

Dilution Method에 의한 河川流量測定에 관하여

—On the dilution methods for river-flow measurement—

嶺南大學校工科學助教授

李 舜 鐸
Lee soon Tak

《目 次》	
I. 머릿말	V. 測定精度
II. Dilution Method의 原理	VI. 實測例
III. 混合距離 (Mixing Length)	VII. 結 言
IV. 注入溶液 및 器具	參考文獻

I. 머릿말

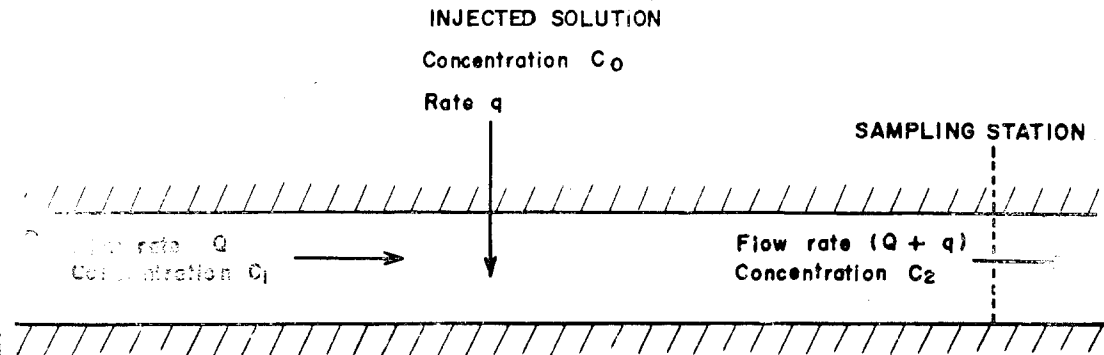
Dilution Method에 의한 河川測量的 測定은 今世紀初까지 별로 行하여 지지 않았으나, 이에對한 研究는 1863년부터 계속되어 왔다. 化學的物質이나 微生物 혹은 Radioisotope를 利用하는 이 方法은 不蘭西, 독일, 영국, 스위스, 이태리 노르웨이, 소련等지에서 많이 使用되고 있으며 특히 不蘭西에서는 河川流量測定에 대개 이 方法을 使用하고 있다.

그리고 英國에서도 Water Resources Board에서 各 River Authority에 이 方法에 의한 河川流量의 測定을 要求하고 있는 중이다.

現在 우리 나라에서 使用되고 있는 流量測定의 方法은 Current Meter, Float 혹은 水理構造物에 의한 測定等이다. 그러나 때로는 이러한 方法에 의하여 流量을 測定할 수 없는 경우가 있다. 流量이 적어서 流速計를 使用할 수 없던가 혹은 流速計를 使用하지 않아야 할 경우에는 이 Dilution Method에 의하여 流量을 測定하는 것이 우리 나라와 같은 狀況下에 있는 河川에 對해서 必要하다고 생각된다.

II. Dilution Method의 原理

流量測定을 위하여 먼저 化學物質 혹은 다른



Tracer를 上流한 地點(Injection Point) 에서 注入하고, 이것이 流下하면서 물과 完全히 混合되었다고 생각되는 下流地點(Sampling Point)에서 試料水를 採取, 分析하여 流量을 求하거나 혹은 直接 물의 Conductivity를 測定해서 流量을 求한다(그림 1) 이때 化學物質의 溶液注入에 있어서는 一定量注入法(Constant rate injection)과 一時注入法(Sudden injection)의 두 가지 방법이 있다.

1) 一定量注入法 (Constant rate injection)

試料採取地點에서 化學物質의 濃도가 一定할 때까지 一定量으로 NaCl, RCl 등의 濃溶液이 注入되어야 한다. (그림-2)

만약 Q: 河川流量 (Cusec)

q: 單位時間當 注入量 (Cusec)

C_0 : 注入濃溶液의 化學物質의 濃度

C_1 : 河川에 自然的으로 存在하는 化學物質의 濃度

C_2 : 試料採取地點에서의 化學物質의 濃度

N: 標準濃度比(Standard dilution ratio)

C_3 : 標準濃溶液에서의 化學物質의 濃度

V: 注入溶液의 容積

이라고 하면

$$q \cdot C_0 + Q \cdot C_1 = (Q + q)C_2$$

$$Q = \frac{C_0 - C_2}{C_2 - C_1} \cdot q$$

일반으로 $C_0 \gg C_2$ 이므로 다음과 같이 쓸수있다.

$$Q = \frac{C_0}{C_2 - C_1} \cdot q$$

低濃度를 測定하는 方法이 注入溶液과같은 高濃度에 대해서는 적합하지 않기 때문에 보통 실험실에서 既知의 標準濃度 C_3 인 溶液을 만들기 위하여 標準濃度比 N로서 注入溶液을 묽게 만든다.

$$\text{따라서 } N \cdot C_3 = C_0$$

$$Q = \frac{N \cdot C_3}{C_2 - C_1} \cdot q$$

이 式에서 右側의 값들을 알면 流量을 求할수 있다.

2) 一時注入法 (Sudden injection)

이 方法은 既知容積 V의 濃溶液을 가능한 限 빨리 河川에 注入하는 것으로서 試料採取地點에서의 濃도가 급히 Peak에 達하고 그 後 서서히 감소한다 (그림 2)

試料는 一定한 間격을 두고 採取되며, 化學物質의 濃度(Chemical concentration)를 구하여 濃度-時間曲線 (Concentration-Time curve)을 그린다.

$$\text{따라서 } (C_0 - C_1)V = Q^T_0(C_2 - C_1)dt$$

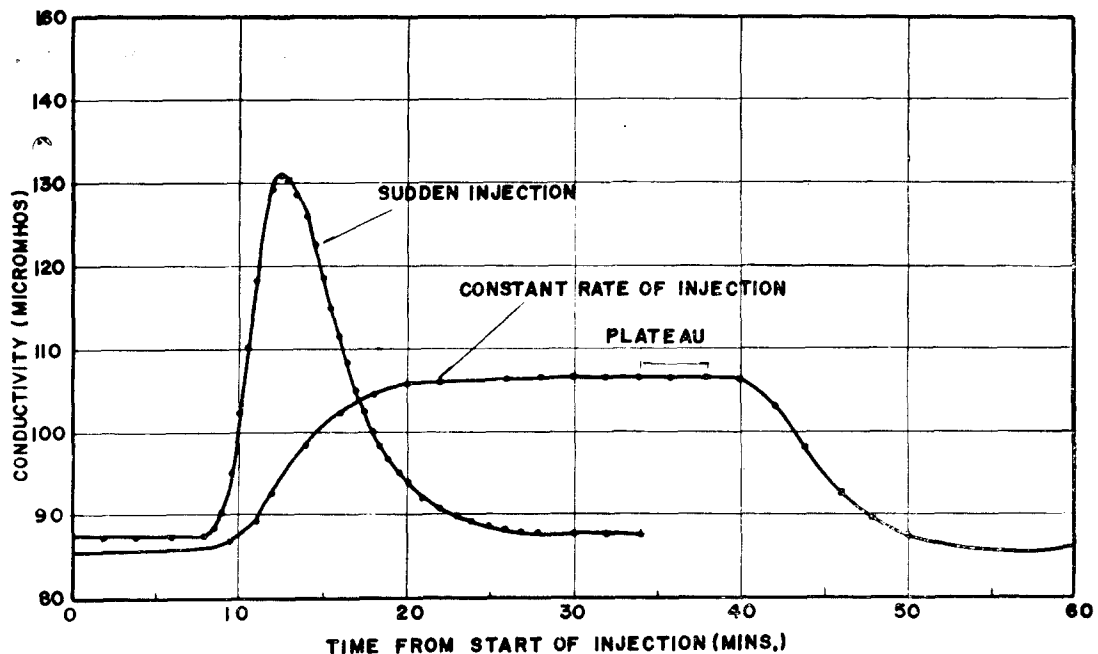


그림 - 2 Pulse Shape

$$Q = V \cdot \frac{C_0}{\int_0^T (C_2 - C_1) dt}$$

(여기서 $C_0 \gg C_1$)

이 식에서의 분母는 濃度-時間曲線 아래의面積과 같은 값이므로 이 曲線으로부터 쉽게 流量을 求할 수 있다.

이 때 注入溶液, 試料水 등의 濃度を 測定하는 때는 實驗室에서 定量分析을 하여 求하거나 Colorimeter 혹은 Flame Photometer를 使用해서 求한다. 그리고 現場에서 직접 濃도가 電氣傳導率 (Conductivity)에 相似한다는 原理를 利用하여 Portable Conductivity bridge와 Conductivity Cell 등을 使用해서 물의 Conductivity를 測定하여 앞에서 말한바와 同一한 原理로서 流量을 求할 수도 있다 (Conductivity method).

그림 2에서 一定量 및 一時注入의 경우에 있어서 나타나는 Conductivity (單位는 μ mhos)와 時間과의 關係를 보여주고 있다. 一定量注入은 同一한 間격으로 많은 수의 一時注入의 疊이라고 볼 수 있다. 만약 적은 量의 一時注入에 대한 濃度-時間曲線이 그려진다면 이들 縱距의 疊으로서 一定量注入에 對한 曲線이 얻어진다. 따라서 이것은 瞬間單位圖 (I.U.H.) 및 Scurve와 비슷한 性質을 가지고 있다. (그림 2)

III. 混合距離 (Mixing Length)

注入한 溶液이 河川水와 完全히 混合할 수 있도록 充分한 距離의 下流地點에서 試料水를 採取하는 것이 가장 중요하다. 이 때 混合이 거의 完全하게 되는 地點까지의 距離를 混合距離라 하는데 이에 대해서는 다음과 같은 몇가지 실험식이 研究되었다.

RIMMAR (1952)는 垂直方向의 混合이 橫方向의 混合보다 더 빨리 이루어진다는 即 2次元의 假定하에 다음과 같은 結果를 얻었다.

$$L = b^2 h (0.00285 C^2 - 0.0142 C)$$

여기서 L = 混合距離 (ft.)

b = 河川의 平均幅 (ft.)

h = 河川의 平均水深 (ft.)

C = che의 係數

그리고 HULL (1952)은 방사선동위원소를 사용하며, California의 河川들에 대해서 실험을 행

하였는데

지금 b = 河川幅 (ft)

t = 流下時間 (sec)

V = 平均流速 (ft/sec)

D = 擴散係數 (dispersion coefficient)

라 할 때 濃度-時間曲線의 形 (Pulse shape)이 $e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$ 로 표시되는 Gaussian error function라 하였으며 河岸의 한側에서 濃溶液이 注入될 때 混合距離는

$$L = \frac{100 \cdot 6^2 \cdot v}{4D} \text{ ft}$$

여기서 $D \approx 2-5(Qv) \frac{1}{2}$

이고 河川中央에서 注入될 때는 이값의 1/4이 된다고 하였다.

Rimmar나 Hull의 公式를 使用하여 混合距離를 求한다는 것은 Clayton (1963)의 실험에 의하여 얻어진 다음 값들을 비교하여 볼 때 매우 不正確하다.

Method	Mixing Length(ft.)
Rimmar's Formula	2,500
Hull's Formula	150
Experiment	<800

Schuster (1965)도 역시 방사선동위원소를 사용하여 실험을 행하여 보다 좋은 結果를 얻었다 즉 다음과 같은 式에 의하여 混合度 (degree of mixing) Ms %를 求하고, (100-Ms)%와 注入地點으로부터의 距離와의 關係曲線에서 混合距離를 求한다. (實測例 參照)

$$Ms(\%) = \left(1 - \frac{1N_1 - N_1 + 1N_2 - N_1 + \dots + 1N_x - N_1}{N \cdot X} \right) 100$$

여기서 Ms: 混合度 또는 混合指數 (Index of mixing)

N_1, N_2, \dots, N_x : 河川의 斷面에서의 濃度 (혹은 Conductivity)

X: 河川면에서의 試料의 數

N: 平均濃度 (혹은 Conductivity)

이식과 같은 方法에 의하여 混合距離를 豫算定하며 試料採取點의 位置를 決定할 수 있으나, 測定을 行하기에 앞서 現場에서 直接 完全 混合의 여부를 확인해 보는 것이 要된다.

그리고 混合이 容易한 河川區間 即 幅이 좁고 灣曲되어 있거나 落水(Waterfall)등으로 亂流가 생기는 部分을 포함하는 區間을 擇하는 것이 좋으며 幅이 넓거나 分岐水路 및 流入하는 水路가 있는 區間은 피해야 한다.

IV. 注入溶液 및 器具

Dilution method에서 主로 사용되는 注入用 Salts의 종류는 다음 표-1과 같다. 이들 가운데 가장 경제적이고 우리나라에서 보편적으로 사용할 수 있는 것이 NaCl(Sodium chloride)이다.

〈표-1〉 Salts의 비교

Tracers	常溫에서의 可溶性 (gm/l)	分析을 위한 最低濃度 (mg/l)	試料에서의 最終 dilution	安定性 (stabiliby)	濃溶液의 최대濃度 (gm/l)
NaCl (Sodium chloride)	250	30	1/10,000	安定	200~300
MnSO ₄ (Manganese Sulphate)	500	2.5	1/60,000~130,000	安定	275
Na ₂ Cr ₂ O ₇ (Sodium dichromate)	660	0.5~1	1/100,000	安定	100
NaNO ₂ (Sodium nitrite)	750	0.4~1.2	1/250,000	不安定	100

V. 測定精度 (Precision)

流量的 測定에 있어서 使用器具의 결함에서 오는 器械誤差 (Systematic error)와 個人的 착오, 自然現象 및 測定回數등으로 부터 생기는 偶然誤差 (Random error)를 수반하기 쉽다. 이 가운데 器械誤差는 測定回數의 반복에 아무런 영향을 받지 않고 다만 보다 精密한 器具의 使用으로서 감소시킬 수 있으며 다른 方法에 의한 流量的 測定値와 그 결과를 比較하지 않고는 誤差의 범위를 알수 없다. 그러나 偶然誤差는 測定回數의 반복으로 감소될 수 있으며 (平均 n 測定으로 생기는 誤差는 各個別 測定으로 부터 오는 誤差보다 平均 \sqrt{n} 배 적다), [II]에서 說明한 流量公式에 있어서 各要素들의 誤差를 사용하여 統計的으로 그 범위를 구할수 있다.

지금 Q = 계산된 流量値

Q = 계산된 流量値의 平均

N = 回數의 數

σ = 標準偏差 (Standard deviation)

따 하면

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Q-Q)^2}{N-1}}$$

이고 어떤 誤差범위內에 있는 Q의 確率을 다음

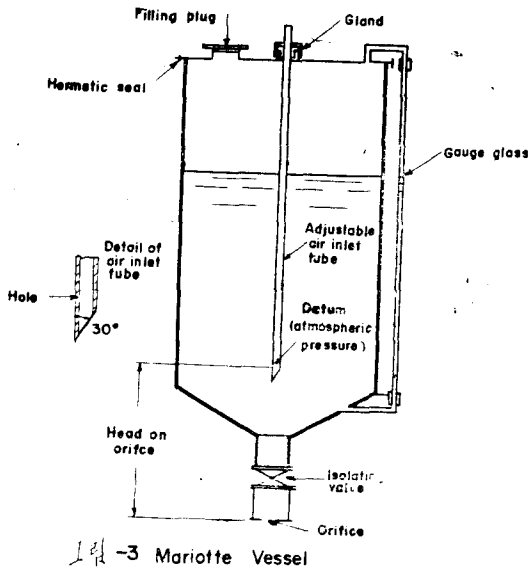


그림 -3 Mariotte Vessel

과 같이 산정할 수 있다.

任意實驗에서의 Q	確率 (Probability)
$Q \pm \sigma$	68%
$Q \pm 2\sigma$	95%
$Q \pm 3\sigma$	99.7%

그리고 變動係數 (Coefficient of variation) C.V.를 구하여 誤差의 범위를 보면 다음과 같다.

$$\text{즉 } C.V. = \frac{100 \cdot \sigma}{Q} (\%)$$

$$Q \text{의 } C.V. (\%) = \pm \sqrt{[C_0 \text{의 } C.V.]^2 + [q \text{의 } C.V.]^2 + [(C_2 - C_1) \text{의 } C.V.]^2}$$

95%의 信賴限界 (Confidence limit) 內에 있는 誤差의 값은 $1.96 \times (Q \text{의 } C.V.)$ 이다.

V. 實測例

먼저 이 예는 英國中部에 있는 River Tame에

서 1967년에 W.R.A. 담당자들과 함께 Chemical Dilution method로 流量測定을 행한 결과를 정리한 것임을 밝혀둔다.

(1) 注入器具는 불란서人 André에 의해서 고안된 Constant-head weir를 사용하였으며 注入溶液은 河川水 50gal에 鹽化카륨 (KCl) 100lb를 용해시킴 (약 1×10^5 p.p.m. K⁺의 농도) 濃溶液으로서 매초 $63.45 \text{ml} \pm 0.5\%$ 정도 注入되도록 하였다 (Constant rate injection).

(2) 注入溶液의 完全한 混合에 必要한 混合距離는 流量 20 cusecs, 平均水深 1ft, 水路傾斜의 0.001의 概略值로부터 1,250ft라 가정한 후 Schuster의 方法에 의해서 다시 計算 검토하였다.

즉, NaCl를 예비적으로 注入한 후 하류 두치점에서 Portable conductivity bridge를 사용하여 Conductivity를 測定한 결과 다음 表-2의 값을 얻었다.

〈표-2〉

Conductivity 값

		(左 岸) 1	2	3	4	(右 岸) 5	Mixing (100- Ms%)	Ms%)
注入地點으로부터 500ft	Conductivity	4244	4283	4384	4399	4384	95.2	4.8
	Background로부터 증가량	1168	1207	1308	1323	1308		
注入地點으로부터 800ft	Conductivity	4285	4287	4330	4331	4328	98.2	1.8
	Background로부터 증가량	1209	1211	1254	1255	1252		

여기서 얻은 (100-Ms)%를 注入地點으로부터의 距離 (X)에 對해서 對數紙上에 Plot한 것이 그림 4이다. 이 그림에서 두 點을 연결하여 수평軸과 맞나는 點으로부터 混合距離 1100ft를 얻었다. (混合度の 一般標準은 (100-Ms)=1%이다).

따라서 注入器具는 편리하도록 試料採取地點으로부터 上流 1,200ft되는 곳에 위치하였다.

(3) 注入地點上流의 濃度 (Background concentration)를 測定하기 위하여 계속 試料를 採取하였다 (표-3)

그림 5에서 볼수 있는 바와 같이 Background concentration에 약간의 變動이 있었으므로 注入

地點 上流의 試料들은 注入溶液의 流下時間 (Time of travel)을 고려하여 Plot 되었다.

流下時間은 그림 5에서 點線으로 표시된 바와 같이 溶液의 一時注入에 의한 "Centre of gravity"의 時間을 求하므로서 얻어진다. 즉 25分の 값을 가지므로 이 時間後부터 試料를 採取한다.

(4) 試料의 分析

100ml용량의 glass병에 採取한 試料들의 濃度を 알기 위하여 Unicam S.P. 90 flame photometer를 使用하였으며 그 발산하는 빛에 의하여 K²의 濃도를 測定한 결과는 다음 표-3과 같다 그리고 또한 注入溶液으로부터 採取한 試料도 micro-syringe를 이용해서 10⁴ 정도 묽게하여 동

일한 방법으로 농도를 측정한 결과가 표-4이며 이들을 그림 5와 같이 plot하여 $(C_2 - C_1)$ 의 값을 표-5와 같이 구하였다.

〈丑-3〉 分析結果

Sample 의 구 분	Sample No.	Time	Concentration (p.p.m. K ⁺)	
Backgro- und (C ₁)	6	15.16	3.0	
	7	15.20	2.55	
	8	15.24	—	
	9	15.31	2.45	
	10	15.36	2.75	
	11	15.43	2.25	
	12	15.57	2.45	
	Downstr- eam (C ₂)	13		
		14		
		15	15.15	2.42
		16	(mean)	
		17		
18		15.25	2.30	
19		15.29	3.55	
20		15.36	10.55	
21		15.40	12.95	
22		15.45	14.30	
23		15.50	13.9	
24				
25				
26	15.55	13.9		
27	(mean)			
28				
	29	16.01	14.2	
	30	16.05	14.0	
	31	16.08	14.1	
	32	16.18	9.4	

〈丑-4〉 注入溶液의 濃度 (C₀)

Sample No.	Time	Conc. K ⁺ (p.p.m.)
1	15.15	110,500*
2	15.19	128,000
3	15.33	129,500
4	15.44	131,000
MEAN		129,500

* Sample No. 1은 무시한다

〈丑-5〉 그림 5로부터 구한 $(C_2 - C_1)$ 값

Time	Concentration K ⁺ (p.p.m.)
15.45	11.60
15.50	11.49
15.55	11.50
16.01	11.49
16.05	11.49
16.08	11.61

MEAN 11.54

(5) 流量의 計算

$(C_2 - C_1)$ 의 평균치 = 11.54 p.p.m. K⁺

C₀의 평균치 = 129,500 p.p.m. K⁺

q의 평균치 = 63.45 ml. sec⁻¹

$$= 63.45 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$\therefore Q = \frac{C_0}{C_2 - C_1} \cdot q$$

$$= \left(\frac{63.45 \times 10^{-6} \times 1.29 \times 10^5}{11.54} \right) \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$= 0.721 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$= 25.13 \text{ Cusecs}$$

(6) 精度의 計算

q, C₀ 및 $(C_2 - C_1)$ 에 대한 變動係數 (Coefficient of variation) C.V.를 구한 결과 다음 과 같다.

$$q \text{의 C.V.} = \pm 0.5\%$$

$$C_0 \text{의 C.V.} = \pm 1.4\%$$

$$(C_2 - C_1) \text{의 C.V.} = \pm 0.41\%$$

따라서 Q의 C.V.는

$$Q \text{의 C.V.} = \pm \sqrt{[q \text{의 C.V.}]^2 + [C_0 \text{의 C.V.}]^2}$$

$$+ [(C_2 - C_1) \text{의 C.V.}]^2$$

$$= \pm \sqrt{(0.5)^2 + (1.4)^2 + (0.41)^2}$$

$$= \pm 1.54\%$$

95%의 信賴限界 (Confidence limit) 內에 있는 誤差의 범위는

$$\text{Estimated error} = 1.96 \times (\pm 1.54)$$

$$= \pm 3.02\%$$

$$\therefore \text{流量 } Q = 25.13 \pm 0.76 \text{ cusecs}$$

VII. 結 言

Dilution method에 의한 河川流量測定의 方法

은 앞에서 말한 여러가지 點을 충분히 주의한다면 높은 精度의 流量을 測定할 수 있다. 特히 注入溶液의 完全한 混合과 濃度の 測定등에서 일어나는 誤差등이 적도록 해야 한다. 實測例에서 보는 바와 같이 注入化學物質, 混合距離의 선정, 濃度測定등의 다소 복잡한 과정을 거쳐 流量을 測定하지만 Current meter를 사용할 수 없는 河川이나 다른 水路에서의 流量測定에 이 方法을 이용하는 것이 매우 유의하리라 믿는다.

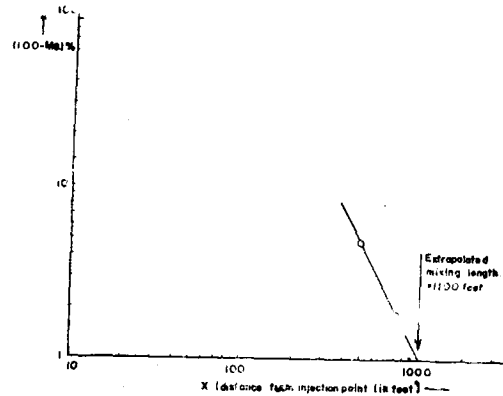


圖 - 4 Mixing degree-Distance Curve

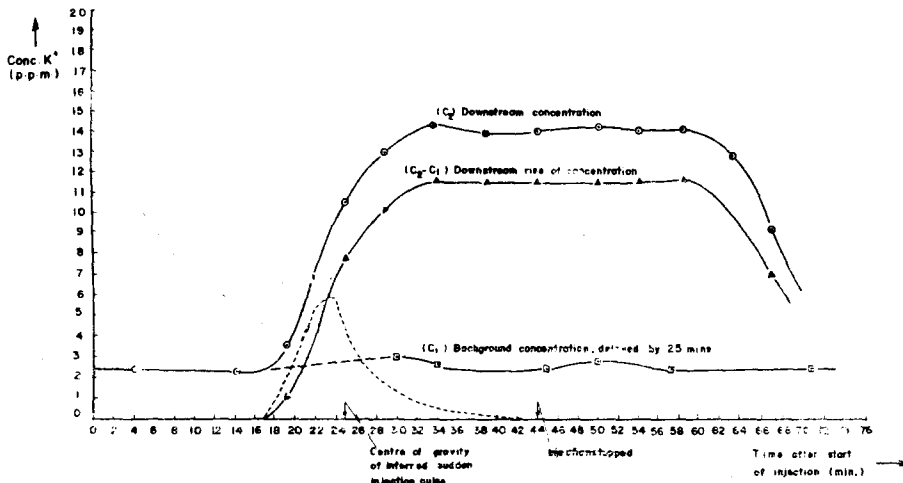


圖 - 5 K⁺ Concentration-Time Curve

《參考文獻》

1. British Standards Institution: Methods of Measurement of Liquid Flow in Open Channels, Part 2, Dilution Methods, B.S. 3680 (1964).
2. Spencer, E.A., Tudhope, J.S. (1958); A Literature Survey of the Salt Dilution Method of Flow Measurement, J. Instn. Wat. Engrs., Vol. 12, 2.
3. Rimmarr, G.M. (1952): Use of Electrical Conductivity for Measuring Discharge by the Dilution Method, National Engineering Lab. Translation No. 749
4. Hull, D.E. (1962): Dispersion and Persistence of Tracers in River Flow Measurement. International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 13, pp. 63-73
5. Clayton, C.G., Smith, D.B. (1963): A Comparison of Radioisotope Methods for River Flow Measurement, International Atomic Energy Agency Conference on the Use of Radioactive Isotopes in Hydrology, Tokyo.
6. Schuster, J.C.: Canal discharge measurements with radioisotopes, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., J. Hyd. Div., 1965, 91 (HY2), pp. 101-124.
7. University of Newcastle Upon Tyne: Dept. of Civil Engineering. Dilution techniques for flow measurement; Newcatle, The Dept., Bull No. 31, 1964.
8. Water Research Association: Technical Paper No. 58, Mixing Lengths in dilution gauging; by A. Baroby, C. Delannoy and J.P.C. Watt.
9. Braithwaite, G.R., Titmus, C.D.D.: The Lancaster Short Statistical Tables. (London, English Universities Press. 1967)