

豐原水廠混凝加藥自動化之研究

甘其銓¹、張進興²、黃志彬³

摘要

行政院環保署在 1997 年公佈了新飲用水水質標準，其中對濁度的標準將從現行的 4 NTU，於 2000 年 12 月 1 日調整至 2 NTU。面對此一規定，台灣自來水事業於各地的淨水廠勢必提昇其淨水效能以符合日趨嚴格的水質標準。

本實驗室曾對豐原及板新淨水廠進行淨水操作效能評估，結果顯示兩淨水廠內混凝/膠凝單元的操作情形皆處於不良狀況，主要原因乃淨水廠內並未完整建立混凝加藥自動化監控系統與混凝操作參數不佳，例如利用現場操作經驗或每日的瓶杯試驗以決定混凝加藥量、快混攪拌不均及膠羽池水力負荷過高等，在兩淨水廠中皆發現類似的情形存在。但兩水廠已於 1997 年年底架設英國 Lasertrim 公司所生產的混凝加藥控制系統(Coagulant Control System, CCS)，目前此系統於豐原廠已在線上操作。與以往的混凝加藥決定方式比較，CCS 乃利用流導電流儀(Streaming Current Detector, SCD)對快混後水中微粒的表面電性進行偵測，確實能達到即時加藥控制的優點。但面對台灣多變的水質，美國學者 Dentel 教授曾建議於操作時可利用批次實驗協助 CCS 判斷加藥量，依據此一理念，本研究提出以另一光纖膠羽偵測技術 (Photometric Dispersion Analyzer, PDA)協助 CCS 決定加藥量。

為探討 PDA 決定加藥量是否可作為 CCS 控制加藥量基準設定，本研究分別採用 SCD 偵測到電性中和的加藥量與 PDA 所決定的加藥量，作為 CCS 操作時的設定基準，於水質穩定時，將不同加藥量應用於實廠操作，並連續觀察沈澱及過濾出流水的濁度，以評估各種加藥量的處理效率。研究之中，亦進行慢混池中生成膠羽的採樣，並利用沈降實驗進行膠羽特性分析，膠羽特性分析包含了膠羽粒徑大小、沈降速度及膠羽的碎形維度分析。

結果顯示，在 PDA 協助 CCS 設定加藥點之下，傳統式重力沉澱池與過濾池的濁度去除效率提高。而透過膠羽特性分析，發現到在 PDA 決定的加藥量下，形成膠羽的粒徑較大，沉降速度也較快。此外，經膠羽的碎形維度分析後也顯示在 SCD 與 PDA 決定的加藥量下，顆粒聚集的情況端視於微粒在水中擴散及碰撞的情況，現場水力攪拌將是影響膠羽結構的主要因素。

1. 國立交通大學環境工程研究所研究生
2. 台灣省自來水公司第四區管理處豐原給水廠
3. 國立交通大學環境工程研究所教授

前言

對於即時監測膠凝行為的方法，Horn 認為可由兩方面進行，其一是連續監測水中顆粒的表面電性，在 1966 年 Gerds 則利用流導電流的原理發展出流導電流儀；其二是直接觀察膠羽生成的情形，在 1985 年 Gregory 研究光纖通過流動性懸浮固體溶液的情形時發現，當顆粒凝集時，光強度變化的均方根值會隨之增加，此值的變化可以反應出顆粒凝集的程度來當作監測膠羽大小的指標，應用此原理發展出光纖膠羽偵測儀。然而 SCD 與 PDA 於現場運作仍有其優缺點，就線上操作而言，SCD 連續操控性佳、反應時間較短，但是易受水質變動而產生偵測誤差。PDA 雖不易受水質變動而產生偵測誤差，但是偵測時間長短不一，導致連續操控性差。

根據 Dentel (1991) 的研究，認為 SCD 較適合用於原水水質變動不大的淨水廠內。由於台灣的自來水水源大多來自水庫或河川等表面水，因此易受天氣、季節的影響而水質變動極為頻繁，變化量也極大，面對此一環境，其應用將受限制，在豐原廠試操作期間，也發現在進流水濁度變化極大的時候，SCD 的加藥設定點會產生偏移的現象。此外 Dentel 亦建議 SCD 於操作的初期或水質變動之時，可利用 Jar-Test 協助最佳加藥量的判定，以建立 SCD 於操作時的設定基準電位。但 Jar-Test 不能及時反應現場情況，無法應付台灣淨水廠原水水質急遽變動；而且利用殘餘濁度的評估方式誤差較大，不易找出精準的最適加藥。本實驗室 (Huang & Chen, 1996 ; Huang & Liu, 1996) 曾完成應用連續式 PDA 於實驗室中進行連續性的混凝加藥自動控制。去年，於豐原淨水廠利用批次 PDA 進行現場混凝加藥的最適化探討，結果顯示 PDA 的 Ratio 輸出值能有效的反應現場原水經混凝後膠羽形成的狀況，利用 PDA 的 Ratio 值所決定的最佳加藥量也較 Jar-Test 利用殘餘濁度所得到的最佳加藥量來的精準。因此，在研究中將探討 PDA 所決定的加藥量，是否可作為 SCD 操作時的設定基準，並於原水濁度變動時啟動 PDA，協助 SCD 建立新的最適加藥基準。

實驗設備及方法

實驗設備

1. 多元氯化鋁 (PACl) 溶液

使用大軒企業所提供的多元氯化鋁溶液，濃度為 10% as Al_2O_3 (100,000 mg/l)，此溶液及濃度亦同於水廠的使用者。於實驗之前再以蒸餾水將濃度稀釋為 1,000 mg/l as Al_2O_3 。

2. 豐原淨水場之原水

以豐原淨水場未經處理之原水為實驗水樣，在實驗前先將水樣靜置 15 分鐘使砂粒沈澱，可增加光學偵測儀訊號之穩定性。

3. 光纖膠羽偵測儀

光纖膠羽偵測儀 (PDA2000, Rank Brothers Ltd., UK.) , 其主要是用來監測流動性的懸浮固體溶液顆粒的聚集狀態。流動的懸浮液被一高強度發光二極體所發出的細微紅外光線 (波長 820 nm) 照射, 而照射的體積很小 (約為 3 mm^3) ; 當懸浮液流動時, 在照射光徑中的顆粒數目會不斷地變動, 而這樣的變化將導致穿透懸浮液之光強度發生變動。穿透光的強度由一個靈敏的光二極體接收偵測, 並將光強度轉換成相當強度的電壓輸出訊號。輸出的電壓包括了一個很大的固定組成 (DC Component) , 相當於平均穿透光的強度 (和懸浮液的濁度有關) , 以及一個非常小的變動組成 (AC Component) , 相當於穿透光的強度變化, 是由於顆粒數目的隨機變動所造成。PDA 將這些光強度相對於平均值之變動以均方根值 RMS , 與顆粒的濃度和散射截面積有關) 來表示, 此變動的訊號經過一個 RMS-to-DC 的轉換器, 使得輸出電壓值和輸入訊號的均方值根相當; 而將 RMS 值和 DC 值相除, 可以得到一個 RMS/DC 的輸出值, 此數值在本文之中以 "Ratio" 值表示, 而 Ratio 值可作為懸浮液中顆粒聚集的指標。

4. 濁度計

美國 HACH 公司 Surface Scatter 6 Turbidimeter , 偵測範圍為 0~9999 NTU 。

5. 瓶杯試驗機

美國 Phipps&Bird 公司 Model 7790-400 ; Hi Range 30~320 rpm, Low Range 0~30 rpm 。

實驗方法

1. PDA 批次試驗

實驗的配置如圖1所示, 首先讓PDA熱機半個小時以上使其性能穩定後, 將純水以重力流方式流入內徑為3 mm- ϕ 的層流管並通過PDA, 將此時PDA所對應之DC輸出值調整到10 volts。以豐原淨水場為研究對象, 將實場原水沈澱15分鐘, 將砂沈澱之後取上層原水為水樣。1升的水樣置於反應槽中, 以每分鐘200 rpm的速度 (G值為 520 s^{-1}) 攪拌, 然後置入層流管以重力流方式使水樣在管中的流量維持在20 ml/min, 並以水樣調整PDA之RMS輸出值為0.5, 改變 PACl 的加藥量, 水樣經快混之後再流經層流管產生膠凝作用並通過PDA的光纖監測器;為了使水不在cell中累積, 需使用蠕動幫浦將水樣抽回反應槽之中, 以維持反應槽中水位高低固定。記錄此加藥量下PDA的Ratio值, 此為PDA批次實驗針對某一加藥量的完整步驟。接下來改變混凝劑劑量, 重複以上試驗並記錄Ratio值。

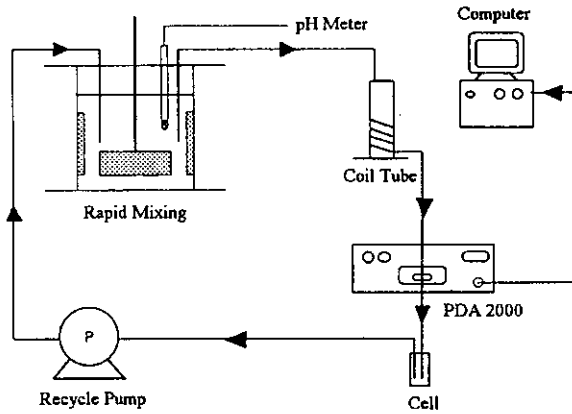


圖1. PDA批次試驗配置圖

2. 自由沈降試驗

將現場沈澱池中的生成膠羽移作自由沈降試驗，以分析不同加藥量下所產生膠羽的粒徑以及沈降速度，再代入Stoke的修正公式，可計算出膠羽之密度。根據 Yasuhisa (1997) 文獻指出，可利用量測出的膠羽粒徑與沈降速度取對數作圖，計算出形成膠羽的碎形維度 (Fractal Dimension)。

結果與討論

CCS 現場操作之觀察

1966 年 Gerdes 將流導電位的量測技術作了一次的革新，並推出流導電流儀 (streaming current detector, 以下簡稱 SCD)，由一活塞 (piston) 在狹窄環狀空間的往復式運動帶動水流的方式，取代以往於毛細管式的通道中施加壓力以帶動水流。當活塞做上下運動時，將帶動水樣自出入口進出，活塞往上時水樣便被引入而暫存於一變動區間，活塞往下時水樣則隨著變動區間的減少而逐漸排出，由於環狀帶相對於變動區間顯的非常狹窄，故當活塞運動時，在環狀帶內會生成一極大的流速，足以在剪力面上形成一顯著的拖曳力來帶動反離子，進而量測環狀壁面內的流導電流，又因能連續取樣故能成為現場混凝劑加藥監控的工具。

豐原淨水場採用的混凝控制系統 (Coagulation Control System, CCS) 是英國 Lasertrim 公司所開發的，此系統配置如圖 2 所示。在 CCS 系統之中，SCD 用來偵測流導電流，所得之測值經由資訊處理系統轉換成 4-20mA 的訊號輸出至 CCS 的訊號處理器之中。CCS 系統每一次開機使用，都會進行大約兩分鐘的感應槽清洗，八分鐘以內混凝加藥量可追到設定點，而每使用一段時間，SCD 內的感應壁面會自動進行超音波清洗，以避免壁面累積微粒而造成流導電流偵測上的誤差。

CCS 系統之中，分成數個迴圈對水廠內的各單元進行水質狀況的監測，迴圈一為原水水溫監測，迴圈二為原水濁度，迴圈三為原水 pH 值，迴圈四為水量大小，迴圈五為 SCD 的流導電流輸出與混凝劑加藥量的控制，迴圈六為混凝後 pH 值的監控，迴圈七為一期沈澱水的濁度監測，迴圈八為二期沈澱水的濁度監測，迴圈九為三期脈動式污泥層沈澱池出流水的濁度監測，迴圈十為過濾池出流水的濁度監測。

迴圈五為 CCS 主要的控制迴圈，SCD 的輸出值與混凝劑的加藥量多寡都在此迴圈之中被監控。控制原理乃先設定一基準電壓值，再利用 SCD 感應壁面所偵測到的流導電流值轉成的電壓 PV 值。PV 值大於基準電壓值的情況下，即被視為過量加藥的狀態，而加藥幫浦便會受 CCS 控制而減少混凝加藥量；在 PV 值小於基準電壓值的情況下，即被視為不足量加藥的狀態，而加藥幫浦便會受 CCS 控制而增加混凝加藥量。

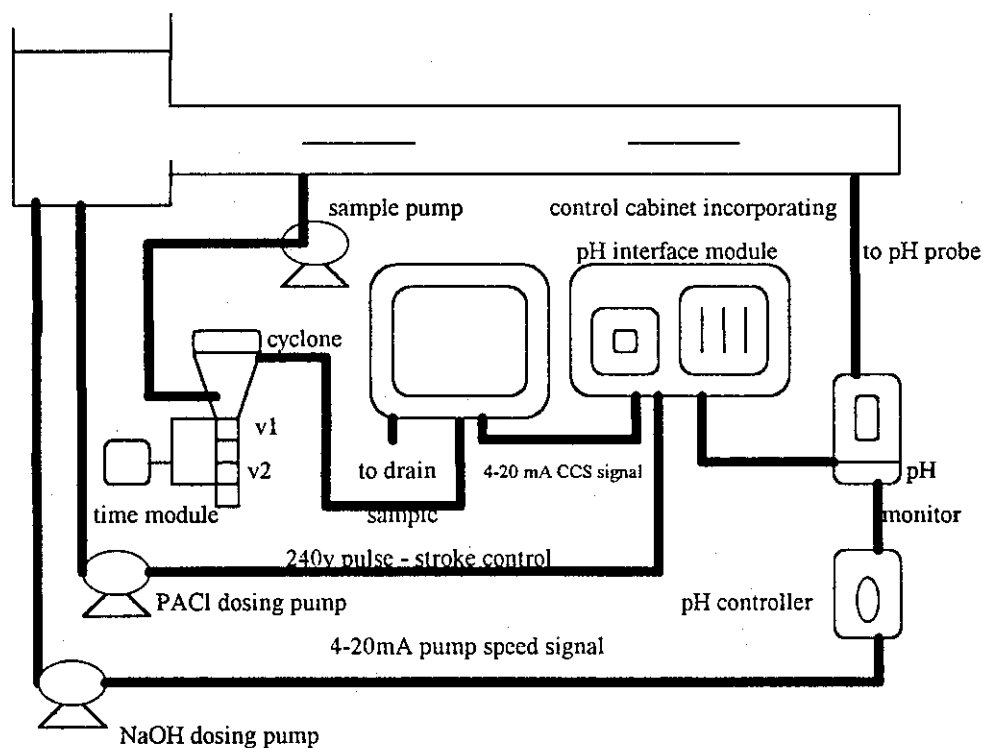


圖 2 豐原淨水廠 CCS 系統配置

在黃及陳（民國八十四年）的研究中曾提到 SCD 的感應壁面會有微粒吸附（如懸浮微粒、濁度微粒、金屬氫氧化物等），易導致流導電流偵測的誤差，因此在 SCD 操作一段時間之後，常需以酸來清洗感應壁面，然而在 CCS 之中就採用超音波清洗的技術，使得 SCD 的偵測能更加連續與減少微粒所引起的偵測偏差。

豐原淨水場目前 SCD 的操作仍有一些問題亟需注意，如 SCD 對 pH 值的變動相當敏感，而 pH 值對於混凝劑加藥量的多寡也有相當程度的影響；而在進流水高濁度的情況下，SCD 的偵測亦會受到影響，自然環境之中影響流導電流量測的因子如可溶性鹽類的存在，會造成離子強度的增加，導致電雙層的壓縮會使得流導電流的讀值變動不明顯；而水中帶有大分子量的有機物（如腐植酸）也會使得量測值往負值偏移，都是 SCD 於現場操作時不可忽略的問題。除了克服以上現場操作 SCD 的問題之外，在操作期間需建立適合現場的操作參數，如 SCD 最佳訊號的輸出範圍，以及加藥量調整率及加藥偵測的間隔時間、取樣流速等操作設定，都將是重點工作。

利用 PDA 協助 CCS 現場操作

為了探討 PDA 決定加藥量是否可作為 CCS 控制基準設定，本研究採用批次 PDA 所決定的加藥量與實驗室內批次試驗所決定之加藥量，作為 SCD 操作時的設定基準。如圖 3 所示，圖中顯示進流原水濁度穩定維持在 11 ± 1 NTU，原水 pH 值穩定維持在 7.8~8.0，在實驗開始時 CCS 設定點在 $PV = 0$ ，此時加藥量約為 1.3~1.4 mg/l，利用此基準操作現場加藥量，考慮流過時間後，監測沈澱池與過濾池出流水濁度；並採取膠羽池內的形成膠羽進行沈降實驗，以對膠羽特性進行分析。

根據實驗室進行 Jar-Test 與 PDA 批次實驗，所得到的最佳加藥量分別為 1.8 mg/l 與 1.7 mg/l。先改變現場加藥量為 2.0 mg/l，此時 CCS 設定點須改變為 $PV = 4.0$ ，利用此基準操作現場加藥量 2 個小時，考慮流過時間後，監測沈澱池與過濾池出流水濁度。接下來將現場加藥量調整為 Jar-Test 與 PDA 批次實驗所決定之最佳加藥量 1.7~1.8 mg/l，則須改變 CCS 設定點為 $PV = 2.0$ ，利用此基準操作現場加藥量 4 個小時，考慮流過時間後，並進行沈水與過濾水濁度監測與進行膠羽沈降實驗。

結果顯示，在進流原水水質穩定的條件下，當加藥量從 1.3~1.4 mg/l 調整至 2.0 mg/l 及 1.7~1.8 mg/l 後，對應流過時間，發現所監測的傳統式斜板沈澱池出流水濁度由 6.5 NTU 左右降至 4.5 NTU，而後續過濾池出流水濁度也從 0.25 NTU 降至 0.15 NTU。主要因為在 CCS 控制設定點為 $PV = 0$ 的時候，代表水中顆粒經加藥快混後，其顆粒表面呈電性中和，此時混凝去除顆粒的機制為電性中和；而在控制設定點為 $PV = 2$ 或 4 的時候，顯示水中部份顆粒表面微帶正電，水中並有金屬氫氧化物的形成，所以此時混凝去除顆粒的機制為電性中和及吸附，Tambo 形容此機制為 "Bridging Coagulation"，如圖 4 所示。他也指出對於一般傳統式的重力沈澱池而言，以電性中和及吸附為主的機制，會比電性中和更有去

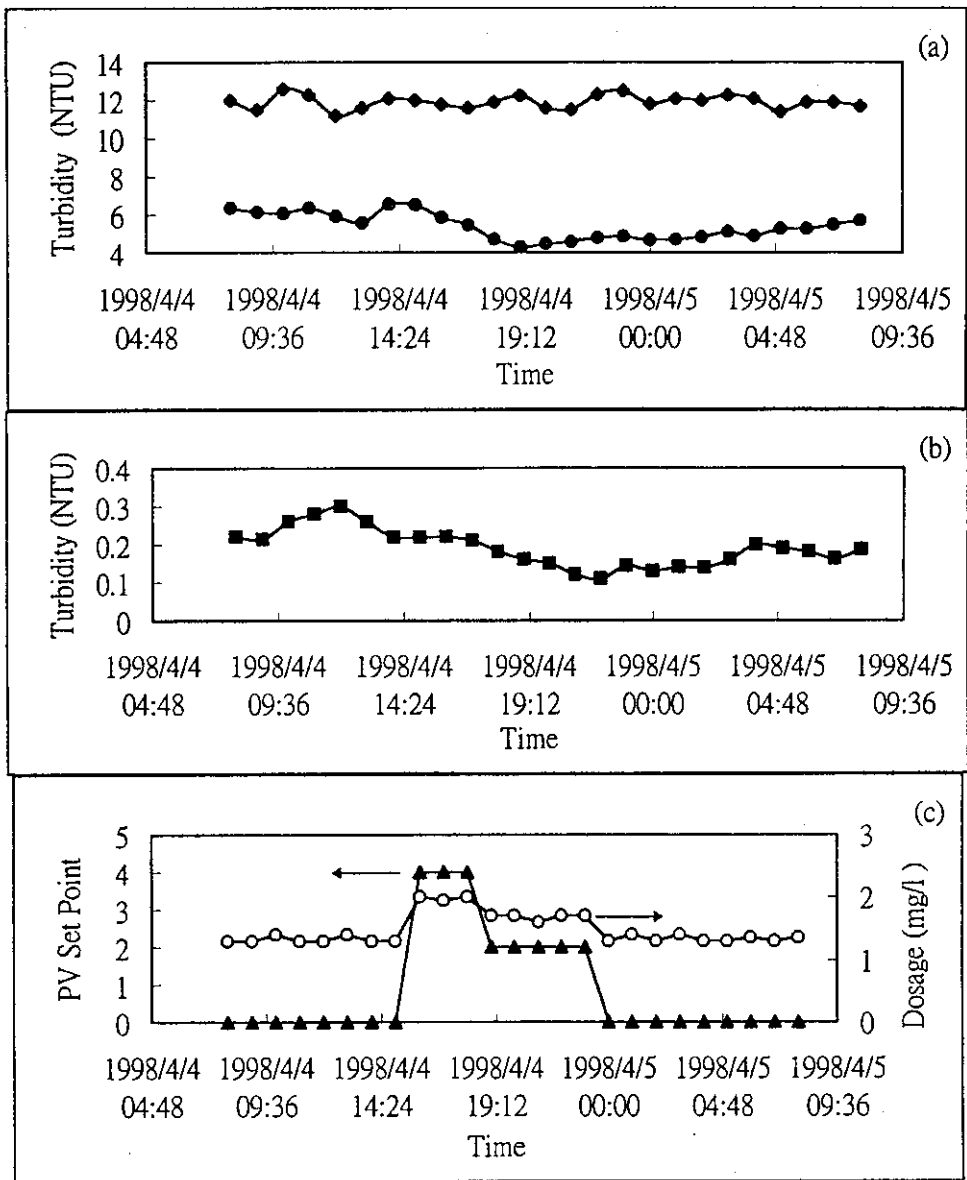


圖 3. 豐原淨水場 1998/4/4 早上八點至 1998/4/5 早上八點 (a)進流原水(◆)及沈澱池出流水(●)濁度 (b)過濾池出流水(■)濁度 (c)CCS 設定點(▲)及混凝劑加藥量(○)隨時間變化情形。

除微粒的效果，值得注意的是在以掃除沈澱為主要去除顆粒的範圍內，pH值的控制是非常重要的。

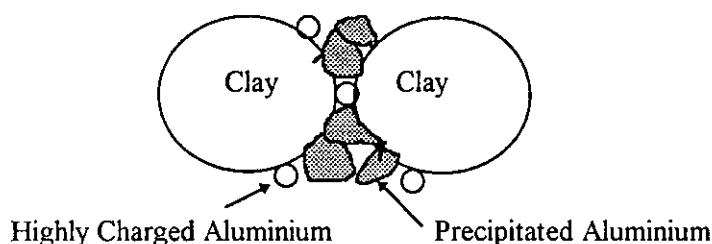


圖 4. "Bridging Coagulation" 示意圖 (Tambo, 1991)

所以利用 PDA 協助 CCS 設定混凝加藥的基準，確實能提高傳統重力式沉澱池與後續過濾池去除濁度的效率。但是就目前淨水廠內運作程序中，另有其他型的沈澱處理單元，如污泥氈式脈動沈澱池及浮除過濾池，其膠羽去除的機制不同於傳統式重力沈澱，因此利用 PDA 所決定的加藥量是否可達其最佳的處理效率，則需進一步的研究。

膠羽特性分析

為了瞭解在不同加藥量下，生成膠羽的特性，研究之中並對現場膠羽池內的膠羽進行採樣，以自由沈澱法觀察膠羽的粒徑與沈澱速度，再利用 Stoke 公式計算生成膠羽的密度。在混凝加藥量 1.3~1.4 mg/l 的期間，生成膠羽的平均粒徑 0.71 mm，平均沈澱速度為 3.47 mm/sec，經 Stoke 公式計算後可得到膠羽有效密度為 3.16 kg/m³。在混凝加藥量 1.7~1.8 mg/l 的期間，生成膠羽的平均粒徑 0.76 mm，平均沈澱速度為 3.9 mm/sec，經 Stoke 公式計算後可得到膠羽有效密度為 3.15 kg/m³。比較在兩種不同加藥量下形成膠羽的特性，可以發現以電性中和為主的混凝機制作用下，形成膠羽的粒徑較小；而以電性中和及吸附作用為主的情形下，顆粒與顆粒間除了凡得瓦爾作用力之外，由於金屬氫氧化物的存在，顆粒間也有吸附作用力，因此形成了較大的膠羽的粒徑。經計算後發現膠羽的密度相同，而粒徑越大，沈澱速度也越大，因此在傳統重力沈澱池中濁度去除效率也越高。

而根據 1979 年 Tambo 及 Watanabe 觀察高嶺土混凝膠羽的沈澱過程，發現膠羽粒徑與沈澱速度呈現一指數關係，如式 1 所示。

$$V \sim D^{df-1} \quad (1)$$

式中 V 為膠羽沈澱速度，D 為膠羽粒徑，df 為生成膠羽的碎形維度，所以將膠羽樣本的粒徑與沈澱速度取對數分析，可以計算出膠羽的碎形維度。根據自

由沉降試驗所觀察到現場膠羽池內膠羽樣本，可以分別計算出在加藥量為 1.3~1.4 mg/l 及 1.7~1.8 mg/l 形成膠羽的維度，如圖 5 所示，分別為 1.83 及 1.78。Gergory J. 曾利用數學模式演算及實驗的觀察，在微粒聚集為擴散控制的情況下（Diffusion-limited aggregation），膠羽形成的碎形維度約為 1.8，與本研究的數據相當接近，顯示現場原水在此兩種加藥量下，顆粒表面能障已被降低至數 kt ，形成一擴散控制的聚集情況，此時，水力攪拌是控制水中微粒與微粒之間碰撞進而聚集的主要因素。

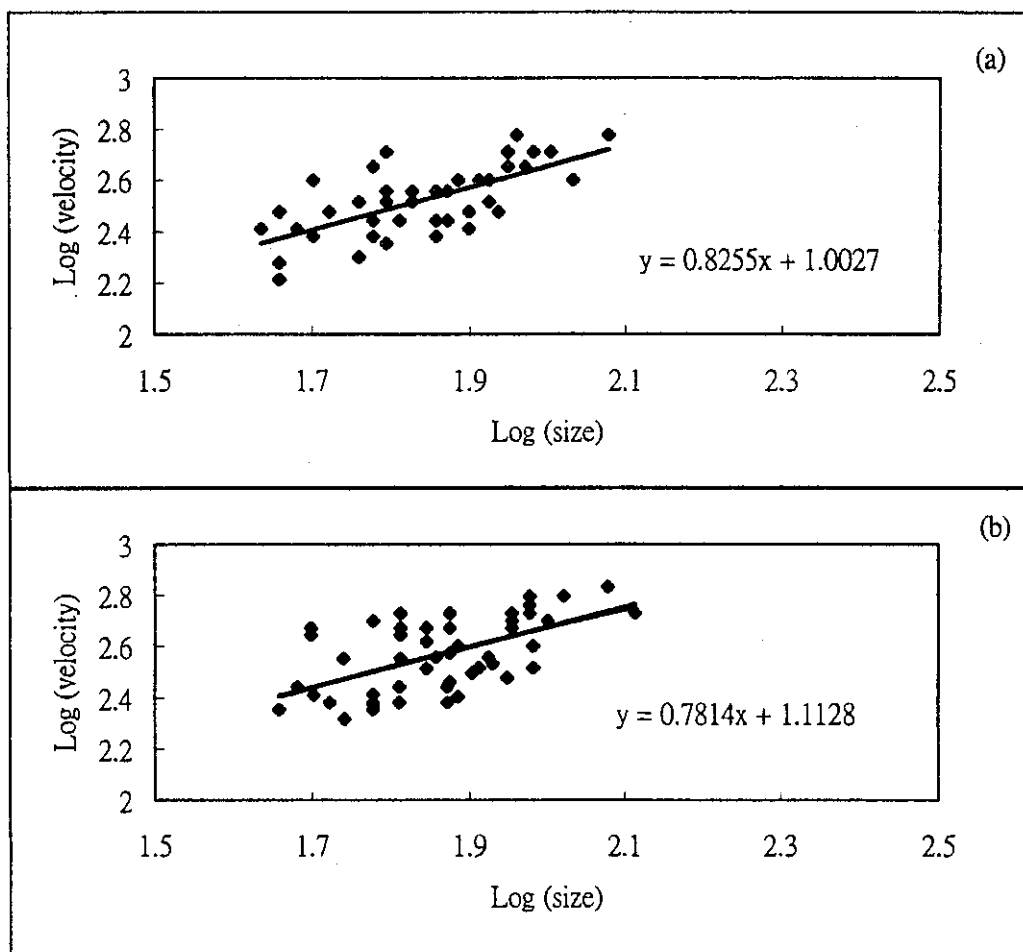


圖 5. 現場膠羽池中於(a) 加藥量 1.3~1.4 mg/l (b) 加藥量 1.7~1.8 mg/l 形成膠羽粒徑大小與沉降速度的對數分佈圖。

結論

流導電流儀的線上偵測確實提供了一類似界達電位之訊息，由於可連續性操作，操作人員可藉此即時瞭解混凝加藥後水中微粒的表面電性，進而控制混凝加藥；然而面對台灣多變的原水水質與不同的水處理流程，SCD 的應用仍稍嫌不足。PDA 協助 CCS 設定混凝加藥的基準，確實能提高傳統重力式沉澱池與後續過濾池去除濁度的效率。而透過膠羽的特性分析，顯示出在 PDA 決定的加藥量下，混凝機制以掃除沈澱為主，形成粒徑較大、沈降速度較快的膠羽，也說明在此加藥量下，濁度去除效率提高的原因。值得注意的是，在 SCD 與 PDA 決定的加藥量下，膠羽形成的結構特性決定於微粒的擴散與碰撞，因此在現場操作中，適當的水力攪拌益顯重要。

參考文獻

- Ching H. W., Elimelech M. and Hering J. G. (1994). Dynamic of coagulation of clay particles with aluminum sulfate. *Jour. Env. Eng. ASCE.*, **28**, 169-189.
- Dentel S. K. (1991). Coagulation control in water treatment. *Critical Rev. in Env. Control* **21**, 41-135.
- Gregory J. (1985). Turbidity fluctuations in flowing suspension. *J. Colloid Interface Sci.*, **105**, 357-372.
- Gregory J. (1997). The density of particle aggregates. *Wat. Sci. Tech.*, **36**, 1-13.
- Huang Chihpin and Chen, G. S. (1996). Use of the fiber-optical monitor in evaluating the state of flocculation. *Wat. Res.*, **30**, 2723-2727.
- Huang Chihpin and Liu C. B. (1996). Automatic control for chemical dosing in laboratory-scale coagulation process by using an optical monitor. *Wat. Res.*, **30**, 1924-1929.
- Tambo N. (1991). Basic concept and innovative turn of coagulation/flocculation. *Water Supply*, **9**, 1-10.
- Photometric dispersion analyzer PDA2000 operation manual, Rank Brothers Ltd., Cambridge, U.K.
- Yasuhisa A. and Yoshikazu T. (1997). Settling velocity of an aluminium-kaolinite floc. *Wat. Res.*, **31**, 449-454.
- 張進興. 應用流導電流偵測技術用於淨水場混凝加藥自動控制之研究 台灣省自來水公司第四區管理處豐原給水廠，民國八十七年六月。
- 黃志彬，甘其銓及張進興"淨水混凝監測及加藥控制之研究" 第十四屆自來水研究發表會論文集，pp61-72，台北，民國八十六年十一月。
- 黃志彬及陳建中"流導電流儀在淨水混凝/膠凝程序中自動加藥控制之研究" 中國環境工程學刊，第五卷，第二期，民國八十四年。
- 劉棋彬及黃志彬"以光纖偵測系統自動控制混凝加藥之研究" 第十二屆自來水研究發表會論文集，pp63-79，台中，民國八十四年十一月。