

論 文

Jar-Test를 이용한 凝集劑 注入率 決定에 관한 實驗研究

The Experimental Study of Predicting Optimum Dosage of PAC Using Jar-Test Results

金 弘 石*1) · 金 成 憲**

Kim, Hong Seog · Kim, Seong Heon

Abstract

In this experimental study, it is concerned to develop a simple equation using jar-test results in order to predict the optimum dosage of coagulant, PAC(polyaluminum chloride). Considering the relationships with the reactions of coagulation and flocculation, the four independent variables (e.g. turbidity, temperature, pH and alkalinity) are selected out of many parameters and they are put into calculations to develop an equation by means of multi-regression method.

As the result, the dosing rate of PAC is proportional to turbidity, pH and alkalinity, but in inverse to temperature. And the developed equation is as follow,

$$D_c = \frac{3.2 \cdot T^{0.37} \cdot A^{0.04} \cdot P^{0.5}}{t^{0.1}}, \quad (R^2=0.9443)$$

And also, comparing between the estimated value from the equation and the real dosing rate in the plant, Kwangam and Tdukdo, during 1988~1991, it is represented an agreement having a relative error of 16.4%, 17.8%, respectively.

제 1 장 序 論

水中의 탁질을 除去하는 固·液 分離操作에는 濾過, 沈澱, 遠心分離 등 여러가지 方法이 있으며, 上水道의 각 淨水場에서는 凝集劑에 의한 응집·침전조작을 주로 實施하고 있다. 실제 淨水處理에 있어서의 凝集效果는 탁도 誘發物質의 量과 種類, 粒子의 크기, 特定 이온의 存在與否, pH, 알칼리도 등에 影響을 받게 된다.¹⁾ 그러나 현재 각 淨水장에서 凝集劑 注入率을 결정할 때,

대개 과거의 Jar-Test 결과에 따른 早見表를 原水濁度 및 水溫별로 작성하여 이 表를 基準으로 凝集劑 注入率을 決定하고 있다. 따라서 同一한 탁도의 원수에는 거의 같은 量의 凝集劑가 注入될 수 있고 과거의 注入率이 그대로 適用되는 경우가 있으므로, 동일한 濁度일 때 다른 水質因자가 凝集反應에 미치는 影響이 적절히 고려될 수 없는 短點이 있다.

漢江의 수질은 夏節期에 高濁度, 高水溫이며, 冬節期에는 低濁度, 低水溫인 뚜렷한 特徵을 갖고 있으며, 특히 降水量이 많은 하절기의 알칼리도와 pH는 동절기 보다 매우 낮은 값(알칼리도 15~30mg/l, pH 6.8~7.3)을 나타내는 등

* 서울특별시 수도기술연구소 소장, 공학박사

** 서울특별시 수도기술연구소 연구원

그 변화정도가 매우 커서 凝集處理를 어렵게 하는 原因이 된다.

따라서 本 研究에서는 한강의 水質變動에 따른 凝集處理를 효과적으로 遂行하기 위하여 原水 水質에 따른 凝集劑와 알칼리제 注入率을 Jar-Test를 통해 決定한 후 그것을 一般式으로 만들어 각 淨水場에서 使用할 수 있도록 하였다.

제 2 장 理論的 考察

제 1 절 凝集 理論

水溶液에 약품을 加함으로써 水中의 미세한 分散粒子들을 結合시켜 큰 덩어리로 만드는 것을 凝集이라 하며, 이 凝集體(Agglomerate)는 沈降分離, 浮上分離, 濾過 등의 方法으로 分離할 수 있다.²⁾

凝集의 原理는 콜로이드의 電氣의 特性을 變化시키고, 무게에 대한 表面積의 比를 減少시키므로서 침전이 容易하도록 만드는 것이다. 懸濁粒子의 凝集 Mechanism에는 懸濁液에 분산된 微小의 粒子가 반대의 電荷를 가진 凝集劑에 의해 電荷中和가 일어나, 粒子가 접근할 때 界面電位가 0에 가깝아 低下되어 凝結하기 쉽게 됨으로서 凝集이 일어난다는 荷電中和說^{3,4)}과 懸濁粒子의 表面에 高分子物質이 吸着되어 입자와 입자사이를 架橋의으로 結合하여 凝集을 일으킨다는 架橋吸着說^{5,6)} 등이 있다. 즉, 有機·無機 및 生物 콜로이드는 물에 懸濁될 때 음전하를 띠게 되어 이때 粒子와 반대의 電荷를 가진 物質이 첨가될 경우, 전기적인 中和가 일어나 粒子의 表面電荷는 감소되거나 또는 0이 되기 때문에 다른 粒子가 接近할 때에 쉽게 凝結되는 것이다.

제 3 장 實驗 方法

제 1 절 原 水

原水는 廣岩淨水事業所 및 九宜淨水事業所에 流入되는 原水를 사용하였다.

제 2 절 凝集劑 · 알칼리제

(1) 凝集劑로는 현재 각 淨水場으로 納品되는 水道用 PAC(Al_2O_3 , 10%)를 稀釋하여 試料 1l에

1ml 注入할 때에 原液注入率이 1ppm이 되게 하여 使用하였다.

(2) 알칼리제로는 소석회(CaO 72%) 또는 수산화나트륨(20%)를 稀釋하여 試料 1l에 1ml 注入할 때에 原液注入率이 1ppm이 되게 하여 使用하였다.

(3) 本 實驗에서 凝集劑 및 凝集劑 注入率의 單位로 사용한 ppm은 부피에 대한 백만분율로서 1,000ppm=1ml/l로 定義하였다. 이는 현재 각 淨水事業所에서 편의상 凝集劑 注入率을 부피단위로 사용하고 있으므로 實驗結果와 실제 注入率과의 比較가 容易하도록 하기 위함이다.

제 3 절 Jar-Test

(1) Jar-Test의 條件은 다음과 같다.

急速攪拌: 100rpm-1分, 緩速攪拌: 50rpm-5分, 停置: 15분

(2) 攪拌強度 및 攪拌時間의 決定

凝集劑가 물에 注入된 후 초기의 微小 Floc의 形成은 1~7초 이내에 이루어지지만 그 후의 數分간의 지속적이 緩速攪拌에 의해 좋은 凝集效果를 얻을 수 있다. 그러나 急速攪拌을 持續的으로 하는 것은 오히려 형성된 플록을 破壞시켜 殘留濁度를 增加시키는 原因이 될 수도 있으므로 本 실험에서는 最適 攪拌條件을 決定하기 위하여 急速攪拌速度를 100rpm~150rpm, 攪拌時間을 0.5~2.0분으로 變化시키면서 가장 유리한 條件을 선택하였으며 緩速攪拌의 경우 50rpm에서 3~30분, 沈澱時間은 10~30분까지 段階的으로 變化시켜 攪拌條件을 決定하였다.

(3) 實驗實施 前, 後에 原水의 濁度, 알칼리도, pH, 溫度 등을 測定하여 凝集劑 注入에 따른 變化를 測定하였다.

제 5 절 實驗裝置 및 器機

本 實驗에 使用된 實驗裝置 및 器機는 다음과 같다.

(1) Jar-Tester : 우주과학공사 Model JA

(2) 濁度計 : 美國 HACH社 Model 2100A

(3) pH meter : 日本 CENTRAL KAGAKU社 UC-23 DJGITAL pH/ORP METER

제 4 장 實驗 結果 및 考察

제 1 절 알칼리제 注入實驗

처리하여야 할 原水의 알칼리도가 낮은 경우 凝集劑의 反應條件을 最適의 상태로 維持하고 凝集處理 後에 pH가 지나치게 낮아지는 것을 防止하기 위하여 消石灰 또는 苛性소다 등의 알칼리제를 注入하는 것이 一般化되어 있다. 水中에 注入된 凝集劑는 물과 反應하여 不溶性 수산화물의 沈澱物을 生成한다. 이 때 遊離되는 수소이온이 물의 pH를 低下시키는 要因이 되므로 水中에는 凝集劑에 의해 유리되는 산으로 소모되는 정도 이상의 알칼리도가 존재하여야 한다.

또한 알칼리제는 凝集劑 주입 以前에 注入하는 것이 一般的인 理論⁷⁾이므로 알칼리제 注入 후 처리 對象水의 알칼리도 및 pH변화를 豫測하기 위한 알칼리제 注入實驗을 實施하였다. 소석회 또는 가성소다를 알칼리제로 注入하였을 경우의 알칼리도는 직선적으로 增加하였으며 그 增加率은 알칼리제 種類에 따라 差異를 보였으며 原水의 알칼리도와는 無關한 것으로 나타났다. 이때 알칼리제의 種類에 따라 계산된 알칼리도의 增加率은 表 1에 나타내었다.

本 알칼리제 注入實驗 結果는 上水道施設基準⁸⁾에 提示된 내용과 대체로 잘 符合하였으므로 알

表 1. 알칼리제 1mg/l 주입에 따른 알칼리도 증가율

알칼리제	상수도시설기준	실험 결과
소석회	1.30	1.20
NaOH(20%)	0.25	0.24

表 2. 알칼리제 1mg/l 주입에 따른 알칼리도 및 pH의 변화

알칼리제	알칼리도	pH
소석회	$1.3 D_a + A$	$2.82 + 0.61P + 0.15 \log D_a$ ($R^2 = 0.9573$)
NaOH(20%)	$0.25 D_a + A$	$P \cdot e^{0.006 D_a}$ ($R^2 = 0.9838$)

(여기서, D_a : 알칼리제 주입률, A : 원수 알칼리도, P : 원수 pH)

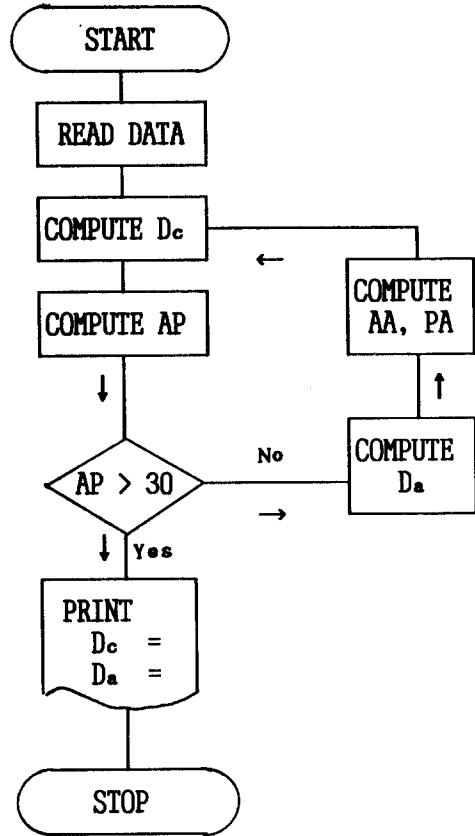


그림 1. 凝集劑 및 알칼리제 注入率 計算을 위한 Flow Chart

칼리제 注入에 따른 알칼리도의 變化를 계산할 때 上水道施設基準의 數值를 그대로 引用하였다. 本 實驗研究에서는 알칼리제 注入에 따른 알칼리도와 pH의 增加程度를 計算할 수 있는 式을 決定하여 表 2에 나타내었다.

또한 表 2에 提示한 式을 이용한 凝集劑와 알칼리제 注入率을 決定하기 위한 Flow Chart를 作成하여 그림 1에 나타내었다.

이 때 處理水의 알칼리도는 最小 30mg/l 이상을 維持하도록 하였는데 그 이유는 凝集劑의 凝集 最適 알칼리도 범위가 30~50mg/l⁹⁾이고, 알칼리도가 낮은 물이 管路의 腐蝕을 促進시키기 때문이다.¹⁰⁾ 또한 우리나라의 飲用水 水質基準에는 없지만 EC(유럽 공동체)의 飲用水 水質基準에는 물의 最小要求濃度(Minimum Required Concentration)로서 30mg/l 이상의 알칼리도¹¹⁾

를 維持하도록 정하고 있는 것을 考慮하였다.

제 2 절 水質因子와 凝集劑 注入率과의 關係

2-1. 原水의 濁度와 凝集劑 注入率

凝集劑 注入率을 決定할 때에 考慮하여야 할 事項중 가장 중요한 水質因子는 原水濁度이므로 本實驗에서는 原水濁度와 凝集劑 注入率과의 關係를 먼저 考察하였다.

本 實驗에서 凝集劑로 使用한 PAC는 適定 注入率 範圍가 넓고 저수온, 저탁도 또는 고탁도와 같은 處理하기 어려운 境遇에도 比較的 凝集效果가 좋았다. 原水濁度의 增加에 따른 凝集劑 注入率의 變化는 그림 2에 나타낸 바와 같이 濁度 增加에 따라 指數函數의으로 增加하는 形態를 보이고 있다.

2-2. 原水의 알칼리도와 凝集劑 注入率

原水濁度가 유사한 範圍에 있고 알칼리도가 다른 原水에 대하여 Jar-Test를 實施한 結果를 그림 3에 나타내었다. 凝集劑 注入率은 原水의 알칼리도가 增加함에 따라서 增加하는 것으로 나타났으며, 이는 알칼리제를 使用할 때에 必要量보다 過量으로 注入되는 경우 凝集劑도 그만큼 더 많이 消費되므로 알칼리제 使用에 보다 세심한 注意를 기울여야 한다. 實驗 結果에 의한 PAC

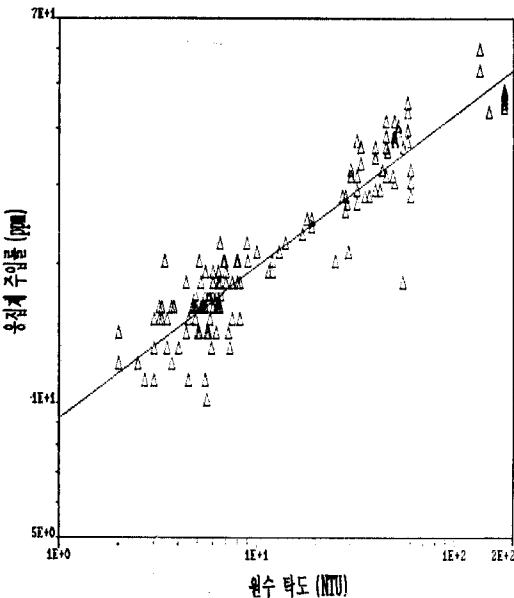


그림 2. 原水의 濁度 變化에 따른 凝集劑 注入率의 變化

1ppm 注入에 對應하는 알칼리도 消費量은 0.16 mg/l(上水道施設基準 : 0.15mg/l)이었다.

2-3. 原水의 pH와 凝集劑 注入率

凝集劑를 주입할 때에 水中의 알루미늄 이온 (Ⅲ)은 물의 pH에 따라 水酸이온(OH-)을 媒體로 하여 分子量이 큰 각종 重合體를 形成하면서 凝集에 參與하므로 응집반응에 있어서 반드시 고려하여야 할 水質因子이다. 그러나 凝集은 수중의 각종 용존이온에 의해서 복잡한 影響을 받므로 실제 pH의 측정만으로 凝集條件을 決定할 수는 없다. 원수의 pH에 따른 凝集劑 注入率의 變化를 그림 4에 나타내었다.

2-4. 原水의 水溫과 凝集劑 注入率

溫度는 物理·化學反應에 있어서 매우 중요한 影響因子中的 하나이다.

O'Melia¹²⁾ 등과 Van Benschoten¹³⁾의 最近 研究에 따르면 溫度는 凝集反應에 있어 매우 중요한 影響因子로서 化學的 特性을 變化시킨다고 하였으며 低水溫은 凝集劑의 溶解度와 加水分解反應의 化學的 性質을 變化시키며 그로 인해 凝集 Mechanism과 凝集最適 pH범위에 影響을 미치게 된다고 하였다. 또한 物理的 現象에 미치는

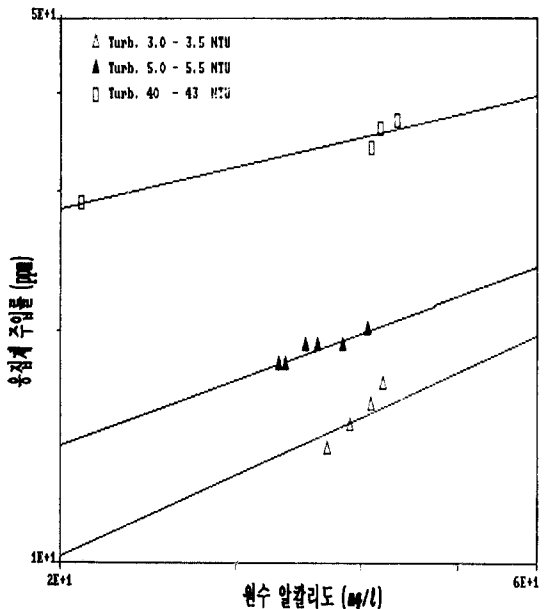


그림 3. 原水의 알칼리도 變化에 따른 凝集劑 注入率의 變化

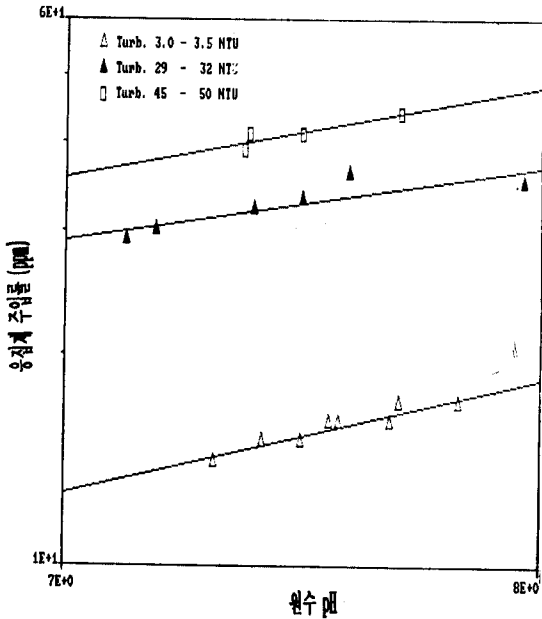


그림 4. 原水의 pH 변화에 따른 凝集劑 注入率의 변화 영향에 대하여 Moris와 Knocke¹⁴⁾는 溫度가 凝集 粒子의 크기 分布에 미치는 실제적인 影響을 發見하였고, Dempsey 등¹⁵⁾은 低水溫에서 Alum을 使用하여 生成된 플록의 沈降速度는 매우 느린 반면 高分子화된(Prepolymerized) 알루미늄 凝集劑로 부터 生成된 凝集物은 水溫에 相關없이 沈降性이 좋다고 하였다. 따라서 PAC를 使用하는 경우가 Alum을 使用하는 경우보다 水溫의 影響이 적은 것으로 알려져 있다.

그림 5는 原水의 수온변화에 따른 凝集劑 注入率의 변화를 圖示한 것으로 原水의 水溫이 增加함에 따라 凝集劑 注入率은 다소 減少하는 경향을 나타내고 있다.

原水가 低水溫, 低濁度의 特徵을 나타내는 冬節期의 경우 凝集된 Floc의 成長狀態가 타계절에 비해 不良하여 沈降에 의한 分離·除去가 困難한 경우가 있다.

제 3 절 凝集劑 注入率式 誘導

3-1. 凝集劑 주입에 관한 一般式

凝集劑 注入率은 대개의 경우 Jar-Test를 實施하여 決定되고 있다. 그러나 실제 水處理에 適用하기 위해서는 處理對象水質에 대하여 即刻的

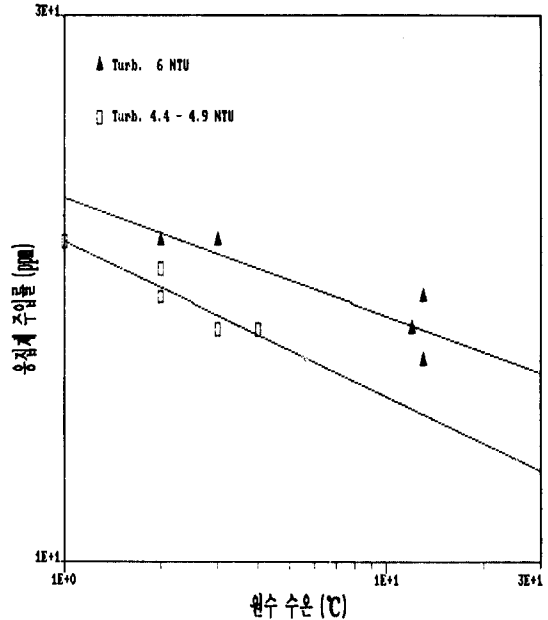


그림 5. 原水의 水溫변화에 따른 凝集劑 注入率의 변화이고 同時的으로 決定되어야 하며, 自動化 시스템에 適用하기 위해서도 數式으로 表現되는 方法이 要求되고 있다.

中村文雄¹⁶⁾은 水質因子와 凝集劑 注入率과의 關係를 나타내는 注入率式을 구하므로 實際 處理現場에서 時間과 努力을 節約할 수 있으며, 水質의 時間에 따른 미세한 變動에도 對應할 수 있다고 報告하였다.

國內에서 金¹⁷⁾은 實驗結果와 각 淨水事業所에서 지금까지 使用하였던 早見表 등을 綜合하여 凝集劑 注入率式을 發表한 바가 있다.

本 實驗에서는 漢江原水에 대하여 濁度, 알칼리도, pH, 水溫 등의 水質因子들과 凝集劑 注入率과의 關係를 실험적으로 究明하여 이들 사이에 指數函數의 關係가 있음을 確認하였다.

3-2. 凝集劑 注入率式의 誘導

本 實驗研究에서 誘導한 凝集劑 注入率式은 Jar-Test에 의해 결정된 凝集劑 注入率과 原水의 水質因子와의 相關關係를 Multi-regression 方法을 利用하여 구한 것으로 다음의 式(1)에 나타내었고 각 水質因子와의 相關關係는 表 6에 나타내었다. 凝集劑 注入率은 原水의 濁도와 가장 높

表 3. 응집제 주입률과 각 수질인자와의 상관관계 (Correlation matrix)

항 목	탁 도	알칼리도	pH	수 온	주 입 률
탁 도	1.0000	—	—	—	—
알칼리도	-0.4719	1.0000	—	—	—
pH	0.2558	0.0645	1.0000	—	—
수 온	0.6475	-0.3036	0.1953	1.0000	—
주 입 률	0.9332	-0.4132	0.2976	0.5076	1.00

은 관계를 나타냈으며, 수온, 알칼리도, pH의 순으로 상관관계가 있었다.

$$D_c = 3.2 \cdot T^{0.37} \cdot A^{0.04} \cdot P^{0.05} / t^{0.1}, \quad (R^2 = 0.9443) \quad (1)$$

여기서,

D_c = 응집제 주입률, (mg/l)

T = 원수 탁도 (NTU)

A = 원수 알칼리도, (mg/l)

P = 원수 pH

t = 수온, (°C, $t > 0$)

제 4 절 실험 결과의 비교·검討

本 실험 연구에서 유도한 실험식으로 부터 구한 응집제 주입률과 실제로 주입된 응집제 주입률을 비교하므로써 실제 현장에서의 適定 주입與否를 검토하였다.

比較 對象 淨水場은 廣岩淨水事業所와 篤도淨水事業所를 選定하였으며 각 정수장의 최근 4년간(1988~1991)의 수질測定置 및 응집제 주입률을 Data로 취하여 실험식에 대입하여 구한 주입률과 比較하여 다음의 그림 6과 7에 나타내었다. 그림 6과 7에서 直線은 淨水場에서 측정된 수질 데이터를 실험식에 대입하여 구한 응집제 주입률을 나타낸 것이고 각 점들은 각각의 계산된 주입률에 대응하는 실제 주입률을 표시한 것이다.

廣岩淨水事業所의 경우 실제 주입률과 실험식에 의한 주입률과는 相對誤差로서 약 16.4%의 差異를 나타내었으며 실험식에 의한 주입률에 대한 실제 주입률의 분포가 전구간에 걸쳐 다소 散漫한 形態를 이루고 있는 것으로 보아 濁度 이외의 要因이 주입률에 影響을 미치고 있는 것으로 생각된다.

그러나 本 실험이 實施되던 1991년도의 실제

주입률과는 12.7%의 誤差範圍 內에서 一致하였다.

篤도 정수사업소의 경우 실제 주입률과 실험식에 의한 주입률과는 相對誤差로서 약 17.8%의 差異를 보였으며 全 區間에 걸쳐 비슷한 크기의 誤差를 갖고 增加하는 樣相을 나타내었다.

이러한 檢證結果로 보아 평상시 수질의 變動이 심하지 않은 상태에서는 실제 주입률과 실험식에 의한 주입률이 대체로 일치하였으나, 많은 양의 응집제가 주입되는 경우 그 差異가 다소 커지는 것으로 보아 주로 하절기의 高濁度 수질상태에 대해서는 다소 一致하지 않았다. 이는 현재와 같은 응집제 주입률 決定方式으로는 수질의 급격한 變動에 대한 적절한 對處가 곤란하다는 것을 나타내는 것이라고 본다. 本 실험 연구에서 誘導한 응집제 주입률 결정을 위한 실험식은 응집反應에 影響을 미치는 주요 수질因자의 變化를 측정하여 시시각각으로 變化하는 原水水質에 따라 迅速하고 正確하게 응집제 주입률을 결정할 수 있도록 하였으며 數식이 간단하여 차후 藥品自動主入裝置를 記置할 때에 주입률을 결정하는데 있어서도 利用할 수 있을 것으로 期待된다.

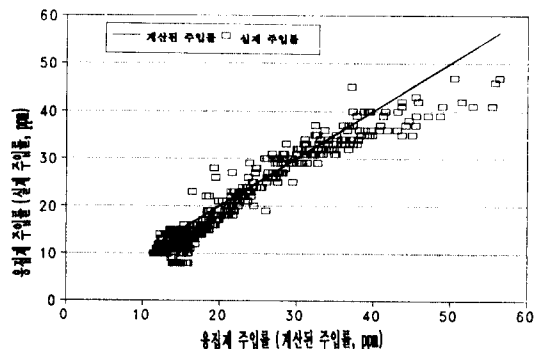


그림 6. 응집제 주입률 비교(광암정수사업소)

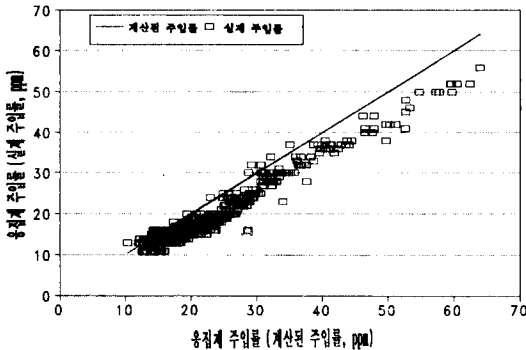


그림 7. 凝集劑 注入率 비교(뚝도정수사업소)

제 5 장 결 論

本 實驗研究에서는 凝集劑 注入率을 결정하기 위한 實驗式을 誘導하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 原水의 水質 變化에 따라 다음과 같은 凝集劑 注入率式을 誘導하였다.

$$D_c = \frac{3.2 \cdot T^{0.37} \cdot A^{0.04} \cdot P^{0.5}}{t^{0.1}}, \quad (R^2 = 0.9443)$$

2. 凝集劑 注入率은 原水의 濁度, 알칼리도, pH와 比例하였고, 水溫과는 反比例의 關係가 있었다. 또한 凝集劑 注入率과의 相關關係는 濁度, 水溫, 알칼리도, pH의 순으로 關係가 있었다.

3. 實驗式으로 부터 구한 結果와 실제 注入率과는 각각 廣岩淨水事業所의 경우 16.4%, 뚝도淨水事業所의 경우 17.8%의 範圍內에서 一致하는 結果를 얻었다.

記 號 說 明

- A : 原水의 알칼리도
- AA : 알칼리제 注入 후 알칼리도
- AP : 凝集劑 注入 후 알칼리도
- D_a : 알칼리제 注入率
- D_c : 凝集劑 注入率
- P : 原水 pH
- PA : 알칼리제 注入 후 pH
- T : 原水 濁度
- t : 原水 水溫

參 考 文 獻

- 1) Black, A.P. and S.A. Hamnah, Electrophoretic Studies of Turbidity removal Coagulant with Aluminum Sulfate, *J. AWWA*, Vol. 53, p. 438 (1961).
- 2) 조영일, 環境管理의 理論과 計算, 環境과 公害, Vol. 4, No. 1, pp.31-37 (1981).
- 3) Clark, J.W., W. Viesman, Jr. and M.J. Hammer, Water Supply and Pollution Control, 2nd Ed., *International Textbook Co.* (1971).
- 4) Overbeek, J. TH. G., *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 58, p. 408 (1977).
- 5) La Mer, V.K. and T.W. Healy, *Rev. Pure Applied Chem.*, Vol. 13, p. 112 (1963).
- 6) Hoeve, C.A.J., *J. Polymer Sci. Part C*, Vol. 30, p. 361 (1970).
- 7) 정규영, 水質變化에 대한 淨水處理의 實驗의 研究, 博士學位論文, 漢陽大學校大學院 (1979).
- 8) 建設部, 上水道 施設基準, 建設部(1984).
- 9) 박중현외, 上水道工學, 동명사(1989).
- 10) Water Quality and Treatment: Handbook of Community water Supplies, *AWWA*, 4th. Ed., McGraw-Hill(1990).
- 11) Michael Carney, European Drinking Water Standards, *J. AWWA*, Vol. 83, No. 6, p. 48(June, 1991).
- 12) O'Melia, C.R. et al., Raw Water Quality, Coagulant Selection, and Solid-Liquid Separation., Preconf. Seminar on Influence of Coagulation on the Selection, Operation, and Performance of Water Treatment Facilities. Proc., 1987 AWWA. Ann. Conf., Kansas City, Mo.
- 13) Van Benschoten, J.E., Separation and Fate of Aluminum in Water Treatment., Doctoral dissertaton, Univ. of Mass., Amherst(1988).
- 14) Juli K. Morris and William R. Knocke

- Temperature Effects on the Use of Metal-Ion Coagulants for Water Treatment, *AWWA*, pp. 74-79 (March, 1984).
- 15) Dempsey, B.A., Willnow, L. and Pagoni, P., Temperature Effects on Coagulation Processes Using Salts of Aluminum Proc. 47th Ann., Mtg. of the Intl. Water Conf., pp. 27-29 (Oct., 1986).
- 16) 中村文雄, 凝集劑注入量の決定方式に関する研究(Ⅱ), 日本水道協會雜誌, 第481號, p. 26 (1974).
- 17) 김원만, 김홍석, 淨水處理에서의 凝集劑 注入率에 관한 研究, 韓國水質保全學會誌, Vol. 5, No. 2, p. 23 (Dec., 1989).
- 18) AWWA Committee Report, Coagulation as an Integrated Water Treatment Process, *J. AWWA*. p. 72 (Oct., 1989).