

# 自來水配水管線中餘氯消耗速率之研究

## Chlorine Residue Decay in the Drinking Water Pipe

李連堯\* 盧重興\*\* 陳強毅\*\*\*

### 摘要

餘氯被公認為研究自來水配水系統水質污染之最好依據。自來水在到達用戶前的水質優劣受餘氯濃度影響甚大，餘氯在自來水送達消費者前必須維持足確保水質安全濃度以上，因此研究餘氯在配水管中之消耗速率並預估餘氯濃度實屬必要之研究。

本研究的主要目的是以批次實驗方式，分別測試餘氯在玻璃、PVC、鑄鐵三種不同管材下之消耗速率，並進一步探討酸鹼度、溫度及最初餘氯濃度，對水中餘氯消耗的影響。另外，以PVC配水管網進行模擬試驗，嘗試找出於特定水力停留時間下自來水中及管壁對餘氯消耗的影響，並建立一可預估餘氯在配水管網中消耗速率之模式，做為將來實場水質監測的依據。由批次試驗結果可知，水中餘氯在鑄鐵管的消耗速率最大，PVC管材次之，玻璃管最小。另外，溫度的上升及pH值的降低均會加速餘氯的消耗。由連續流試驗結果顯示，當水力停留時間為1小時，自來水中總餘氯反應速率(k)為 $2.61 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 且管壁的消耗速率( $V_d$ )為 $1.13 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。將此二參數值代入餘氯消耗模式中可以準確地預估餘氯濃度在配水管線中的變化情形。

### 壹、前言

自來水配水系統的目的，乃是為了傳送安全、量足、高品質的飲用水給消費者，由歷史的發展及相關的文獻可知(Forontinus, 1973)，公共自來水供給設施除了和鄉村的成長及城市的發展有實質的影響外，其所供應的水質更與人體健康有直接的關係。然而要避免自來水水質受到污染，除了要做好水源的保護與提高淨水廠處理技術外，如何有效的控制自來水在配水管線中的水質，乃為當前自來水事業急需解決的重要課題之一。

現今的淨水廠，為了防止自來水於配水管線中水質的變化，故在離開淨水廠前都經過加氯消毒，確保水質安全。然而，自來水一旦離開淨水廠，進入配水管線後，由於管線本身的複雜性及維修的困難，使得餘氯於管線中迅速的被消耗，進而威脅到水質安全(Geldreich et al., 1972; Allen et al., 1980; Schch, 1990)。以八十二年為例(台灣省自來水事業統計年報，民國83年)，各淨水廠水質，大多能夠符合臺灣自來水水質標準，但是八十二年度各級環保、衛生單位對於各種公共飲用水水質抽驗結果，不合格率仍偏高，顯示自來水水質在配水系統中受到二次污染(環境保護統計年報，民國83年)。

\* 國立中興大學環境工程學系研究所博士班

\*\* 國立中興大學環境工程學系教授

\*\*\* 國立中興大學環境工程學系學士

本研究的主要目的是以批次試驗方式，分別測試餘氯在玻璃、PVC、鑄鐵三種不同管材下之消耗速率，並進一步探討酸鹼度、溫度及最初餘氯濃度，對水中餘氯消耗的影響。另外，以PVC配水管網管進行模擬試驗，嘗試找出於特定水力停留時間下自來水中及管壁對餘氯消耗的影響，並建立一可預估餘氯在配水管網中消耗速率之模式，做為將來實場水質監測的依據。

## 貳、配水系統中餘氯消耗之原因

### 一、物理性因子

#### 1. 水溫

水之溫度對衛生上沒有影響，歐美人民喜歡飲冷水，故較為重視。自來水最適合飲用之溫度在攝氏 4 ~ 10 度，高於此溫度，將降低美味。而自來水之溫度常受配水管位置深淺所影響。按一般經驗法則，溫度每增高 10 °C，反應速率則增加一倍。電極電位（任何腐蝕反應之趨動力）正比於絕對溫度，由此觀點，腐蝕速率隨溫度升高而增加。另外，溫度升高亦有助於管壁生物膜的繁殖，這些效應在小心控制的實驗可觀察到，但在實際的情況下則不易發覺，除非溫度變化很大。在配水系統中，因溫度變化有限，這種因溫度變化引起腐蝕與生物膜繁殖的現象，不易察覺。

#### 2. 管材

在配水系統中所使用的管材，它們本身亦會對餘氯有一定的消耗，而實際上的消耗速率要視乎管材、管徑及管齡等因素而定。

Sharp et al.(1991)研究指出，在相同的管徑、長度下，鑄鐵管對餘氯的消耗速率比PVC管大，這是由於自由餘氯會與鐵離子反應生成不溶性氫氧化鐵；另外，Sharp et al.(1991)亦指出，就算是採用相同的管材，餘氯在管徑較小的水管中其消耗速率要比在管徑較大的水管中來得大，原因是在相同的流量下，管徑較大的其水力半徑亦較大，所以在水中的餘氯會減低與管壁的接觸機會；而管齡的增加，會使得管壁的腐蝕及損毀增加，同時這些地方亦提供了生物膜的生長，增加餘氯的消耗速率。

#### 3. 水流速度

配水管中有時需要一些保護處理，例如形成一積垢(scale-forming)或含某種抑制劑(inhibitors)。在高流速時，除稀釋效應大外，另有助於具有保護性物質以較高的傳輸速率傳送到管壁表面形成保護性被覆(coating)。但在高流速時，則會有沖蝕腐蝕或衝擊管壁的現象發生，此時保護管壁之被覆或管材由於這種機械作用力而被侵蝕。這種高流速時所產生之腐蝕現象會對管材造成很大的破壞。另一方面，高流速造成腐蝕速率加快，可歸究於增加中溶氧與管壁之接觸速率。氧氣在決定腐蝕速率時扮演重要的角色，因其直接參與腐蝕過程中的一系列化學反應。

在非常低流速時，也會對配水系統造成結垢。在配水管與衛生設備中，若有停滯流

發生時，會加速水管水垢 (tuberculation) 和穿孔 (pitting) 等問題，特別是在鐵管內，此外同時會有生物膜生長，因此管線死角 (dead end) 區應減少。

#### 4. 管型

配水系統幾何形狀對流速分布亦有很大的影響。配水管系統中有許多孔穴 (腐蝕、接頭處)、阻礙物 (沈澱物)、彎管、分支管與 T 型管等，會使整個配水系統變的複雜。而產生的分離流、旋轉流和停滯流等易造成懸浮微粒沈積的地區 (Lu, 1991)。另配水管在其兩接頭銜接處的空隙，形成所謂孔穴 (cavity)，於配水管網中為細菌提供了一處保護與棲息的空間，使各種細菌在其中繼續生存增殖，對水質變化造成威脅。

## 二、化學性因子

### 1. pH 值

在溫度及最初濃度都固定下，改變 pH 值可以說是在改變次氯酸 (HOCl) 與次氯酸離子 (OCl<sup>-</sup>) 於水中之百分比。由文獻中可知 (Sawyer and McCarty, 1985)，若 pH 值偏低時，水中的 HOCl 佔優勢，此時之消毒能力會較強，即表示餘氯消耗速率會較快。反過來說，若 pH 值較高時，水中將以 OCl<sup>-</sup> 較佔優勢，故消毒能力會較 pH 低時為弱，故餘氯消耗速率相對的會較慢。所以，pH 值在餘氯的消耗中扮演著重要的角色。

### 2. 氯

當氯加入水中後，會生成 HOCl 與 OCl<sup>-</sup>，若水中含有氨的時候，會生成一氯胺、二氯胺及三氯胺，它們全都屬於氧化劑，並籍著氧化其他物質而達成消毒效果。一般一氯胺、二氯胺與三氯胺稱為結合有效餘氯 (combined available chlorine)。它們亦具消毒能力，但因反應相當慢，故會使總餘氯的消耗速度減低。而與蛋白質、胺基酸所結合之氯胺化合物，其消毒能力及消耗速度則更低。至於三氯胺由於需於低 pH 值時生成，所以於一般中性 pH 值下，其含量相當有限。

### 4. 有機物質

氯於水中可與有機質 (如腐植酸，humic acid) 反應形成一些消毒副產物，如三鹵甲烷類 (THMs)，包括氯仿 (CHCl<sub>3</sub>)，二溴一氯甲烷 (CHBr<sub>2</sub>Cl)，一溴二氯甲烷 (CHBrCl<sub>2</sub>) 及溴仿 (CHBr<sub>3</sub>) 等致癌物質。這些副反應的發生會將氯的消毒作用複雜化，並使得氯必需先滿足這些物質的需求量，才能發揮其消毒能力。也正因此，若水中有這些物質存在時，餘氯的消耗速率會更快，而使管線中自來水的水質不易維持。

### 5. 其它物質

Costello (1984) 指出自來水在離開淨水廠後，水中所含之化學物質可能會與配水管發生反應，因此，雖然水已經過處理，但仍在配水系統中發生有某種化合物沈澱之現象，稱為輸出水之沈澱 (postprecipitation)。配水系統內有各種型式的輸出水沈澱反應，包括碳酸鈣沈澱，鐵 (腐蝕)、鉛、鋅、鋁、鎂、錳、聚合電解質及微生物生長。這些物質的生

成不但造成管材的改變、水質的惡化、更會以還原物的形態和餘氯反應，使自來水雖在淨水場處理完後添加了足夠的餘氯，但到用戶時早就消耗完畢。

### 三、生物性因子

自來水淨水廠所使用的簡單消毒並不能有效地防止各種微生物，如藻類、原生動物及昆蟲幼蟲等進入配水系統中。由 Nagy et al. (1985) 的報告中明白的指出配水管網中 1~2mg/L 的自由餘氯無法阻止洛杉磯配水系統中生物膜的生長。而這些物種上只要是有較強抵抗力的菌種，都可在配水管網中發現。當微生物細胞附著於配水管管壁並增殖形成一層膜狀或黏泥狀物質時稱為生物膜(biofilm)。在進入配水管數秒鐘內，就會有大顆粒被吸附、沉降到管壁上。這些微生物可利用吸附到管壁上的大分子，以獲得營養源。而這些微生物的出現不但使水質惡化，且加速了餘氯的消耗，增加了水質及管線的維護作本。

### 參、餘氯消耗速率之理論研究

#### 一、一階反應速率模式

餘氯在配水管線中的消耗，主要是與自來水中物質或生長於管壁上微生物反應。以往大部分研究皆以一階反應速率  $k$  值來表示餘氯在配水系統中之消耗速率 (Hunt, 1988; Hart, 1991; Sharp et al., 1991; Wable et al., 1991)，並可以下式表示：

$$\frac{d[Cl_2]}{dt} = -k[Cl_2] \quad (1)$$

由(1)式可得：

$$\ln[Cl_2] = \ln[Cl_2]_0 - k \times t \quad (2)$$

經整理後可得：

$$[C] = [C_0]e^{-kt} \quad (3)$$

#### 二、同時考慮餘氯在自來水中與管壁消耗之模式

一階段反應速率模式雖然非常簡單，但是無法明確描述餘氯在管壁消耗之情形。有鑑於此，Lu(1991)建立一同時考慮餘氯在自來水中與管壁消耗之模式。圖1為圓柱形水管控制體積(control volume)示意圖。考慮水流在穩定狀態下，由質量平衡可得：

$$\frac{\partial}{\partial x} (U_{av} f(r) C) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{dC}{dr} \right) - kC \quad (4)$$

若在流況均勻的情況下 ( $f(r^*)=1$ )，假設延散係數(D)與平均流速( $U_{av}$ )為一固定值並忽略軸向延散項，將上式(4)無因次化後得

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{A_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) - A_1 C \quad (5)$$

其中

$$C = \frac{C^*}{C_0^*} ; x = \frac{x^*}{L} ; r = \frac{r^*}{r_0^*} ; A_0 = \frac{\pi L^* D}{Q} ; A_1 = \frac{kL^*}{U_w}$$

而其邊界條件為：

$$\begin{aligned} x=0, C=1 & \quad \text{當 } 0 \leq r < 1 \\ r=0, \frac{\partial C}{\partial r} = 0 & \quad \text{當 } 0 \leq x \leq 1 \\ r=1, \frac{\partial C}{\partial r} = -\frac{V_d r_0^*}{D} C = -A_2 C & \quad \text{當 } 0 \leq x \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 為三個無因次化參數，其控制方程式(5)的解析解。 $A_0$ 與徑向擴散、管長及流量有關，在物理上它是代表徑向擴散對水中餘氯分佈的影響。 $A_1$ 為考慮自來水中水質本身對餘氯消耗的影響， $A_2$ 則是代表管壁對餘氯濃度的影響。

接著利用變數分離法(Separation of variables method)，方程式(5)的數學解析解可以表示如下：

$$C(x, r) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n J_0(\lambda_n r) J_1(\lambda_n)}{(\lambda_n^2 + A_2^2) J_0^2(\lambda_n)} \times \exp[-(A_1 + \lambda_n^2 A_0)x] \quad (7)$$

接著，考慮混杯濃度(mixing cup concentration)的定義：

$$C_w(x) = \int_0^1 2C(x, r) r dr \quad (8)$$

將方程式(7)代入方程式(8)中， $C_{av}(x)$ 可以表示成：

$$\begin{aligned} C_{av}(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_1^2(\lambda_n)}{(\lambda_n^2 + A_2^2) J_0^2(\lambda_n)} \times \exp[-(A_1 + \lambda_n^2 A_0)x] \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A_2^2}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + A_2^2)} \times \exp[-(A_1 + \lambda_n^2 A_0)x] \end{aligned} \quad (9)$$

方程式(9)中，若乎略了管壁的消耗現象( $V_d$ 趨近於零)，則方程式(9)可以簡化為：

$$C_w = \exp(-A_1 x) \quad (10)$$

為了修正方程式(10)與方程式(9)的誤差，可以引入一修正因子 $\varepsilon$ ：

$$C_w = \frac{\exp(-A_1 x)}{(1 + \varepsilon)} \quad (11)$$

而其中  $\varepsilon$  的修正因子可利用  $A_0$  及  $A_2$  計算出來，如下：

$$\varepsilon = 2.4416A_0A_2 - 0.1559A_0A_2^2 \quad 0.01 \leq A_2 \leq 10 \quad (12)$$

$$\varepsilon = 10.105A_0 + 0.0014A_2 + 0.31A_0^2A_2 \quad 10 \leq A_2 \leq 100 \quad (13)$$

如此，當  $A_0$ 、 $A_1$  及  $A_2$  由實驗求得後，則可利用方程式(9)預測出配水管網中各點的餘氯濃度。

## 肆、實驗材料與方法

### 一. 實驗設備

#### 1. 批次實驗反應器

反應器主體為圓柱形，分為內外二層，內層為管材，直徑 108 mm、高度 190mm；外層為壓克力膠，直徑 150 mm、高度 210mm；而鑄鐵及 PVC 管材厚度 5 mm，為了解自來水中水質本身對餘氯的影響，另外加做了厚度 4 mm 的玻璃管材；反應器並有進水及出水口各一個，為恆溫水之出入口，作為控制溫度之用。反應器頂端設有馬達一台，為攪拌水樣之用；另於反應器上部設有兩個圓形採樣口。(見圖 2)

#### 2. 配水管網實驗設備

本實驗設備是以 PVC 當管材，其管徑為 20mm (內徑)，整個系統共 16 個迴圈，每一圈長為 400cm，由四段水管組成，各為 120、80、120 及 80cm。每段以彎管銜接，形成 16 個連續迴圈系統，全長 6000cm。管線上各採樣口及餘氯監測器 (sensor) 皆配置於同一面上，以便測量。監測器(ROSEMOUNT MODEL 1054A TFC)為全自動監測水中餘氯設備，全管線共設三處(見圖 3)。

## 二、餘氯分析方法

### 1. 分析儀器

本實驗採用 HACH 公司出產之攜帶型分光光度計(POCKET COLORIMETER)。此儀器採用 DPD-比色法，可測定自由餘氯及總餘氯，其有效測定範圍為 0.01 - 2.20 mg / L。

### 2. 分析步驟

- (1) 取 10 ml 水樣，倒入石英管中。
- (2) 放入儀器中，把蓋子蓋緊及歸零。
- (3) 取出石英管，並倒入自由餘氯 DPD 顯示劑，蓋緊及搖晃約 20 秒鐘。
- (4) 放入儀器中，靜止約 1 分鐘，然後開啓儀器，讀取顯示數據。
- (5) 測量總餘氯，重複步驟(1)至(5)。

### 三、實驗操作條件

#### 1. 批次實驗

為使本實驗具有本土化意義，本實驗之操作條件是以水溫 23 °C、pH 值為 7.0、初始餘氯濃度為 1.1mg/L 為基準。而在的溫度影響研究上又加了條件 28 °C、31 °C 及 35 °C；在 pH 值的影響研究上又考慮了 6.0、8.0 及 9.0。在水中餘氯濃度上，根據台灣省自來水水質標準，水中自由餘氯濃度不應超過 1.5 mg/L，因過高之餘氯量會引起使用者不適及管線之腐蝕。但是為了解初氯量對餘氯消耗的影響，實驗操作條件中採用兩種初始餘氯濃度，分別為 2.0mg/L 及 1.1mg/L。

在實驗的實驗方面，本實驗的實驗採樣分析水樣取自於自來水公司第四區管理處的龍井淨水廠，其水源為地下水。在加氯消毒上，是利用前加氯程序的方式以自動加藥機自動加入次氯酸鈉，而達到消毒的效果。在實驗當天水溫為 24.9 °C、pH 值為 6.9，初始總餘氯為 1.26 mg/L，初始自由餘氯為 1.13 mg/L，實驗時間為早上 9:00 至下午 3:00

#### 2. 配水管管網實驗

流量控制在  $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ，即水力停留時間為 1 小時。以 pH 控制器控制 pH 值在  $7.0 \pm 0.05$ ，入口總餘氯濃度為 1.1mg/L，水溫為 30 °C。

### 伍、結果與討論

#### 一. 實場水樣與實驗室水樣批次試驗結果比較

利用方程式(3)可以得到各種情況下的餘氯消耗速率 k 值。表 1 即為不同管材中，總餘氯及自由餘氯在實場水樣與實驗室配製水樣中之消耗速率結果。

由表 1 中可知餘氯在實場水樣所得之消耗速率都較在實驗室配製水所得之結果為大。這是由於實驗室配製之水樣是以逆滲透水所配製，水中所含的雜質較低所致，也正因此，其所求得之餘氯消耗速率的結果，可以說大部份是由管壁消耗之結果。而現場水樣，雖然其採樣地點為加氯消毒經曝氣槽後之出流水，但由於天然水中含有許多不同物質，如礦物質、微生物等，就算是經過加氯消毒亦不能把所有物質去除，這些物質也會消耗水中餘氯。

而在管材方面，由實驗結果可知不論是實場水樣或是實驗室配製水樣，不論是自由餘氯或總餘氯的消耗速率，均以鑄鐵為最大，PVC 次之，玻璃最小。這結果除了和 Sharp et al.(1991)研究一樣外，也了解到鑄鐵管材的配水管對水質的維護不易。另外，表 1 也說明了不論是那種管材，自由餘氯的消耗速率均比總餘氯的消耗速率快，而造成此差異可以歸因於結合餘氯其反應性比自由餘氯小，而此也再次證明了轉折點加氯對配水管中水質維護的重要，對於這方面的討論可以參考 Lu et al.(1993)。

## 二. 不同操作條件下批次實驗結果

### 1. 溫度

表 2 為在 pH7 及總餘氯濃度 1.1 mg/L 下，改變溫度所得之餘氯消耗速率；表 3 為在 pH9 及總餘氯濃度 1.1 mg/L 下，改變溫度所得之餘氯消耗速率。從這兩個表中可發現溫度的提高，對自由餘氯或總餘氯的消耗速率都有明顯的提升。

另由表 2 中可知，於 pH 值為 7 時，餘氯在鑄鐵管材中消耗速率最大，PVC 其次，玻璃最小。這是因為於溫度的上升會使 HOCl 與 OCl<sup>-</sup> 加速與鑄鐵管壁的鐵離子反應，生成氫氧化鐵(Fe(OH)<sub>3</sub>)，因而使餘氯的消耗速率加快。表 3 則是 pH 值為 9 時之試驗結果，其反應趨勢與表 2 所得之結果相似，但餘氯消耗速率卻沒有在 pH 值等於 7 時那麼大。主要是因為當 pH 值等於 9 時，水中主要以 OCl<sup>-</sup> 存在(約佔 90%)，雖然溫度的上升亦能提升 OCl<sup>-</sup> 的反應速率，但由於其反應能力比 HOCl 低，故其餘氯消耗速率會比在 pH 值等於 7 時小。

接著，為了更進一步求出溫度對餘氯的影響，因此以下分別對各種不同管材之消耗速率常數，求出其溫度校正係數 $\theta$ ，並作討論。

因自來水配水系統大都埋設在地下，故管線內之水溫會比地表之溫度略低一點，從實場所測得未進配水管前之水溫為 24.9 °C，故在求溫度校正係數時以 23 °C 為基準點，而其他水溫變化之消耗速率( $k_T$ )和在 23 °C 下之消耗速率( $k_{23}$ )應有以下之關係：

$$\frac{k_T}{k_{23}} = \theta^{-(T-23)} \quad (14)$$

將方程式(14)兩邊取對數可得

$$\ln k_T - \ln k_{23} = -(T-23) \times \ln \theta \quad (15)$$

由於 T、 $k_T$  及  $k_{23}$  均為已知(見表 3)，代入方程式(15)，迴歸求出各管材之溫度校正係數 $\theta$ 值(見表 4)。

由表 4 所示之 $\theta$ 值可知，無論是總餘氯或是自由餘氯，皆以 PVC 管之值最大，鑄鐵管其次，玻璃最小。這表示水中之餘氯於玻璃管材下受溫度的影響最大，鑄鐵管次之，PVC 管最小，而這可能和各管材的傳導係數有關。

茲將各種管材的溫度校正係數代入方程式(14)中，即可預測餘氯在不同管線之消耗速率隨溫度變化的情形。結果如下：

$$\text{玻璃管材 (總餘氯)} : k_T = 0.0013 \times 0.0561^{-(T-23)} \quad (16)$$

$$\text{玻璃管材 (自由餘氯)} : k_T = 0.0011 \times 0.0178^{-(T-23)} \quad (17)$$

$$\text{PVC 管材 (總餘氯)} : k_T = 0.0066 \times 0.1093^{-(T-23)} \quad (18)$$

$$\text{PVC 管材(自由餘氯)} : k_T = 0.0071 \times 0.1225^{-|T-23|} \quad (19)$$

$$\text{鑄鐵管材(總餘氯)} : k_T = 0.0142 \times 0.0675^{-|T-23|} \quad (20)$$

$$\text{鑄鐵管材(自由餘氯)} : k_T = 0.0204 \times 0.0417^{-|T-23|} \quad (21)$$

## 2. 酸鹼度

表 5 為溫度 28 °C 及最初餘氯濃度 1.1 mg / L 下，改變 pH 值所得之餘氯消耗速率；表 6 為溫度 35 °C 及最初餘氯濃度 1.1 mg / L 下，改變 pH 值所得之餘氯消耗速率；表 7 則為溫度 28 °C 及最初餘氯濃度 2.0 mg / L 下，改變 pH 值所得之餘氯消耗速率。

由表 5 中試程 2 與 3 之比較，可知當 pH 值下降至 6 時，餘氯消耗速率均有明顯的上升。在溫度及最初濃度都固定下，改變 pH 值可以說是在改變 HOCl 與 OCl<sup>-</sup> 於水中之百分比。由文獻中可知(Sawyer and McCarty, 1985)，當 pH 值為 7 時，HOCl 約佔 80 %；而當 pH 值為 6 時，HOCl 約佔 90 %，由於 HOCl 其反應速率比 OCl<sup>-</sup> 高出很多，故 HOCl 濃度的增加即表示會增加其與管壁的反應機會，且酸性的水樣其本身對管材具有腐蝕性，從而使消耗速率增加。另外，再比較試程 3、4 及 5，可以明顯的觀察到消耗速率會隨著 pH 值的升高而減少。因 pH 值為 7 時，HOCl 約佔 70 %；當 pH 值為 8 時，HOCl 下降至約佔 20 %；而當 pH 值為 9 時，HOCl 約只佔 5 %；由此可知提高 pH 值，很明顯會大量減少 HOCl 的百分比，造成自由餘氯之消耗速率減少。

另外，將表 5 中之數據作迴歸，即可得到不同管材中餘氯消耗速率隨 pH 值變化之方程式：

$$\text{玻璃管材(總餘氯)} : y = -0.0005x + 0.0051 \quad (22)$$

$$\text{玻璃管材(自由餘氯)} : y = -0.0006x + 0.0061 \quad (23)$$

$$\text{PVC 管材(總餘氯)} : y = -0.0057x + 0.0515 \quad (24)$$

$$\text{PVC 管材(自由餘氯)} : y = -0.0068x + 0.0624 \quad (25)$$

$$\text{鑄鐵管材(總餘氯)} : y = -0.0057x + 0.0598 \quad (26)$$

$$\text{鑄鐵管材(自由餘氯)} : y = -0.0061x + 0.0667 \quad (27)$$

由表 6 可知，在 35 °C 下，各種管材之消耗速率都會增加，但 pH 值被提高時，它們的餘氯消耗速率仍然會下降，只是下降後的消耗速率仍會比溫度為 28 °C 時的為大。而表 7 為溫度 28 °C；最初餘氯濃度 2.0 mg/L 的條件下增高 pH 值，結果顯示其消耗速率下降幅度比表 6 中的幅度更大。主要是於 pH 7 時，高濃度的最初餘氯量會對管壁產生腐蝕作用，特別是鑄鐵管材。當提高 pH 值至 9 時，主要與管壁反應之 HOCl 大部分都轉換成 OCl<sup>-</sup>，而且因 HOCl 的減少，也使生成氯氣的數量減少，故會減少總餘氯及自由餘氯之消耗速率。另外，較高的 pH 值對管材也具有保護作用(Mark et al., 1993)，故可以減緩餘氯對管材的腐蝕。

### 3. 最初餘氯濃度

表 8 及表 9 為溫度 28 °C ; pH 值 7 及 9 下, 改變最初餘氯濃度所得之消耗速率。從結果中可知提升最初餘氯濃度, 會略為的增加餘氯的消耗速率。主要是因餘氯本身對管材是具有輕微的腐蝕性, 若將最初餘氯濃度提高, 更加會對管材做成衝擊。

## 三. 配水管管網實驗模擬結果

批次實驗的結果中得到一個重要的訊息, 即不論是在 pH 值、水溫、最初餘氯濃度、水質及管材都會影響到餘氯的消耗速率, 故為進一步瞭解餘氯於連續流中之消耗情形試驗時, 上述的這些因素都必須加以小心考慮。本篇報告中除嘗試找出管網中餘氯消耗速率的方法外, 更試著以 Lu 於 1991 年所建立之配水管網解析法去模擬本實驗設備所求得的實驗值。

在流量  $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , 即水力停留時間為 1 小時, pH 值  $7.0 \pm 0.05$ , 入口總餘氯濃度  $1.1 \text{ mg/L}$ , 水溫  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  的條件下, 於穩定之後量測各取樣口的總餘氯濃度。圖 4 是各取樣口距離及位置的示意圖, 表 10 則為各取樣口的總餘氯濃度值。

由表 10 的實驗結果可以獲得  $A_0=74$ , 而由方程式(11)可推得  $\epsilon$  為 0.093 及  $A_1=0.287$ , 接著代入方程(12)求出  $A_2=9.55 \times 10^{-4}$  之後, 再以 IMSL 中的 DBSJ0 及 DBSJ1 的副程式計算出  $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 。最後代入方程式(9)中即可獲得本實驗模擬配水管網中餘氯在各取樣口點的濃度。

圖 5 是餘氯在配水管線中消耗的情形, 其中實線部份是預估值, 符號則為實驗值, 由圖中可知實驗結果與模式預估值非常一致, 而此證明了模式的適用性。另在配水管一開始時餘氯濃度的突然下降, 這可能是因為稀釋作用及與水中物質反應所致。

## 陸、結論與應用

由本研究可知, 自來水中餘氯消耗速率會受 pH 值、水溫、最初餘氯濃度、水質及管材所影響。在溫度影響方面, 溫度愈高則消耗速率愈快, 其中以 PVC 管材的溫度係數最大, 即當外界溫度改變時, PVC 管材中的自來水餘氯較易保持而能維持管線中的水質。在酸鹼問題上, 因鑄鐵的腐蝕, 不但無法有效保護水質, 且管材的本身就是一個二次污染的來源。另外, 值得注意的是, 由本研究發現最初餘氯濃度的大小, 也會影響到餘氯消耗的快慢, 而這原因可能是餘氯本身所具有的腐蝕性及降低 pH 值所致。因此自來水廠在加餘之前因考慮其所加的量, 以免造成反效果。最後本研究中亦證明了只要能計算出配水管線中的  $A_0$ 、 $A_1$  及  $A_2$  三個管線水質參數值, 即可經由 Lu 於 1991 年所建立之配水管網解析方程式, 準確地求出各取樣口的餘氯濃度。

## 誌謝

本研究承蒙國科會經費補助(NSC 85-2211-E-005-023), 特此誌謝。

## 符號說明

$A_0$	: 管線水質參數值( $\pi L D Q^{-1}$ )
$A_1$	: 管線水質參數值( $k L U^{-1}$ )
$A_2$	: 管線水質參數值( $V_d r_0 D^{-1}$ )
$C$	: 最終氯濃度, (mg / L)
$C_0$	: 最初氯濃度, (mg / L)
$C^*$	: 自由餘氯( $\text{HOCl} + \text{OCl}^-$ )的濃度
$D$	: 餘氯在配水管中的延散係數
$L$	: 配水管總長
$f(r^*)$	: 流況參數
	當層流時 $f(r^*) = 2 \left[ 1 - \left( \frac{r^*}{r_0} \right)^2 \right]$ ; 當混流時 $f(r^*) = 1$
$k$	: 反應速率, (1 / sec)
$t$	: 經過時間
$Q$	: 配水管之流量
$U^*$	: 平均流速
$r_0^*$	: 管的半徑
$r^*$	: 距管中心的徑向距離
$x^*$	: 距入流的軸向距離
$V_d^*$	: 餘氯於管壁上的消耗速率( $\text{cm s}^{-1}$ )
$J_0, J_1$	: 為一階的第零類與第一類Bessel 方程式
$\lambda_{ns}$	: 為 $\lambda_n J_1(\lambda_n) = A_2 J_0(\lambda_n)$ 的根

## 參考文獻

- Allen M.T., Taylor R.H. and Geldreich E.E.(1980) "The Occurrence of Microorganisms in Water Main Encrustations," *J. AWWA*, vol.72, no.11, 614-625.
- Costello James J.(1984)"Postprecipitation in distribution system", *J.AWWA*, vol.26, no.6, pp.47-49.
- Forontinus S.J.,97 A.D. The Water Supply of the City of Rome, transl.,C. Herschel, New England Water Works Association, Boston,Mass.,1973
- Geldreich E.E., Nash H.D.,Reasoner D.J., and Taylor R.H.,(1972) "The Necessity of Controlling Bacterial Populations in Potable Waters:Community Water Supply", *J.AWWA*,vol.64, no.9, p.596.
- Hart F. L.(1991)Applications of the net software package.*Proc.Water Quality Modeling in Distribution Systems*,AWWA Research Foundation,3-5 Feb.,Cincinnati,OH,57-75.
- Hunt W. A. (1988) *Distribution Systems Modeling .Bacterial Regrowth in Distribution Systems*(Edited by Characklis W.G.)AWWA Research Foundation ,Denver,CO,pp.43-72
- Lu C. S. (1991) Theoretical Study of Particle, Chemical and Microbial Transport In Drinking Water Distribution Systems. Ph.D. Thesis, University of

Cincinnati, Cincinnati, OH

Lu C., Biswas P. and Clark R.M., (1993), "Modeling of breakpoint reaction in drinking water distribution pipes", *Environment International*, vol.19, no.6, 543-560.

Mark W. Lechevallier, Cheryl D. Lowry and Ramon G. Lee Disinfecting Biofilms in a Model Distribution System. *JOURNAL AWWA*, July 1990, Page87-99.

Montgomery J. M. (1985) *Water Treatment Principles & Design*. Wiley-Interscience, New York.

Nagy L.A., and Olson B.H.,(1985)"Occurrence and significance of bacteria, fungi and yeasts associated with distribution pipe surfaces", *Proceedings of the Water Quality Technical Conference, Houston, Tex.* American Water Works Association. Denver.

Nagy L.A. et al. "Biofilm Composition, Formation and Control in the Los Angeles Aqueduct System." *Proc. 1982 AWWA WQTC*, Nashville, Tenn.

Schck M.R. (1990) "Internal Corrosion and Deposition Control," *AWWA Water Quality and Treatment*, 4th Edition, McGraw-Hill Inc., New York.

Sharp W.W., Pfeiffer J. and Morgan M.(1991) Insitu chlorine decay rate testing. *Proc. Water Quality Modeling in Distribution System*, pp.311-322. AWWA Research Foundation, 3-5 Fed. Cincinnati, OH.

Wable O., Dumoutier N., Duguet J.P., Jarrige P.A., Gelas G. and Depierre J.F.(1991) Modelling chlorine concentration in a network and applications to Paris distribution network. *Proc. Water Quality Modeling in Distribution System*, pp. 77-87. AWWA Research Foundation, 3-5 Fed. Cincinnati, OH.

環境保護統計年報，中華民國，台灣地區，1994。

台灣省自來水事業統計年報，第十六期，民國83年。

Sawyer & McCarty 原著；謝立生、黃建華譯述，“環境工程化學”。

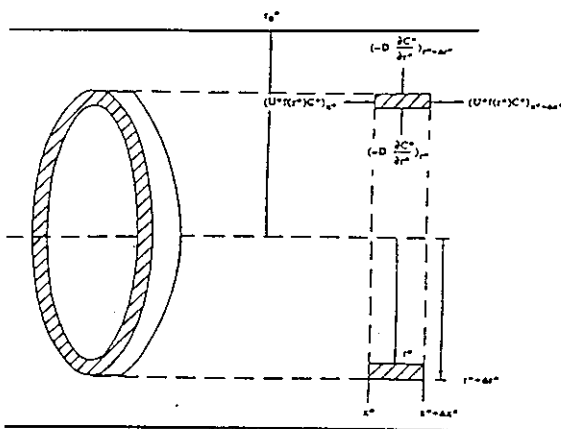


圖1 圓柱形水管控制體積示意圖

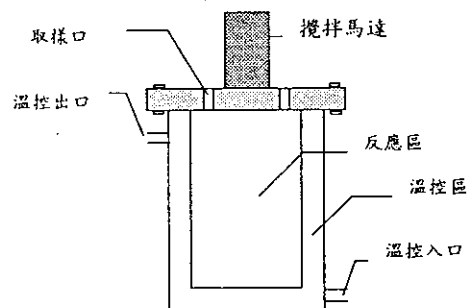


圖2 批次試驗之反應器

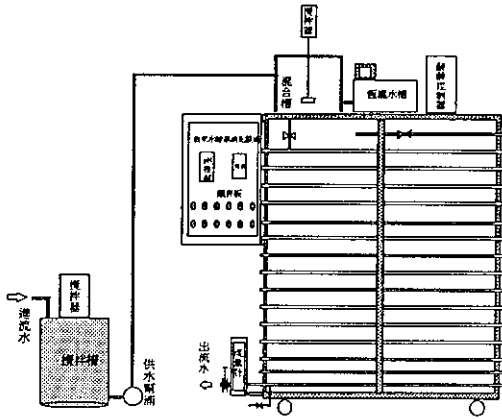


圖 3 連續式流試驗之配水管網設備

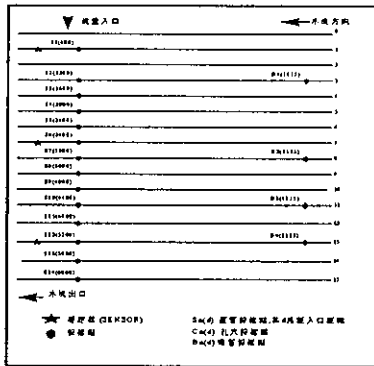


圖 4 配水管網模擬試驗設備之各取樣口距離及其取樣點示意圖

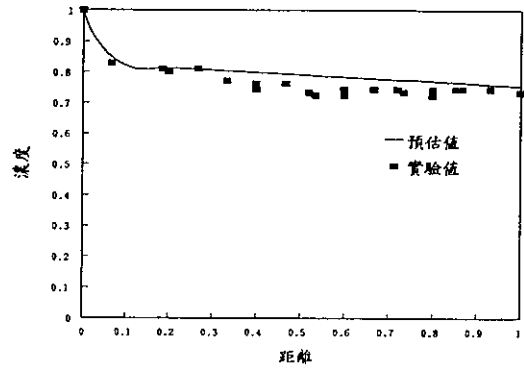


圖 5 水力停留時間 1 小時之總餘氯實驗值與預估値隨距離變化圖

表 1 實驗室與現場水樣於各管材中餘氯之消耗速率

水樣	管材	消耗速率(l/min)	
		總餘氯	自由餘氯
實驗室	玻璃	0.0025	0.0031
	PVC	0.0061	0.0089
	鑄鐵	0.0226	0.0251
現場	玻璃	0.0026	0.0034
	PVC	0.0090	0.0122
	鑄鐵	0.0250	0.0305

表 2 pH=7 及最初餘氯濃度 1.1mg/L 下  
改變溫度所得之餘氯消耗速率結果

試程	水溫	管材	消耗速率 (l/min)	
			總餘氯	自由餘氯
1	23 °C	玻璃	0.0013	0.0015
		PVC	0.0081	0.0091
		鑄鐵	0.0184	0.0243
3	28 °C	玻璃	0.0015	0.0022
		PVC	0.0090	0.0109
		鑄鐵	0.0167	0.0239
8	31 °C	玻璃	0.0016	0.0024
		PVC	0.0109	0.0133
		鑄鐵	0.0197	0.0253
9	35 °C	玻璃	0.0022	0.0025
		PVC	0.0191	0.0253
		鑄鐵	0.0267	0.0318

表3 pH=9 及最初餘氯濃度 1.1mg/L 下  
改變溫度所得之餘氯消耗速率

試程	水溫	管 材	消耗速率 (l/min)	
			總餘氯	自由餘氯
5	28 °C	玻 璃	0.0008	0.0013
		PVC	0.0020	0.0031
		鑄 鐵	0.0098	0.0130
10	35 °C	玻 璃	0.0010	0.0016
		PVC	0.0109	0.0111
		鑄 鐵	0.0184	0.0219

表6 溫度 35 °C 及最初餘氯濃度 1.1mg/L 下改變  
pH 值所得之餘氯消耗速率

試程	pH 值	管 材	消耗速率 (l/min)	
			總餘氯	自由餘氯
9	7.00 ± 0.05	玻 璃	0.0022	0.0025
		PVC	0.0191	0.0253
		鑄 鐵	0.0267	0.0318
10	9.00 ± 0.05	玻 璃	0.0010	0.0016
		PVC	0.0109	0.0111
		鑄 鐵	0.0184	0.0219

表4 pH=7, 最初餘氯濃度 1.1mg/L 之下各管材之  
溫度校正係數  $\theta$  值

管 材	$\theta$ 值	
	總餘氯	自由餘氯
玻 璃	0.0561	0.0178
PVC	0.1093	0.1225
鑄 鐵	0.0675	0.0417

表7 溫度 28 °C 及最初餘氯濃度 2.0mg/L 下  
改變 pH 值所得之餘氯消耗速率

試程	pH 值	管 材	消耗速率 (l/min)	
			總餘氯	自由餘氯
6	7.00 ± 0.05	玻 璃	0.0016	0.0022
		PVC	0.0218	0.0255
		鑄 鐵	0.0207	0.0262
7	9.00 ± 0.05	玻 璃	0.0008	0.0013
		PVC	0.0025	0.0036
		鑄 鐵	0.0103	0.0138

表5 溫度 28 °C 及最初餘氯濃度 1.1mg/L 下。改變  
pH 值所得之餘氯消耗速率

試程	pH 值	管 材	消耗速率 (l/min)	
			總餘氯	自由餘氯
2	6.00 ± 0.05	玻 璃	0.0023	0.0029
		PVC	0.0296	0.0243
		鑄 鐵	0.0278	0.0306
3	7.00 ± 0.05	玻 璃	0.0015	0.0022
		PVC	0.0090	0.0109
		鑄 鐵	0.0167	0.0239
4	8.00 ± 0.05	玻 璃	0.0012	0.0015
		PVC	0.0051	0.0060
		鑄 鐵	0.0136	0.0153
5	9.00 ± 0.05	玻 璃	0.0008	0.0013
		PVC	0.0020	0.0031
		鑄 鐵	0.0098	0.0130

表8 溫度 28 °C 及 pH=7 下改變最初餘氯濃度所得  
之餘氯消耗速率

試程	最初餘氯濃度 mg / L	管 材	消耗速率 (l/min)	
			總餘氯	自由餘氯
3	1.1 ± 0.05	玻 璃	0.0015	0.0022
		PVC	0.0090	0.0109
		鑄 鐵	0.0167	0.0239
6	2.00 ± 0.05	玻 璃	0.0016	0.0022
		PVC	0.0218	0.0255
		鑄 鐵	0.0207	0.0262

表 9 溫度 28 °C 及 pH=9 下改變最初餘氯濃度所得  
之餘氯消耗速率

試 程	最初餘氯濃度 mg/L	管 材	消 耗 速 率 (l/min)	
			總 餘 氯	自 由 餘 氯
5	1.1 ± 0.05	玻 璃	0.0008	0.0013
		PVC	0.0020	0.0031
		鑄 鐵	0.0098	0.0130
7	2.0 ± 0.05	玻 璃	0.0008	0.0013
		PVC	0.0025	0.0036
		鑄 鐵	0.0103	0.0138

表 10 配水管網模擬試驗各取樣點餘氯之濃度

取樣點	取樣距離	取樣時間	總餘氯濃度
in	0	0	1.01
S1	400	4.5	0.87
B1	1115	12.6	0.85
S2	1200	13.6	0.84
S3	1600	18.1	0.85
S4	2000	22.7	0.81
C1	2395	27.1	0.80
S5	2400	27.2	0.78
S6	2800	31.7	0.80
B2	3115	35.3	0.77
S7	3200	36.3	0.76
C2	3595	40.7	0.78
S8	3600	40.8	0.76
S9	4000	45.3	0.78
B3	4315	48.9	0.78
S10	4400	49.9	0.77
C3	4795	54.3	0.76
S11	4800	54.4	0.78
B4	5115	58.0	0.78
S12	5200	58.9	0.78
S13	5600	63.5	0.78
C4	5995	67.9	0.77
S14	6000	68.0	0.77