場，當磁性流體通過該磁場時會使磁性流體產生磁化，造成磁場內的磁通量密度之大小產生變化，進而使感應線圈產生一頻率為 1Hz 的感應訊號(如圖 3)，再將其感應訊號傳至資料擷取器並記錄於電腦中，最後所紀錄之感應電壓訊號以 Matlab 進行計算與繪圖，以利作為分析。

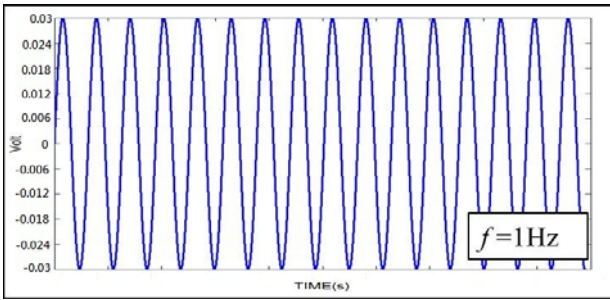


圖 3 感應線圈所產生之感應訊號，其頻率為 1Hz。

本實驗中所使用的磁性流體為型號 APG830 油基磁性流體以及 MGF 水基磁性流體，性質如表 1 所示。作為奈米熱傳方面的磁性流體使用的是 MGF 水基磁性流體，而作為訊號擷取的磁性流體為 APG830 油基磁性流體。本實驗為調配不同體積分率的磁性流體，方法為混合磁性流體及工作流體(調配油基磁性流體之工作流體為白蠟油，調配水基磁性流體之工作流體為純水)調配至所需之體積分率的磁性流體，再放置於超音波震盪器震盪約 30 分鐘使磁性流體與工作流體能夠均勻混和。針對不同體積分率之磁性流體，本文將磁性流體之濃度以體積分率(Φ)來表示，而體積分率(Φ)定義如下:磁性流體之體積分率(Φ)=磁性流體體積/(磁性流體體積與工作流體體積之和)。在本文中磁性流體之體積分率(Φ)定義與文獻中不全然相同，文獻中的體積分率定義為:奈米粒子體積/奈米粒子體積與基底流體體積之和。

表 1 磁性流體性質

磁性流體種類	MGF	APG830
密度 ρ	1.28 g/ml	1.036 g/ml
黏滯度 μ	35.4 cp	96.8 cp
飽和磁化率 M_s	22Oe	217Oe

本實驗加熱之裝置採用軟式矽膠電熱片，其輸入電壓為 220V 交流電，最大功率為 150W，將軟式加電熱片均勻包覆鋁圓管，再以玻璃纖維棉包覆軟式電熱片作為與外界環境之絕熱層，以確保加熱片能完全地將熱量傳至流體，其中鋁圓管的長度 $L=580\text{mm}$ ，內徑 $D=10\text{mm}$ 、厚度為 3.0mm;將測量管壁溫度的熱電耦埋設於管壁上，不同編號之熱電

耦與其埋設之位置如圖 4 所示。冷卻循環水槽之冷卻功率為 1/3HP，溫度控制範圍為 $-20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。本實驗使用隔膜式幫浦作為流體之驅動裝置，其型號為 Liquiport 300，流量控制範圍為 0.5~3.0 L/min。

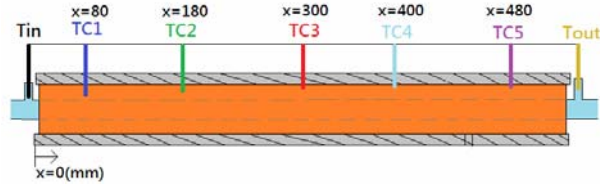


圖 4 熱電耦埋設在鋁管壁上的位置圖。

感應電壓訊號量測之裝置為一激磁線圈和一感應線圈，其中激磁線圈的內徑為 55mm、長度為 150mm、匝數為 6400 匝，感應線圈的內徑為 19mm、長度為 40mm、匝數為 300 匝，磁場由交流電電源供應器將電流輸入至激磁線圈產生。

2.理論背景方程式

2.2.1 奈米熱傳

在 Dongsheng Wen 等學者[24]的文獻中，可得知流動中流體的熱傳表現可以用對流熱傳係數 h (convective heat transfer coefficient)以及紐森數 Nu (Nusselt number)來定義，公式如下:

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_f(x)} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{h(x) \square D}{k} \quad (2)$$

其中 h 、 Nu 、 T_w 、 T_f 均為位置 x 的函數， x 代表離加熱入口端的距離， q'' 為熱通量， T_w 和 T_f 分別為管壁溫度及流體溫度，管壁溫度 T_w 可由熱電耦測量之， D 為圓管之內徑， k 為流體的熱傳導係數，而流體溫度 T_f 分布可由熱力學第一定律能量守恆的觀念推導得知，公式如下所示:

$$T_f(x) = T_{in} + \frac{Q}{\rho \square C_p \square U \square A} \square \frac{x}{L} \quad (3)$$

其中 Q 為加熱器熱功率， C_p 為流體的等壓比熱， ρ 為流體的密度， U 為流體之平均流速， A 為圓管的截面積， L 為加熱端的全長，上式公式的假設建立在 Q 無熱量損失，因此熱功率 Q 可以藉由量測 T_{in} 與 T_{out} 的溫度差值進行反推算出 Q 並與理論計算比對。

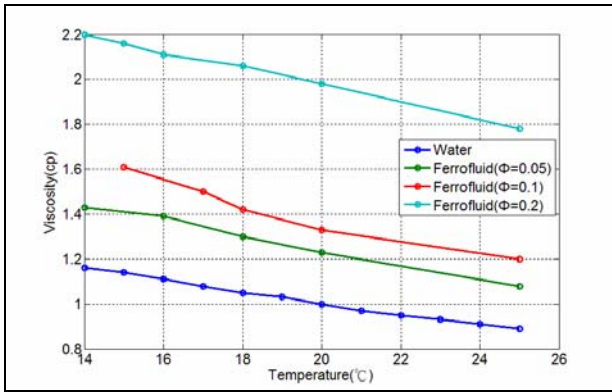


圖 5 溫度對磁性流體黏滯係數的影響。

欲比較 Nu 與雷諾數 Re(Reynolds number) 的關係，計算 Re 如公式(4)下，其中 μ 為流體的黏滯係數(viscosity coefficient)，而溫度對流體的黏滯係數 μ 影響很大，所以溫度採用的是 T_{in} 與 T_{out} 之平均溫度，不同體積分率的磁性流體其黏滯係數 μ 對溫度的變化，如圖 5 所示。

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (4)$$

而根據 Maryamalsadat Lajvardi 學者[25] 等人的文獻中提到，將所計算的結果將與 Shah equation 做比較，此 Shah equation 為在層流中且邊界條件為固定熱通量、流場為完全發展流的形況下，其中 Shah equation 方程式如下：

$$Nu = \begin{cases} 1.953(Re Pr \frac{D}{x})^{1/3} & (Re Pr \frac{D}{x}) \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{x} & (Re Pr \frac{D}{x}) < 33.3 \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 訊號擷取

法拉第電磁感應定律為電磁學中之基本定律，公式如下：

$$V = -N \left(\frac{d\Phi_m}{dt} \right) \quad (6)$$

其中 V 為感應電壓； N 為感應線圈匝數； Φ_m 為磁通量； t 為時間，磁通量改變情況如下(磁場間本身會隨時間改變、磁場本身有相對運動、以及磁場間有一介質，其介質會隨磁場而改變磁化強度...等)。公式中“ $-$ ”代表方向性，電動勢的方向(公式中的負號)由冷次定律提供。

其中，法拉第電磁感應定律中之磁通量可以寫成下式：

$$\Phi_m = \int B \cdot dA_i \quad (7)$$

其中， B 、 A_i 分別代表磁通量密度及與磁場垂直之感應面積大小。由以上公式可看出，磁通量是由通過面積與垂直之磁場通量所得，並且可由磁場密度及面積所求得。將(2)式轉換圓柱座標，以利計算，如下式表示：

$$\Phi_m = \int_0^R B(2\pi r) dr \quad (8)$$

其中為 r 受磁場感應面積之半徑，此公式可以說明當感測物形狀為圓柱形時，將可利用此方式計算。

而其中磁通量密度是由磁場強度及磁性流體之磁化強度所得，以下式表示：

$$B = \mu_0(H + M) \quad (9)$$

上述式子表示當磁性流體通過磁場時，磁場強度為一定值($H=\text{constant}$)，但磁性流體之磁化強度會隨磁性流體的體積分率變化而有改變。若是磁性流體流經一均勻磁場，則磁通量密度可以修正為：

$$B = \mu_0(H + \Phi M) \quad (10)$$

B 為磁性流體的磁通量密度， M 為磁性流體($\Phi=1$)的磁化強度， Φ 則為磁性流體的體積分率。而當磁場強度 H 為定值時，磁性流體的磁化強度 M 僅為溫度 T 的函數： $M(T)$ [1]，如圖 6 所示，溫度增加時磁性流體的磁化強度會隨之降低。

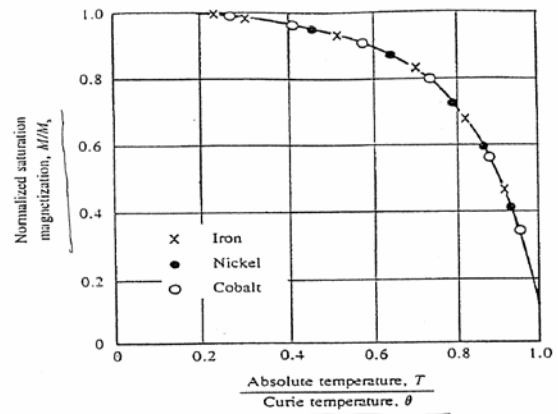


圖 6 磁性流體的磁化強度與溫度之曲線圖。

將(8)、(10)兩式帶入(6)式，得(11)式，其中(11)式可以表示，當改變磁性流體的體積分率或溫度，皆會改變感應電動的大小。

$$V(\Phi, T) = -N \frac{d}{dt} \int_0^R \{ \mu_0 [H + \Phi M(T)] \} 2\pi r dr \quad (11)$$

3. 實驗結果

本研究主要目的在於研究磁性流體在圓管流場中、層流條件底下的熱傳表現，分別探討磁性流體在不同的體積分率以及 Re 的熱傳行為，再利用參考文獻中的經驗公式 Shah equation 與實驗結果作比較，建立磁性流體在不同體積分率下 Re 與 Nu 之關係。此外，利用磁性流體的磁導性，以不同的體積分率與溫度為變數的情況下，量測出相對應的感應電壓，並對量測出之感應電壓訊號做進一步的分析與比較。

磁流體之熱傳行為

3.1.1 比較不同 Re 下的熱傳情形

首先比較四組實驗數據，比較流體 ($\Phi=0$ 、 $\Phi=0.05$ 、 $\Phi=0.1$ 與 $\Phi=0.2$) 在固定的體積分率，不同的 Re 情況下熱傳情形。

圖 7 為純水 ($\Phi=0$) 在不同位置下的熱傳係數，由圖可以得知當 $Re=931$ ，經計算後不同位置的熱傳係數之分布，其中 $TC1(x=80mm)$ 的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數 (h) 遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，在理論上當流體流動時能將加熱片的熱量往後端帶走，越後端的管壁溫度應為較高，而 $TC5(x=480mm)$ 位置離圓管入口處最遠，其管壁溫度應為最高，但實際測得的管壁溫度大小為 $TC3(x=300mm) > TC4(x=400mm) > TC5$ ，為不合理之現象，此不合理現象猜測其發生的原因可能為本實驗在加熱片外層包覆隔熱層時，僅有在圓管徑向絕熱，圓管前後兩端 (圓管軸向) 均無包覆隔熱層，導致圓管軸向有熱量散失，以致於管壁本身產生軸向之溫度梯度，而 $TC3$ 位在圓管的最中間處，在管中無流體時，比較其他位置之溫度， $TC3$ 溫度為最大，因此當在低 Re 時流體無法有效的將熱量帶往至後端，導致在低 Re 時 $TC3$ 管壁溫度為最高的情況，進而在計算後得到 $TC3$ 位置的熱傳係數為最低， $TC4$ 與 $TC5$ 反而有增加的趨勢，雖然軸方向熱損失會導致 $TC3$ 之熱傳係數為最低，但此原因對於整體的熱傳係數計算的誤差則是非常小，且此現象僅在低 Re 下時才會發生。接著若將流場調至 $Re=1395$ ， $TC1$ 的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，熱

傳係數也亦漸平緩，在位置 $TC1$ 與 $TC2(x=180mm)$ 的熱傳係數有明顯增加的情況而位置 $TC3$ 、 $TC4$ 、 $TC5$ 有些微的增加但增加的大小較不明顯，所以從此可看出當流速增加時加熱前端的熱傳係數會有較顯著的增加。流速增大為 $Re=1861$ ，因流場速度更快，流體熱量的傳遞越明顯，因 $TC1$ 的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，熱傳係數也亦漸平緩，且其熱傳係數也因流速增加而有明顯增加的趨勢，比較 $TC1 \sim TC5$ 五個位置在不同 Re 的熱傳係數，當 Re 增加時，離入口處越近之位置的熱傳係數增加的幅度也最大。

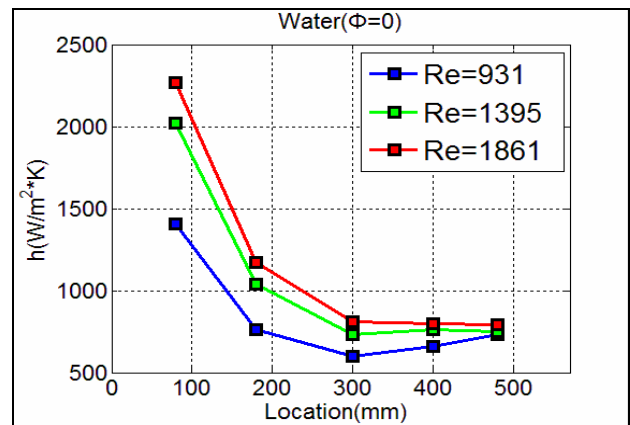


圖 7 純水 ($\Phi=0$) 在不同位置下的熱傳係數。

接著嘗試添加磁性流體於純水中，形成流體中具有奈米粒子的奈米流體，討論其磁性流體的熱傳效果與 Re 之關係。圖 8 為磁性流體 ($\Phi=0.05$) 在不同位置下的熱傳係數，同樣的 $TC1$ 位置的熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，但如同前述因軸向熱損失之因素，在低 Re 時其計算得到 $TC3$ 位置的熱傳係數為最低， $TC4$ 與 $TC5$ 反而有增加的趨勢。隨著 Re 的提高，各點的熱傳效果也愈好，熱傳係數隨著離入口端越遠使得熱傳效果越差，越往後端熱傳係數也亦漸平緩。

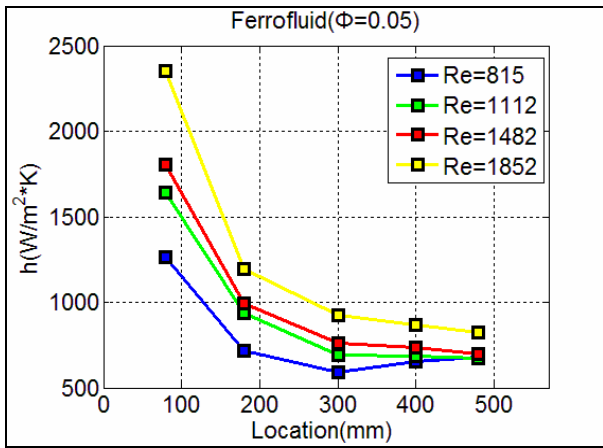


圖 8 磁性流體($\Phi=0.05$)在不同位置下的熱傳係數。

當磁性流體的體積分率提高至 $\Phi=0.1$ ，磁性流體($\Phi=0.1$)在不同位置下的熱傳係數如圖 9 所示，在 $Re=677$ 時因前述有軸向熱損失之因素，TC3 位置的熱傳係數為最低，隨者 Re 增加時此情況也會消失，而 Re 約為 1015 時，這時流場之流速剛好夠大，已足夠將熱量帶往後段區，使得溫度不會像低 $Re(Re=677)$ 時後端位置的熱傳係數反而有增加的情況；熱傳係數隨離入口端位置的增加而降低，且有逐漸平緩的趨勢。當 Re 增加時，各位置的熱傳係數亦會跟著增加，尤其越靠近入口端其增加之幅度也越大。

當 $Re=2028$ ，TC4 與 TC5 位置之熱傳係數反而又比 TC3 位置的熱傳係數來的大，但此情況與低 $Re(Re=677)$ 的狀況不同，在此判斷此情形應該為 Re 過大，在圓管後段形成邊界層分離而在流場中發生紊流的情況，而在圓管越後端的紊流現象越顯著，其對流熱傳亦會越強，所以使 TC4 與 TC5 的熱傳係數有提升的現象。

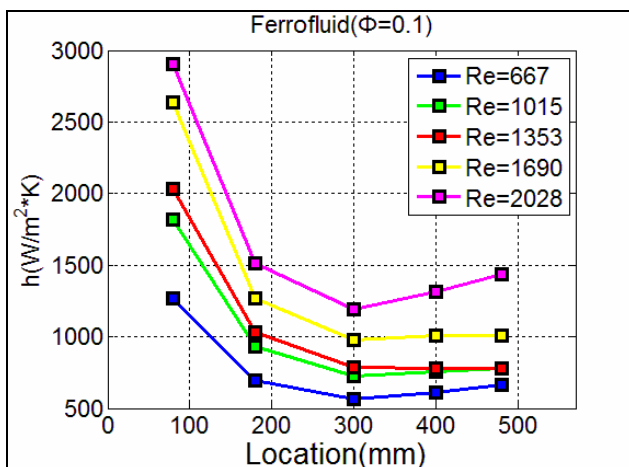


圖 9 磁性流體($\Phi=0.1$)在不同位置下的熱傳係數。

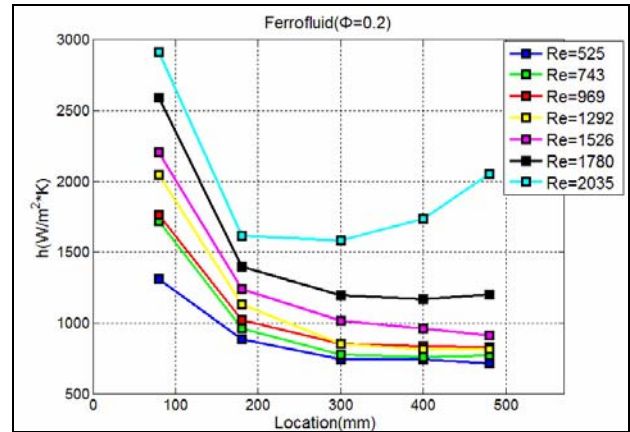


圖 10 磁性流體($\Phi=0.2$)在不同位置下的熱傳係數。

圖 10 為磁性流體($\Phi=0.2$)在不同位置下的熱傳係數，在高體積分率的磁性流體因熱傳性質較良好，熱傳效應大過於先前所提及的有軸向熱量損失， $Re=525$ 時，不同位置的熱傳係數，因上述的情形，此熱傳係數就有很漂亮的趨勢，離入口端越遠，熱傳係數則越下降而且逐漸平緩。當 Re 的增加時，各點的管壁溫度也隨之下降；而比較管壁的溫度，離入口端越遠，因熱量隨流體而往後帶以至於溫度越高；另外，不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨離入口端位置的增加而降低，且有逐漸平緩的趨勢。

若當 Re 提高到 2035 時，因為 Re 過大在流場中已發生邊界層分離的情況，所以在後段形成紊流之現象，因紊流中的能量傳遞的情況較好，所以使 TC4 與 TC5 的熱傳係數反而比 TC2 及 TC3 的熱傳係數還高。

以下對於此章節做一小結論，當 Re 增加時會使各位置的對流熱傳係數 h 皆有所提升，越靠近入口端對流熱傳係數增加的幅度也會越明顯，另外，當 Re 約大於 2000 時，因紊流現象導致後端熱傳強度增加。

3.1.2 比較不同體積分率下的熱傳情形

本實驗欲比較在相同的 Re 下，不同體積分率的磁性流體對於熱傳係數影響之差異性，因實際上本實驗無法非常精準控制不同體積分率的磁性流體均在於相同 Re 之下，因此將比較 Re 相近的條件下，不同體積分率的磁性流體對熱傳係數的差異性。

首先將所有的數據互相比較下挑出兩組來做比較，一組是 Re 約為 1350 下不同體積分率之熱傳係數的比較，一組是 Re 約為 1850 下不同體積分率之熱傳係數的比較。圖 11 比較 $Re \approx 1350$ ，磁性流體不同體積分率對熱傳係數的差異性，雖然磁性流體 $\Phi=0.2$ 的 Re 較小，但是依舊可以看出增加磁性流體的體積分率，能使熱傳性質有效的提升。圖 12 比較 $Re \approx 1850$ 磁性流體不同體積分率對熱傳係數的差異性：分別比較純水($Re=1861$)、磁性流體 $\Phi=0.05$ ($Re=1852$)、磁性流體 $\Phi=0.2$ ($Re=1780$)；此三個數據的 Re 更為接近，更能看出其差異性，磁性流體($\Phi=0.2$)在各位置的熱傳係數有很明顯的差異，在相近的 Re 之下，增加磁性流體的粒子濃度，能使熱傳性質有效的提升。

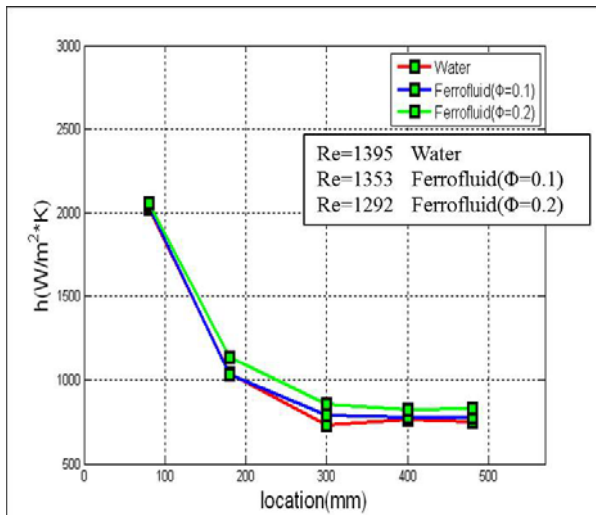


圖 11 $Re \approx 1350$ ，磁性流體不同體積分率的熱傳係數之比較。

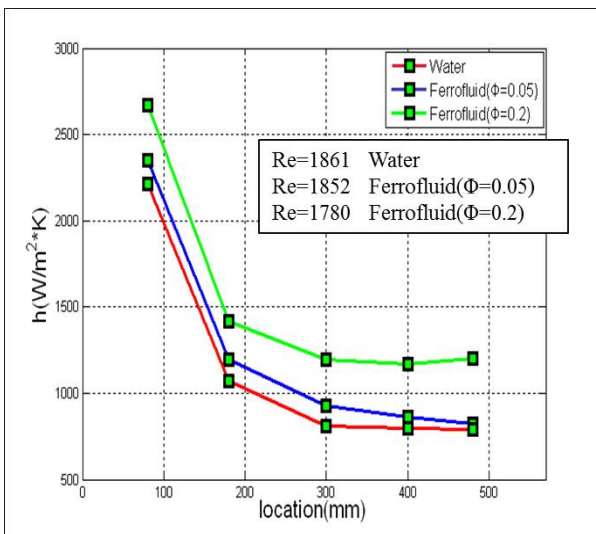


圖 12 $Re \approx 1850$ ，磁性流體不同體積分率的熱傳係數之比較。

傳係數之比較。

3.1.3 磁性流體的平均 Nu 與 Re 的關係圖

為了更了解各參數下熱傳性質的變化，將實驗的數據做無因次化建立磁性流體平均 Nu 與 Re 的關係圖，將各個位置的 Nu 作為平均，以平均 Nu 作為一個數據之熱傳強度的參考，並且將實驗結果與文獻中前人的經驗公式 Shah equation 做比較。圖 13 為平均 Nu 與 Re 的關係圖，其中藍色曲線代表是利用 Shah equation 計算純水平均 Nu 之曲線，綠色曲線為實驗中純水的平均 Nu 之曲線，由此圖可以觀察到實驗中純水的熱傳曲線以及 Shah 方程式在 $Re=931$ 時非常符合，在 $Re=1395$ 誤差約 4.1% 左右，在 $Re=1861$ 誤差約 8% 左右，此誤差的來源是本實驗在流場中並不為完全發展流，在入口端處邊界層厚度隨著位置的增加而變厚，而 Shah equation 為在完全發展流的狀態下，所以實驗中當 Re 提升時會使入口區(entrance region)長度增加，因邊界層厚度成長較慢而使熱端前端的熱傳強度增加，以至於當 Re 增加時實驗數據與 Shah equation 的誤差值逐漸變大，若能改善實驗裝置使流場均為完全發展流時，實驗數據則會與 Shah equation 非常符合。

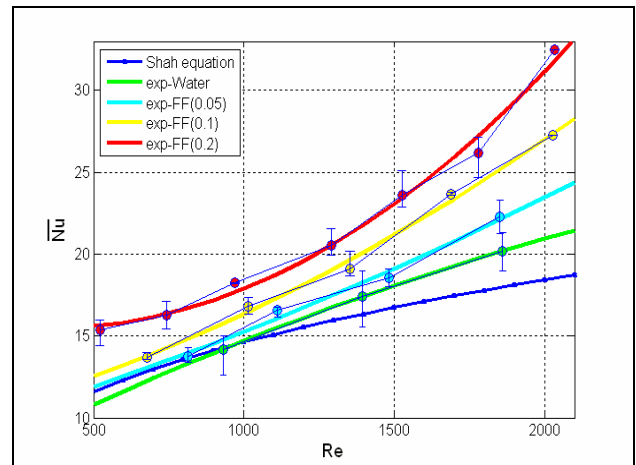


圖 13 與文獻中 Shah equation 做比較之磁性流體平均 Nu 與 Re 的關係圖。

而比較實驗中純水的平均 Nu 以及實驗中磁性流體的平均 Nu，磁性流體($\Phi=0.05$)之平均 Nu 較於純水增加約 5.5%，而磁性流體($\Phi=0.1$)之平均 Nu 較增加約 15.1%，而磁性流體($\Phi=0.2$)之平均 Nu 較於純水增加約 27.2%

%，因此可以知道添加更多的奈米粒子於流體之中或是提高流體的 Re，對於流體的熱傳性質皆有所提升。

磁性流體之訊號截取

3-2-1 以體積分率為變數之感應電壓比較

探討體積分率為變數之感應電壓比較，量測磁性流體在不同體積分率時所產生的感應電壓之大小，圖 14 中比較 APG830 磁性流體在 $\Phi=0$ 和 $\Phi=0.2$ 各產生的感應電壓，左側振幅較小為 $\Phi=0$ 之感應電壓而右側振幅較大為 $\Phi=0.2$ 之感應電壓，從此可以看出 $\Phi=0.2$ 所產生的感應電壓大小較大，將 $\Phi=0$ 與 $\Phi=0.2$ 個別的感應電壓大小計算出，其感應電壓大小的比值約為 1.08，換言之當增加磁性流體的體積分率為 $\Phi=0.2$ 時，所增加的感應電壓大小約為 8%。而圖 15 比較 APG830 磁性流體在 $\Phi=1$ 和 $\Phi=0$ 各產生的感應電壓，左側振幅較大為 $\Phi=1$ 之感應電壓而右側振幅較小為 $\Phi=0$ 之感應電壓，其最大平均感應電壓的比值約為 1.40，增加磁性流體的體積分率為 $\Phi=1$ 時，所增加的感應電壓大小約為 40%。比較圖 14 與圖 15 所計算出來的感應電壓大小值，將不同體積分率的磁性流體所產生的感應電壓大小與無磁性流體($\Phi=0$)所產生的感應電壓大小取其差值所得到的感應電壓差，發現其感應電壓差與磁性流體的體積分率呈線性之關係，此結果與文獻[20]互相符合，也證實本實驗確實可以精準的量取磁性流體的體積分率與所產生的感應電壓之關係。

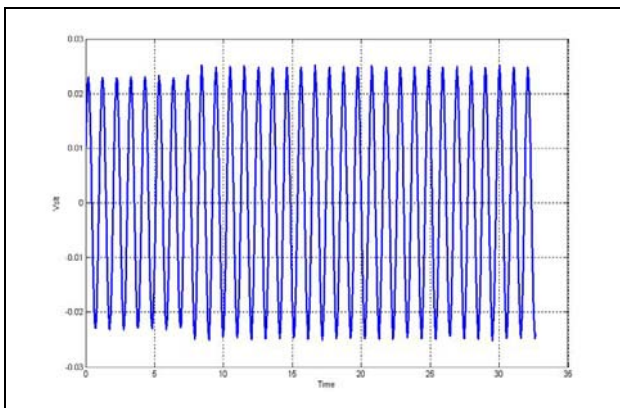


圖 14 APG830 在 $\Phi=0$ 和 $\Phi=0.2$ 的感應電壓之比較。

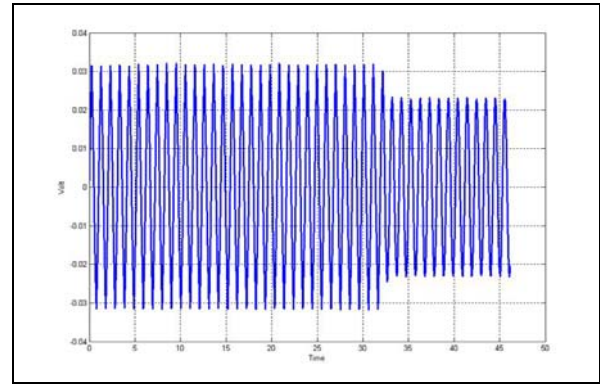


圖 15 APG830 在 $\Phi=1$ 和 $\Phi=0$ 的感應電壓之比較。

3-2-2 以溫度為變數之感應電壓比較

接者比較磁性流體 $\Phi=0.1$ 與 $\Phi=0.2$ 在不同的溫度下所量取感應電壓大小之實驗數據繪製成圖 16，圖 16 為不同體積分率下所量測的感應電壓與溫度之關係圖，由此圖可以明顯的看出提高溫度會使感應電壓大小下降之外，在此可以看出 $\Phi=0.2$ 的下降的趨勢比 $\Phi=0.1$ 還要明顯；在磁性流體之體積分率為 $\Phi=0.2$ 時，溫度從 20°C 上升到 60°C ，電壓約下降 4×10^{-4} 伏特，而當磁性流體的體積分率為 $\Phi=0.1$ 時，溫度從 20°C 上升到 60°C ，電壓約下降 2×10^{-4} 伏特，因此可知道磁性流體的體積分率較高時，增加相同的溫度差會使得所量測的感應電壓下降的幅度更大，且可以歸納得知當增加相同的溫度差之下，其磁性流體的體積分率之比值會與感應電壓大小的下降量之比值成正比的關係，此結果與磁性流體的磁化強度與溫度的曲線(圖 6)的趨勢是非常符合的。

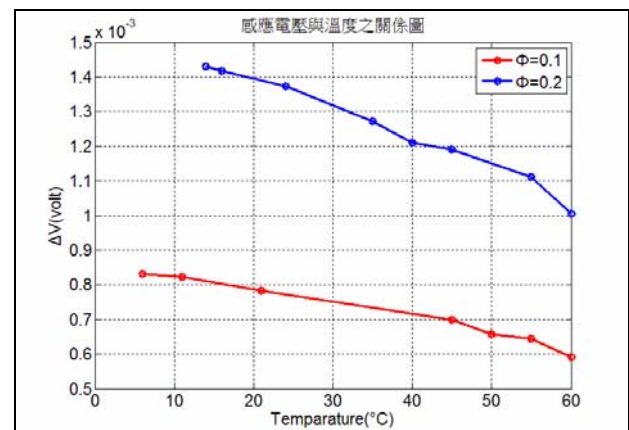


圖 16 不同體積分率下所量測的感應電壓與溫度之關係圖。

4.第三年度結論

磁性流體在熱傳上的表現，與文獻[25]中奈米流體之熱傳上的表現非常相近；在層流的情況下，增加磁性流體的體積分率對於對流熱傳係數有顯著的提升，以及磁性流體之熱傳係數會隨雷諾數的增加而提升。在相同的雷諾數下，提高磁性流體的體積分率亦會使流體的熱傳係數增加，此外，當提高 Re 時離熱端入口越近之熱傳係數的增加幅度最為明顯，而離入口端越遠熱傳係數增加的趨勢就越小；此外，本實驗試圖建立磁性流體的平均 Nu 與 Re 的關係並與文獻[25]中 Shah equation 做比較，發現本實驗相當符合 Shah equation 經驗公式。

在感應訊號擷取的部分，磁通量密度會隨著磁性流體的體積分率增加而增加，感應電壓振幅大小隨磁性流體的體積及磁場改變，在實驗中可發現磁性流體的體積分率與感應電壓差成正比的關係，此結果與文獻[20]中吻合。而以磁性流體的溫度為變數對感應電壓大小的關係中，可以發現雖然溫度也是影響感應電壓大小的參數之一，其影響卻是遠小於體積分率為變數的差異，但雖影響較小，溫度增加仍然會使感應電壓下降，且在提升相同的溫度差，體積分率較大的磁性流體所產生的感應電壓下降量也會越大，磁性流體體積分率較小者所產生的感應電壓下降量也就越小，此結果與磁性流體的特性相當吻合。

本年度最後目的是希望結合磁性流體應用於熱傳方面與對應的感應電壓之量測，將磁性流體在熱傳中實際應用，並搭配線圈組裝置於流場流道外側，一方面希望利用磁場能對磁性流體產生磁性粒子間的串接排列進而增加磁性流體的對流熱傳強度，另一方面能藉由感應線圈量取感應電壓，判讀磁性流體在不同位置的溫度分布，以非侵入式的溫度量測取代熱電耦等侵入式的量測，這將有助於之後磁性液滴在流場實驗中之研究探討。

五、參考文獻

- [1] Rosensweig, R. E., Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [2] Raj, K., Moskowitz, B., and Casciari, R., Advance in ferrofluid technology, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 149, pp. 174-180, 1985.
- [3] Berkovsky, B., Medvedev, V., and Krakov, M., Magnetic Fluids Engineering Applications, Oxford University Press, New York, 1993.
- [4] Terry, A., Oakey, J., and Marr, D. W. M., Microfluidic control using colloidal devices, Science, Vol. 296, pp. 1841-1844, 2002.
- [5] Dreyfus, R., Baudry, J., Roper, M. L., Fermigier, M., Stone, H. A., and Bibette, J., Microscopic artificial swimmers, Nature, Vol. 437, pp. 862-865, 2005.
- [6] Bension, H., University physics, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [7] Kubasov, A. A., Electromotive force generation due to ferrofluid motion, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 173, pp. 15-19, 1997.
- [8] Zahn, M., Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology, Journal of Nanoparticle Research, Vol 3, pp. 73-78, 2001.
- [9] Shuchi, S., Mori, T., and Yamaguchi, H., Flow boiling heat transfer of binary mixed magnetic fluid, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, pp. 3234-3236, 2002.
- [10] Yamaguchi, H., Shuchi, S., Takemura, M., and Kuwahara, T., Measurement of void fraction in magnetic fluid using electromagnetic induction, The Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference, Nov. 17-21, 2002, Nagoya, Japan.
- [11] Shuchi, S., Yamaguchi, H., and Takemura, M., Measurement of void fraction in magnetic fluid using electromagnetic induction, Journal of Fluids Engineering, Vol. 125, pp. 479-485, 2003.
- [12] Kuwahara, T., and Yamaguchi, H., Void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow using magnetic fluid, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 21, pp. 173-180, 2007.
- [13] Kuwahara, T., Vuyst, F. D., and Yamaguchi, H., Flow regime classification in air-magnetic fluid two-phase flow, Journal of Physics Condensed Matter, Vol. 20, pp. 1-6, 2008.
- [14] Kuwahara, T., Vuyst, F. D., and Yamaguchi, H., Bubble velocity

measurement using magnetic fluid and electromagnetic induction, *Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 097101-1-097101-8, 2009.

of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.322 pp 3508-3513,2010.

- [15] Chen, C. Y., Lin, H. C., Tsai, W. K., and Lin, C. H., Motion of miscible magnetic fluids in a vertical capillary tube, *Journal of Mechanics*, Vol. 24, pp. 311-317, 2008.
- [16] Chen, C. Y., Chen, C. H., and Lee, W. F., Experiments on breakups of a magnetic fluid drop through a micro-orifice, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 3520-3525, 2009.
- [17] Ramirez, R. W., *The FFT: fundamentals and concepts*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, c1985.
- [18] Nicklin, R. C., Faraday's law-Quantitative experiments, *American Journal of Physics*, Vol. 54, pp. 422-428, 1984.
- [19] Carpena, P., Velocity measurement through magnetic induction, *American Journal of Physics*, Vol. 65, pp. 135-140, 1997.
- [20] T. M. Kwon, M. S. Jhon and T. E Karis, "A Device for Measuring the Concentration and Dispersion Quality of Magnetic Particle Suspensions," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 41, pp10-16, 1992.
- [21] R. C. Nicklin, "Faraday's Law-Quantitative Experiment," *American association of physics teachers*, Vol. 54, pp 422-428, 1986.
- [22] T. Kuwahara and H. Yamaguchi, "Void Fraction Measurement in Magnetic Fluid," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 289, pp403-406,2005.
- [23] Y. Xuan and Qiang Li, "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids", *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1~21, pp 58-64,2003.
- [24] Dongsheng Wen and Yulong Ding, "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp 5181-5188, 2004.
- [25] Maryamalsadat Lajvardi, Jafar Moghimi-Rad, "Experimental Investigation for Enhanced Ferrofluid Heat Transfer under Magnetic Field Effect," *Journal*