

淨水廠混凝監測及加藥控制之研究 Coagulation Monitoring and Dosing Control in Water Treatment Plant

黃志彬¹ 甘其銓² 張進興³ 張義男³

摘 要

混凝/膠凝單元一直都是傳統淨水處理技術的必備程序，此單元操作的良窳，更是對於後續的過濾程序與清水水質有著極大的影響。混凝加藥量過多會導致水中殘留鋁鹽與污泥量增加；混凝加藥量不足會形成過濾池的負荷，反沖洗頻率增加。因此本研究針對淨水廠內混凝加藥處理單元的最適化，在豐原淨水廠使用光纖膠羽偵測儀（Photometric Dispersion Analyzer，以下簡稱PDA）進行混凝監測與加藥控制的實驗，以改善淨水廠混凝/膠凝單元的操作。

PDA 應用於實驗室之中其偵測混凝/膠凝作用的原理和方法已被驗證，但對於實場的操作應用，PDA 偵測系統的連續操作的穩定性及應變能力，需要進一步的探討。因此，我們將 PDA 系統設置於給水廠實驗室中，抽取進流之原水，並模擬豐原淨水場內混凝/膠凝單元操作，在不同濁度進流原水、不同加藥量下先以批次實驗量測並記錄 PDA 輸出值的變化趨勢與生成膠羽的粒徑大小和沈降速度，觀察殘餘濁度、膠羽粒徑及沈降速度大小的變化與 PDA 輸出值之相關性，並評估以 PDA 讀值作為判定混凝加藥的指標之可行性；並比較 PDA 批次實驗所決定之加藥量與現場實際加藥量之差異。接下來以一套實驗室規模之連續流模型槽，模擬淨水場實場操作，以 PDA 系統為監測工具再配合電腦之自動監測，在原木連續進流與混凝加藥量改變的情況下，測試整個 PDA 監測系統的穩定性、反應性與淨水處理效果，以評估將此技術應用至實場操作的可行性。

結果顯示 PDA 可以有效地監測現場原水在不同情況下的混凝行為；偵測器的 Ratio 輸出值，可以有效地指示出在膠凝的過程中，膠羽粒徑與沈降速度的變化趨勢。因此利用 PDA 來監測現場混凝膠凝的情況是可行的技術。而 PDA 模型系統在連續流的狀況下其輸出訊號依然能保持穩定，對於不同混凝加藥量，也能在短時間之內做出合理的反應。

¹ 國立交通大學環境工程研究所教授

² 國立交通大學環境工程研究所研究生

³ 台灣省自來水公司第四區管理處豐原給水廠

一、前言

長久以來，混凝/膠凝程序一直是淨水處理過程中重要的單元，其操作的良窳關係到後續處理單元的操作負荷及處理水水質的要求；然而，混凝加藥量的控制多半是憑藉著操作員的經驗或不定期的瓶杯試驗（Jar Test）來決定加藥劑量。目前淨水場所使用的混凝劑，大多以硫酸鋁（Alum）和多元氯化鋁（PACl）為主，為了確保水質，因此常有過量加藥的情形發生而造成混凝劑的殘餘、成本的浪費及污泥量增加。而且攝取過量的鋁鹽會導致神經系統的疾病（如老年癡呆症）。此外，聚合型態之混凝劑亦對人體會產生神經毒性，所以混凝劑過量加藥的問題不容忽視。而在淨水場原水水質驟變或加藥系統故障無法正常操作時，傳統有加藥方式又往往無法即時反應造成加藥量不足以至於處理效果不佳。

本研究將實驗室研發出的 PDA 光纖膠羽偵測系統應用於實場，其偵測混凝膠凝作用的原理和方法於黃、陳（1994）及黃、劉（1995）有詳細的討論及研究，但對於實場的操作應用，PDA 偵測系統的連續操作穩定性及應變能力，需要進一步的探討。因此，我們將 PDA 系統設置於給水廠實驗室中，抽取進流之原水，並模擬豐原淨水場內混凝/膠凝單元操作，先以批次實驗量測在不同濁度、不同加藥量下，並記錄 PDA 輸出值的變化趨勢與生成膠羽的粒徑大小和沈降速度，探討濁度變化、粒徑及沈降速度大小的變化與 PDA 輸出值之相關程度，是否可利用 PDA 讀值來當作判定混凝加藥的指標；並以一套實驗室規模之連續流模型槽，模擬淨水場實場操作，以 PDA 系統為監測工具再配合電腦之自動監測，在不同濁度之原水連續進流下，測試整個 PDA 監測系統的穩定性、反應性，以評估將此技術應用至實場操作的可行性。

二、實驗設備與方法

2-1 實驗設備

1. 多元氯化鋁(PACl)溶液

使用台南東青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各種濃度以符合加藥需要。例如：在批次試驗中稀釋為1,000 mg/l as Al_2O_3 ，在連續流式試驗中則稀釋為250 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，原水 pH 值 範圍一般在 7-8 之間。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. 光學膠羽偵測儀

光學膠羽偵測儀 (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的變動以均方根值 (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。

2-2 實驗方法

1. 批式實驗

批式實驗的配置如圖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 $3 \text{ mm-}\phi$ 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}) 攪拌之, 之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PDA之RMS輸出值為 0.5, 改變 PACI 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, 重複試以上驗並記錄Ratio值。之後將所有已快混之水樣倒入燒杯中, 拿去進行瓶杯試驗(慢混 30 rpm、10 mins、靜置 10 mins), 再測上層液殘餘濁度。最後將Jar Test 後沈澱的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。批次試驗之水樣取自豐原淨水場之流進原水。實驗考慮因子則包括了不同的水樣濁度、改變加藥量的劑量、改變pH值、快混攪拌強度, 探討這些因子對混凝效果以及PDA之Ratio值的影響。

2. 連續流式試驗

連續式實驗裝置如圖2，設定模型槽的快混速度為200 rpm (G值為 520 s^{-1})，慢混速度為60 rpm (Gt值為23,328)。實驗中所使用之水樣是豐原淨水場的原水，水由分水井以幫浦抽至模型槽之快混槽中，並控制流量，同時並將混凝劑 (PACl，濃度為250 mg/l) 以加藥幫浦抽入快混槽中。快混槽中之水樣則以重力流的方式流入層流管並經由 PDA 來監測顆粒聚集的情形，以電腦自動於每分鐘記錄一次PDA 所讀取之Ratio值的變化。放流水之濁度變化則將水樣流經連續式之濁度取樣管並以濁度計進行監測，每分鐘記錄一次濁度值。

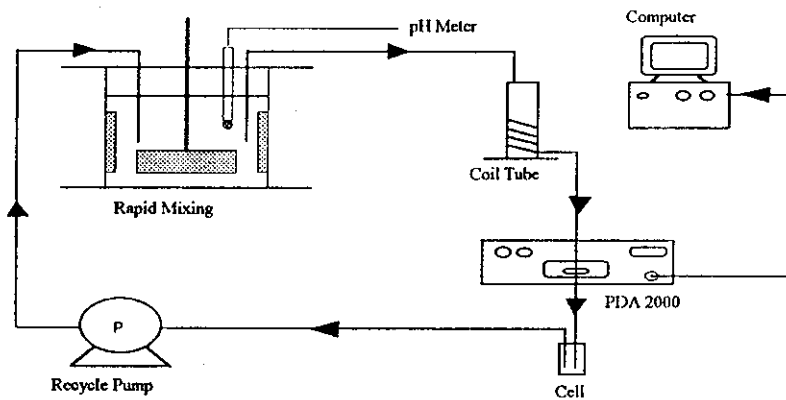


圖1 PDA批式實驗配置

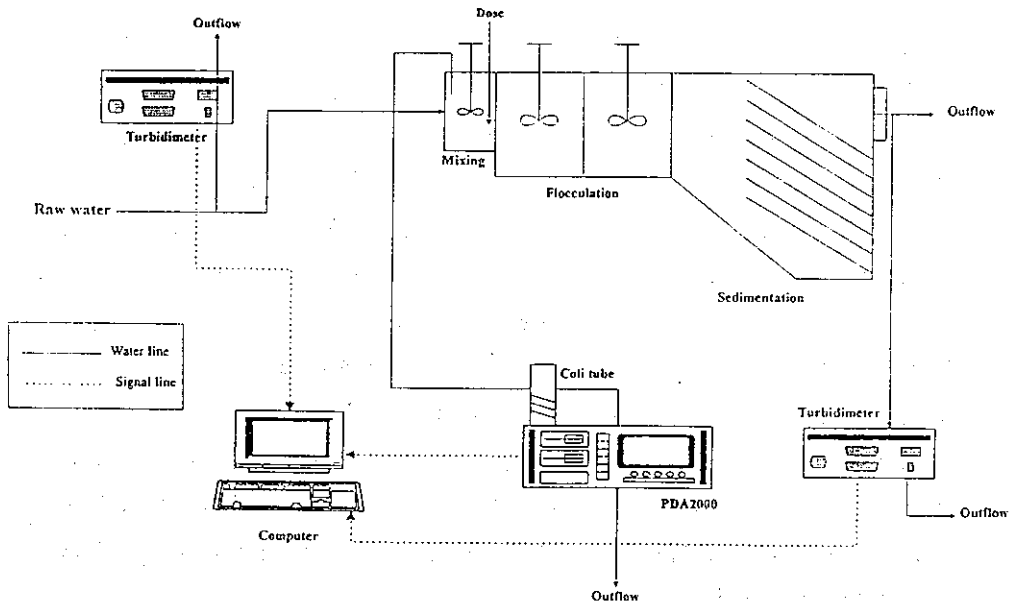


圖2 PDA連續式偵測系統配置

三、結果與討論

3-1 不同濁度情形的探討

為了瞭解PDA是否能夠適應濁度的變化以及在原水高濁度情況下的反應是否良好，因此分別採用5.6、22.3、450 NTU不同濁度的原水作探討，再將原水pH值調整至7，觀察PACl加藥量與PDA的Ratio輸出值、膠羽粒徑、膠羽沉降速度及殘餘濁度之間的關係。結果顯示，在不一樣進流原水濁度下，隨著混凝劑量不同所生成膠羽大小以及膠羽沉降速度的變化與Ratio值及殘餘濁度的變化趨勢均相似，因此以22.3 NTU的原水為代表，觀察PDA Ratio輸出值、膠羽特性及殘餘濁度與混凝加藥量之間的關係，其結果表示於圖3之中。當PACl加藥量由0 mg/l增加至0.2 mg/l，Ratio輸出值由最初設定的0.5上升至0.8，隨著加藥量的增加Ratio值也逐漸的升高，於PACl加藥量1.9 mg/l時，得到一最大的Ratio值3.19，之後隨著加藥量的增加，Ratio值又逐漸下降。相同的趨勢也反應在膠羽粒徑大小與沉降速度的變化上，於PACl加藥量1.9 mg/l情況下，膠羽粒徑達到1.2 mm的最大值，膠羽沉降速度亦達到3.7 mm/sec的最大值，表示利用PDA的Ratio值可有效地判別混凝的最佳加藥點。而混凝後利用Jar-Test所得到的殘餘濁度，也是隨著加藥量的增加，殘餘濁度也逐漸減少，但於加藥量1.5 mg/l之後，雖然加藥量逐漸增加，但殘餘濁度仍維持在1.3 NTU上下，所以利用殘餘濁度的變化判別而得的最適加藥量為1.5 mg/l，但此時所對應的膠羽粒徑及膠羽沉降速度並不是最大值，而利用PDA輸出的Ratio值所決定最佳加藥量1.9 mg/l，所對應的膠羽特性皆顯示出沉降性最好。對於不同濁度的原水，Ratio輸出值所能達到的最大值也不一樣，5.6 NTU的原水批式實驗中Ratio最大值為2.47，22.3 NTU狀況下之Ratio最大值為3.19，450 NTU時之Ratio最大值為8.78，這是因為顆粒濃度增加將使得Ratio的最大值亦隨之增加，因此可以根據 Smoluchowski 理論來解釋，當顆粒濃度增加時，其碰撞頻率將會增加，導致較大膠羽的生成，另一方面則可能因為顆粒數目增加而影響Ratio值，兩者均會使得Ratio值上升。

3-2 攪拌強度對混凝監測的影響

將批次快混槽中的攪拌速度分別調整為200 rpm(G值為 520 s^{-1})與225 rpm(G值為 610 s^{-1})，仍以PACl作為混凝劑來進行試驗，結果如圖4所示。由圖中可以發現隨著加藥量的增加，於攪拌速度200 rpm與225 rpm下分別產生的Ratio值、膠羽粒徑與沉降速度變化趨勢幾乎是相同的，所決定出的最佳加藥量也一樣為1.7 mg/l。此結果表示不論攪拌強度變化的大小如何，由PDA決定出的最佳加藥

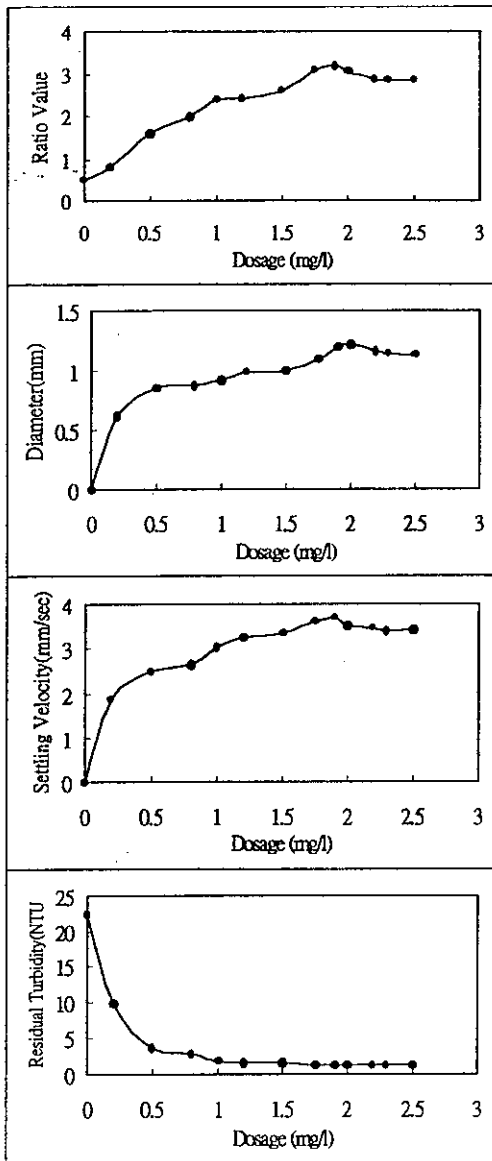


圖3 原水濁度 22.3 NTU 時PACl加藥量與(1)Ratio值(2)膠羽粒徑(3)膠羽沉降速度(4)殘餘濁度之關係 (本實驗進行時將原水pH值由原來之7.5調整至7.0，再進行混凝沈澱)

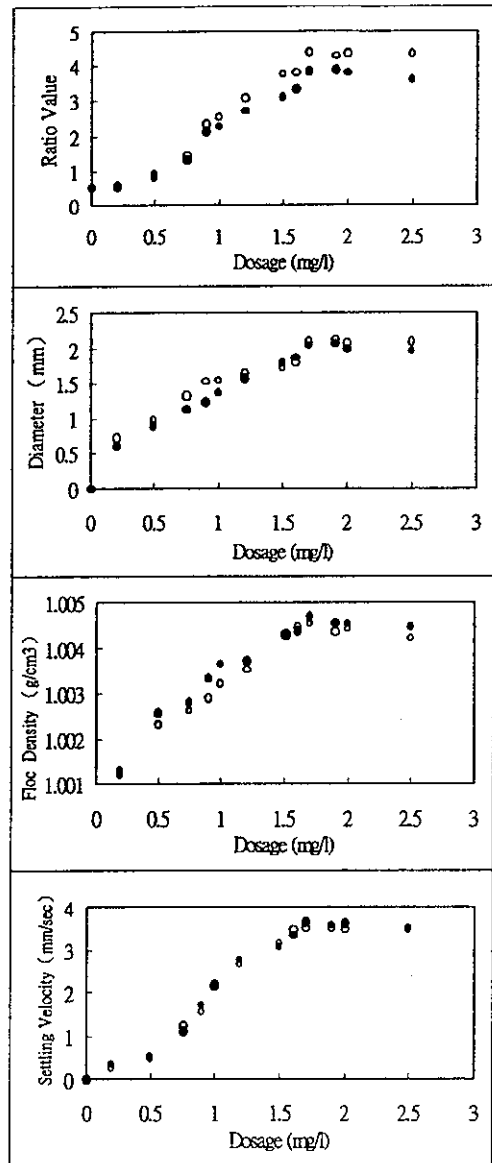


圖4 不同快混攪拌速度下，PACl加藥量與(1)Ratio值(2)膠羽粒徑(3)膠羽沉降速度(4)膠羽密度之關係 (原水濁度為3.1 NTU，pH值為7.3；○：攪拌速度為200 rpm；●：攪拌速度為225 rpm)

量並不會改變。因此在 PDA 系統中係利用細管產生的剪力來模擬慢混，因為剪力大小的不同使得彎管中生成的膠羽大小和膠凝池中實際的膠羽大小有差異，但由於 PDA 系統所決定生成最大程度膠羽的最適劑量反應到膠凝池中其生成膠羽同樣也應該為最大，Eisienlauer 及 Horn (1987) 即以此理念應用這種技術利用 Ratio 值來決定混凝加藥量。

由圖 4 亦發現 225 rpm 的沈降速度與膠羽密度均大於 200 rpm，這是因為在 225 rpm 的快混攪拌強度下，混合的程度較好，所以生成膠羽的結構較緻密，顆粒也較小；而 200 rpm 乃因為生成膠羽結構較鬆散、顆粒較大，所以 Ratio 值較大。所以良好的快混程序，可使混凝劑均勻地在水中與懸浮微粒作用。此外，PDA 的 Ratio 值曲線比較也可以反應出不同攪拌強度下膠羽生成的差異。因此可利用 PDA 在現場量測各種不同攪拌強度下膠羽生成的情況，可決定出最佳的攪拌強度，在混凝膠凝的過程中可提供適當的動力使良好膠羽形成，提高膠羽的沈降性。

3-3 pH 值的變動對混凝監測的影響

水樣的 pH 值為 7.8，利用 6 N 的 HClO_4 分別調到 pH 值為 7 的狀況，並以 PACl 進行批次之 PDA 混凝監測實驗，觀察 PDA 的 Ratio 輸出值、膠羽特性及殘餘濁度與混凝加藥量之間的關係，結果如圖 5 所示。隨著加藥量的增加，在 pH 值為 7 時的 Ratio 輸出值會大於 pH 值為 7.8 時的，但兩種狀況下所決定的最佳加藥量是相同，均為 1.5 mg/l，而膠羽特性的變化趨勢也是一樣。在本實驗中，對於 pH 值的變化，PDA 的 Ratio 值所決定出的最佳加藥量並不會改變，但是 PDA 對於原水 pH 值的不同有不一樣的反應，在 pH 7 的條件下，所得到的 Ratio 輸出值及膠羽大小、沈降速度都比原水 pH 7.8 還要大，這是因為在 pH 7 的環境中，PACl 的混凝效果比較好，因此所生成的膠羽特性也較佳；一般而言，鋁鹽在 pH 6~pH 7 之間的混凝效果最好。因此在現場操作之中也可以使用 PDA 來決定最適於混凝加藥的 pH 值範圍，可提高混凝的效果，節省混凝劑的使用。

3-4 批次 PDA 實驗決定之最佳加藥量與現場實際加藥量之比較

PDA 決定最佳加藥量，乃直接觀察膠羽生成之情況，而判定加藥量的多寡。現場決定加藥量的方式則是利用 Jar-Test 觀察殘餘濁度或操作經驗判斷所得。利用 PDA 所決定出的加藥量比較現場加藥量，如表 1 所示，共有八組比較數據，進流原水濁度範圍由 2.2 NTU 至 125 NTU，原水 pH 值的範圍由 pH 7.2 至 pH 8.1，可以發現現場實際加藥量一般而言比 PDA 所決定的加藥量來的高，除了在

原水濁度2.2 NTU的情況下以PDA決定之加藥量1.9 mg/l比現場操作人員利用操作經驗所決定加藥量1.8 mg/l還高，而八組數據平均，利用PDA所決定的平均加藥量為1.9 mg/l比現場平均加藥量2.2 mg/l還低，所以使用PDA決定加藥量可減少過量加藥的情況產生。PDA批次試驗批次槽上層液殘餘濁度與實場傳統式沈澱池出流水濁度亦列於表中，結果顯示批次槽上層液的殘餘濁度都比現場沈澱池出流水濁度低，但由於PDA批次試驗與實場操作的混凝攪拌與膠羽沈降條件不同，所以如要將PDA所決定之加藥量應用於實場，仍須有實場之良好的快混、慢混與沈澱等處理單元配合，才能達到經濟且有效的目的。

表1 PDA控制加藥量與現場實際加藥量之比較

| 日期 | 原水濁度 (NTU) | pH值 | PDA批次實驗 | | 實場淨水操作 | |
|------------|------------|-----|-------------------|------------------|--------------|----------------|
| | | | 以PDA決定之加藥量 (mg/l) | 批次槽上層液殘餘濁度 (NTU) | 現場加藥量 (mg/l) | 沈澱池出流水濁度 (NTU) |
| 85. 8. 6 | 125 | 8.1 | 3 | 4 | 3.5 | 4.6 |
| 85. 9. 23 | 5.6 | 7.8 | 1.5 | 0.65 | 1.8 | 3.1 |
| 85. 10. 2 | 3.1 | 7.1 | 1.7 | 0.6 | 1.8 | 2.2 |
| 85. 10. 8 | 2.2 | 7.3 | 1.9 | 0.48 | 1.8 | 1.9 |
| 85. 10. 13 | 22.3 | 7.5 | 1.9 | 1.3 | 2.2 | 3.6 |
| 85. 12. 2 | 6.3 | 7.4 | 2 | 1.7 | 2 | 5.3 |
| 85. 12. 18 | 25.3 | 7.5 | 2.2 | 2 | 2.5 | 4.6 |
| 86. 1. 10 | 8.1 | 7.2 | 1.75 | 1.56 | 2 | 4.5 |

3-5 模擬實場 PDA 連續監測

為了探討 PDA 在實場的連續監測操作情況的可行性，因此我們模擬現場可能發生加藥系統故障的狀況，在圖 6 所示。進流原水的濁度為 18.7 NTU，開始 0~20 分鐘之間加藥量維持 0.5 mg/l，Ratio 值由 0.5 微微上昇至 0.6 左右，20~40 分鐘之間加藥量調至 1 mg/l，Ratio 值上昇至 1.4~1.5，40~60 分鐘之間加藥量維持 1.5 mg/l，Ratio 值上昇至 1.8~1.9，60~80 分鐘之間加藥量調至 2 mg/l，Ratio 值上昇至 2.0 左右，而在 80~100 分鐘之間將加藥機關閉，加藥量為 0 mg/l，Ratio 值在 3 分鐘裡面便降至 0.6~0.5，100~120 分鐘之間加藥量又調回至 2.0 mg/l，Ratio 值急速上昇 2.0 左右，120~140 分鐘之間再將加藥機關閉，Ratio 值又再度下降，在 140~160 分鐘及 160~180 分鐘之間，又改變加藥量，而 Ratio

值依舊做出合理的反應。而連續監測出流水的濁度，可以發現在 Ratio 值上昇的區間，所對應區間的出流水濁度會緩緩下降，而在 Ratio 值下降的區間，所對應區間的出流水濁度會緩緩上昇，但變化的趨勢較為緩和，並不如 Ratio 值變化明顯。由圖 6 可以知道利用 PDA 在原水進流快混階段來監測其混凝行為，其 Ratio 輸出值能夠合理的反應出膠羽聚集情況，而其延遲時間包括水樣流過層流管所需的時間加上儀器反應時間，大約為 2.5 分鐘至 3 分鐘之間。

四、結論

1. 原水濁度的變化，PDA 光纖膠羽偵測系統亦能正常反應，即使在原水高濁度的情形下，PDA 的操作情形依舊良好。
2. PDA 的 Ratio 值能清楚的指出在不同攪拌強度下，生成膠羽特性的不同，但是對於快混攪拌強度的改變，利用 PDA 所得到的最適加藥量仍然相同。
3. PDA 的 Ratio 值能清楚的指出在不同 pH 值的情況下，生成膠羽特性的不同。
4. PDA 的輸出值可以正確地指示出混凝膠羽生成的特性，並可依 Ratio 輸出值達到最大時所對應之劑量認定為混凝最適劑量。而利用 PDA 所控制的加藥量比現場實際的加藥量更能達到經濟有效的效果。
5. PDA 作現場模擬連續混凝監測，在加藥不足或加藥機故障停止的情況下，PDA 能在短時間內做出明顯的反應。

五、致謝

本文係台灣省自來水公司委託研究計畫成果之一部份，作者對自來水公司之經費補助及豐原給水廠林寬仁廠長暨同仁於研究期間所提供之協助，敬致謝忱。

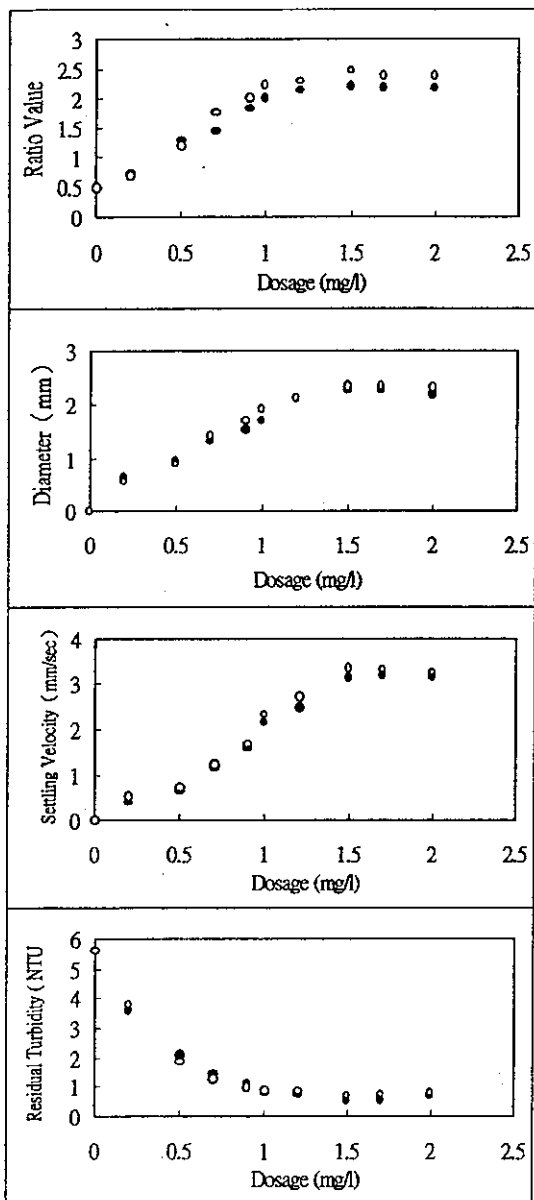


圖5 不同pH情況下，PACl加藥量與(1)Ratio值(2)膠羽粒徑(3)膠羽沉降速度(4)殘餘濁度之關係(原水濁度為5.6 NTU, pH值為7.8 ; ○: pH 7; ●: pH 7.8)

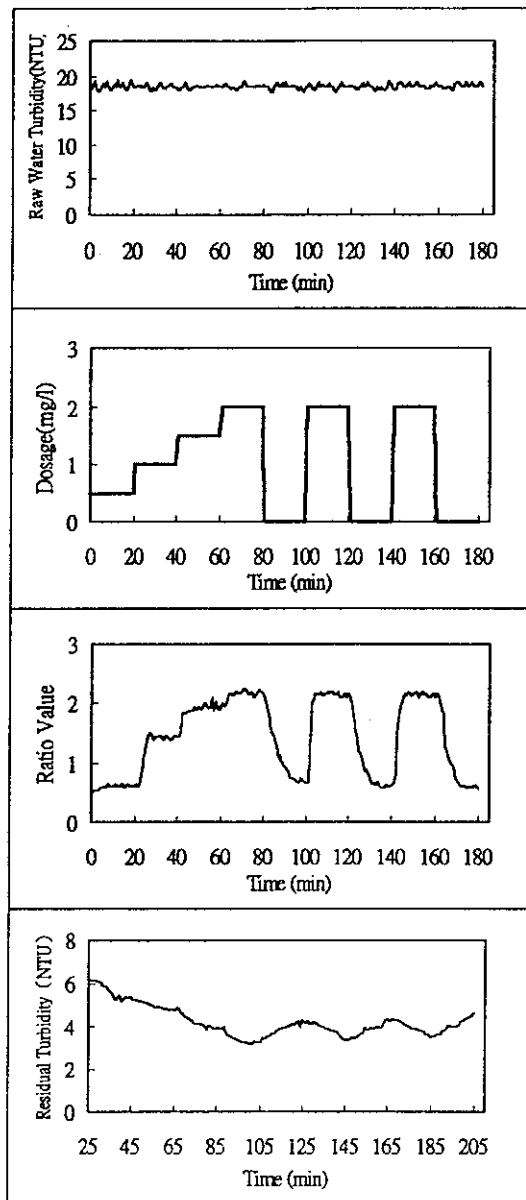


圖6 連續式PDA模型槽模擬現場加藥監測試驗(原水濁度為18.7 NTU)

六、參考文獻

- Ching H. W., Tanaka T. and Elimelech M. (1994). Dynamic of coagulation of clay particles with ferric chloride. *Wat. Res.*, **28**, 559-569.
- 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.
- Esienlauer J. and D. Horn (1987). Fiber-optic on-line flocculant dose control in water treatment operations. *Colloid and Surfaces.*, **25**, 111-129.
- Gregory J. and Nelson D. W (1984). A new optical method for flocculation monitoring. In *Solid-liquid Separation* (Edited by Gregory J.) Ellis Horwood Chichester, pp172-182.
- Gregory J. (1985). Turbidity fluctuations in flowing suspension. *J. Colloid Interface Sci.*, **105**, 357-372.
- Gregory J. (1987). Laminar dispersion and the monitoring of flocculation processes. *J. Colloid Interface Sci.*, **118**, 397-409.
- 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.
- Matsui Y. and Tambo N. (1991). Online floc size evaluation by photometric dispersion analyzer. *Water Supply*, **9**, 71-78.
- Matsui Y., Ohto T., Tambo N. and Zaitzu Y. (1993). Dual wavelength photometric dispersion analyzer of coagulation and flocculation. *Wat. Sci. Tech.*, **27**, 153-165.
- Photometric dispersion analyzer PDA2000 operation manual, Rank Brothers Ltd., Cambridge, U.K.
- 黃志彬，陳國聲及吳志超"應用光纖偵測技術決定混凝加藥量之研究" 第十一屆自來水研究發表會，pp87-105，台北，民國八十三年十一月。
- 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，pp63-79，台中，民國八十四年十一月。