

〈論 文〉

河川水質豫測 Model(I)

Mathematical Modeling for the Stream Water Quality Prediction in the Rivers

—WQRRS Model에 의한 漢江 河川水質豫測—
(Stream Water Quality Prediction based on WQRRS Model in the Han River)

Shim, Soon Bo(沈淳輔)*

Lee, Kwang Ho(李光浩)**

Ryu, Byong Ro(柳秉鱸)***

Abstract

This study has performed to investigate and evaluate the simulation model of stream Water quality and the simulated results have also been compared with the observed data in the Han River.

The predicted BOD, Total-N, Coliform concentrations in the downstream of the Chungrang-Cheon are 8.6m/l, 4.5mg/l and 3.7×10^5 respectively.

It is interesting to note that the results simulated based on the WQRRS model are extremely in good agreement and also are very much comparable with those observed data reported previously in references.

I. 序 論

河川의 水質管理를 爲해서는 現存의 汚染狀態로부터 變化되어가는 將來에 이르기까지의 正確한 汚染程度를 評價할 수 있어야 한다. 河川水系 System 內에서 河川 水質을 支配하는 關聯因子는 多樣하며 이들 因子의 變化는 時, 空間의 多分히 動的이므로 試料의 採取分析 및 評價만으로는 過去의 水質變動 추세나 現況을 把握할 수 있을지 모르나 앞으로의 豫測은 不可能하다.¹⁾

특히 上流 汚染源의 追加 또는 汚染負荷의 增減에 따른 變化와 河川의 水理, 水文學的 變化에 따른 水質의 變化樣相은 數學的 Modeling 技法이 導入되어야만 비로서 可能하게 된다.^{2,3)}

本 研究에서는 用水로서의 水質汚染問題가 날로 深化되고 있는 漢江 本流部를 對象水系로 하여 河幅과 水深等 河床條件의 變化가 큰 點을 고려하여 最近 HEC

(Hydrologic Engineering Center' US Army Corps of Engineering)에서 開發된 WQRRS 數值 Model을 選定하여 Modeling 하였으며, 實測 水質資料와 比較 檢討 하므로써 이미 開發된 Model을 우리 實情에 맞도록 一部修正, 補完하였으며 이를 基礎로 하여 보다 많은 資料와 앞으로의 繼續인 研究를 통해 우리 實情에 맞는 Model 開發을 試圖하는데 그 目的이 있다.

II. Model의 原理

本 研究에서는 WQRRS의 module 中에서 河川水質 解析에 必要한 Stream Hydraulic Package, Stream Quality Package를 研究對象^{4,5,6)}으로 하였다.

河川水系는 Fig 1에서와 같이 node나 grid point로 나뉘어지고 node 사이에는 하나의 element가 形成되며 이를 Computational element로 하여 finite difference

* 忠北大學校 工科大學 土木工學科 副教授

** 忠北大學校 工科大學 土木工學科 助教授

*** 韓國科學技術院 土木 環境工學研究室 研究員

method의 技法中 하나인 backward implicit method를 사용하여 모든 水理特性이 計算되어 진다.

가. 河川의 水理學的 計算 理論

河川水質의 豫測은 河川水質汚染이 심하게 야기되는 濁水量의 境遇가 對象이 되므로 河川水의 흐름 形態는 定常狀態로 보아 흐름의 追跡은 Hydraulic Backwater Solution(steady-flow)과 Complete Saint Venant Equation을 利用하였다.

自然河川에서 水體의 水理學的 舉動을 豫測하기 위하여는 Saint Venant의 運動方程式을 基本方程式으로 하여 解析을 實施하였으며, 그 一般式은 다음과 같다.

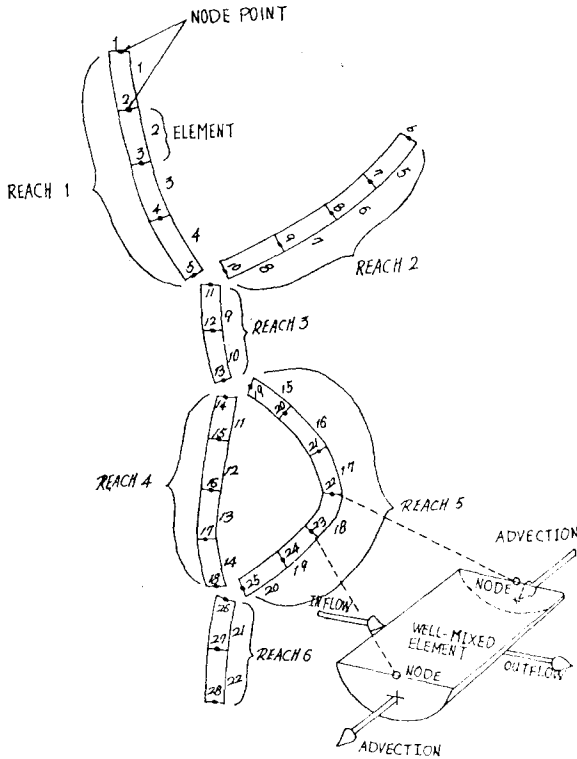


Fig 1. Model Representation a Typical Stream System

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + P \right) + M = 0 \quad (1)$$

여기서 v : 河川의 流速(m/sec)

t : 時間(sec)

x : 距離

g : 重力加速度(m/sec²)

a : 基準面에서 河床까지의 높이(m)

y : 河床에서 水面까지의 높이(m)

P : 河床摩擦 $P = v^2 n^2 R^{-4/3}$

M : 支流의 流入이나 取水등으로 인한

Momentum 效果

Continuty Equation에서 流量 $Q=AV$ 이므로 (1)式에서 $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial t}$ 를 각각 流量의 項 q 를 考慮하여 整理하고 backwater analysis를 위하여는 定常狀態가 假定될 수 있으므로 時間에 관한 微分項 $\frac{\partial q}{\partial t}$, $\frac{\partial A}{\partial t}$ 를 消去하여 水面 曲線 方程式 $\frac{\partial y}{\partial x}$ 를 誘導하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{(-qA^{-2} \frac{\partial q}{\partial x} + q^2 A^{-3} \frac{\partial A}{\partial x} - g \frac{\partial a}{\partial x} - gq^2 n^2 A^{-2} R^{-4/3} - M)}{g - q^2 A^{-3} \frac{\partial A}{\partial y}} \quad (2)$$

定常流 狀態에서의 $\frac{\partial q}{\partial x}$ 項은 支流의 流入이 있을 경우 $\frac{\partial q}{\partial x} > 0$ 이고, 河川에서 用水取水 등의 流出이 있을 경우 $\frac{\partial q}{\partial x} < 0$ 이므로 이러한 影響이 考慮되면 (2)式은 다음式(3)과 같이 表示될 수 있다.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{-\frac{cq}{gA^2} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial a}{\partial x} - q^2 n^2 A^{-2} R^{-4/3}}{1 - \frac{q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial y}} \quad (3)$$

여기서 $c=1$ if $\frac{\partial q}{\partial x} < 0$

$c=2$ if $\frac{\partial q}{\partial x} > 0$

(3)式의 河川水深은 trapezoidal iteration method에 의하여 計算되는데 이 過程에서 1斷面의 水深과 1, 2斷面의 平均水面傾斜로써 2斷面의 水深 y_2 를 求할 수 있다.

$$y_2 = y_1 + \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (4)$$

여기서 Δx 는 河川흐름 方向의 計算區間

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_2 \right] \quad (5)$$

나. 水質 Modeling의 計算理論

水質計算에서 각 element內에서 汚染物의 濃度는 完全混合되며 好氣性狀態가 維持된다고 假定하였으며, 物質收支 方程式은 各 element에서의 水質을 나타낸다. 이 方程式의 有限次分形態로 表示되는 基本式은 다음과 같다.

$$\bar{V} \frac{\partial c}{\partial t} = \Delta Z \cdot Q_2 \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + \Delta Z \cdot A_2 \cdot D_z \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Q_i C_i - Q_o C \pm \bar{V} \cdot S \quad (6)$$

여기서

C : 汚染物의 濃度(mg/l)

\bar{V} : element의 體積(m³)

Z : 距離(m)

Q_z : 垂直移動量(m³/sec)

A_z : 斷面積(m²)

D_z : 擴散係數(m²/sec)

Q_i : 流入量(m³/sec)

Q_o : 流出量(m³/sec)

S : 汚染物의 流出入濃度(mg/l)

SQP에서 Simulation 되는 水質項目은 DO, CBOD, Nitrogen series, P, Coliform bacteria, Temp, TOC, TDS, Plankton 類, Alkalinity, Sediment, Fish, Insects 等 22개 項目이며, 溶存酸素의 均衡은 大氣에 依한 再曝氣, BOD의 分解, 窒酸化, 光合性, 水中動植物의 呼吸, 浮遊固形物 및 有機沈澱物의 分解等에 依하여 이루어지는데 再曝氣, BOD의 分解, 光合性, 呼吸 등 水中에서 發生하는 物理, 化學, 生物學의 反應의 動力學은 1次元 反應인 것으로 假定하여 解析하였다⁸⁾

다. 열에너지 移動의 數學的 理論

水溫의 正確한 Simulation은 거의 모든 反應係數들이 溫度에 따라 크게 變化하므로 매우 重要하다.⁸⁾

一般의 水體나 大氣사이에서 일어나는 열에너지 移動은 다음式으로 表示될 수 있다.

$$H_n = q_{ns} + q_{na} - q_w - q_e - q_c \quad (7)$$

H_n : 水表面에서의 純 열에너지 移動量

q_{ns} : 水表面에서의 純 短波長 輻射量

q_{na} : 水表面에서의 純 長波長 輻射量

q_w : 水表面에서 放射하는 長波長 輻射量

q_e : 蒸發에 의한 열 損失量

q_c : 對流에 의한 열 交換量

이러한 溫度 Simulation 方法에는 heat budget method 와 equilibrium temperature method 가 있는데 heat budget method 는 (7)式의 5項을 水表面의 溫度와 關係있는 項과 그렇지 않는 項의 2個 組合으로 表示된다.

$$H = \mu - \lambda T \quad (8)$$

여기서

$$\mu = q_{ns} + q_{na} - 7.36 \times 10^{-2} - \rho L(a + bw)(\alpha_j - e_a) - 6.1 \times 10^{-4} \cdot P \cdot T_a$$

$$\lambda = 1.17 \times 10^{-3} + \rho L(a + bw)(\beta_j + 6.1 \times 10^{-4} P)$$

T : 水溫(°C)

ρ : 물의 密度(kg/m³)

a, b : 蒸發係數

w : 風速(m/sec)

α_j, β_j : 溫度와 관련된 經驗的 係數

e_a : 蒸氣壓(milibar)

P : 大氣壓(milibar)

T_a : 大氣의 溫度(°C)

L : 氣化에 필요한 潛熱(Kcal/kg)

또한 equilibrium temperature method 는 水體와 大氣사이에서의 純 에너지 移動量이 0인 水溫으로 定義하는 方法으로 平衡狀態의 溫度와 實際水表面의 溫度 差異값에 水表面 熱交換係數를 곱함으로써 計算한다.

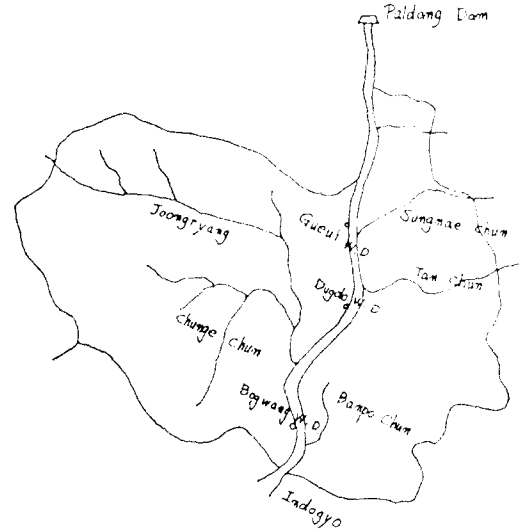


Fig 2. Modeling Site in the Han River System.

$$H_n = K_e(T_e - T_s) \quad (9)$$

여기서

H_n : 純에너지 移動量(Kcal/m²/sec)

K_e : 水表面 熱交換係數(Kcal/m²/sec/°C)

T_e : 平衡狀態의 溫度(°C)

T_s : 水表面의 溫度(°C)

III. Model의 適用

本 研究에서의 對象流域은 用水로서의 水資源의 重要性에 비추어, 八堂 Dam을 비롯한 4個의 上水道 水源池가 位置해 있으며 河川水質汚染이 問題가 되고 있는 漢江本流部로서 Fig 2에 나타냈다.

水理特性值의 計算方法은 資料入手가 可能한 Back Water Method를 使用하였고 適用區間은 漢江 人道橋 地點에서 上流의 八堂 Dam 下流에 이르는 28km 區間을 選定하였으며 주로 生活下水에 依한 影響을 考慮하였다.

支川의 경우 水理學的 資料가 不充分한 關係로 點汚染源으로 취급 하였으며 28km 전 구간을 1km의 element로 細分하였고 전구간에 대하여 朝夕의 影響은 없다고 假定하였다.

Table 1. Stream Hydraulics and Quality data.

Items	Element number	Inflow rates (m ³ /sec)	Withdrawal rates (m ³ /sec)	Temperature (°C)	DO (PPM)	BOD ₅ (PPM)	Coliforms (M.P.N /100ml)	NH ₃ -N (PPM)	NO ₃ -N (PPM)	NO ₂ -N (PPM)	pH	Alkalinity (PPM)
팔당댐 하류	1	125		22	8.0	0.8	1.4×10 ²	0.01	0.88	0.009	7.8	42
성내천	13	0.43		25	0.4	108.0	7.6×10 ⁶	31.5	0.25	0.012	7.6	156
탄천	17	0.90		30	0.2	170.0	5.4×10 ⁵	39.5	0.46	0.009	7.8	164
증량천	22	6.99		23.5	0.1	110.0	6.4×10 ⁶	56.0	0.38	0.03	7.7	208
반포천	26	0.64		28	0.4	108.0	3.5×10 ⁶	47.0	0.73	0.09	7.8	194
구익수원지	11		9.61									
뚝도수원지	20		5.79									
보광동수원지	23		3.47									

1. 入力資料

가. 水理學의 特性

水理特性 資料는 支川과 上水道 水源池의 位置 및 流出入 水量資料와 下川의 橫斷面 資料로서 適用區間內의 5개 流入地點과 3개 流出地點의 特性이 고려되었고 橫斷面資料는 計劃改修後의 河川斷面을 基準으로 河幅이나 河床의 變化가 큰 7개 斷面을 選定하였다.⁹⁾ 또 上流의 댐 建設로 인한 湧水時의 下川最少維支用水量이 125m³/sec 일때 Manning 係數는 改修後의 전구간에 대해 0.095로 하였으며 河床傾斜는 上流部에서 1/5910는 下流部에서는 1/8770이었다.¹⁰⁾

나. 水質 및 氣象資料

水質資料로서는 1年中 汚染이 가장 심했던 1981년 6월의 水質資料를 사용하였다.¹⁰⁾

모델링 對象의 水質項目은 Temp., DO, BOD₅, Coliforms, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, pH, Alkalinity의 9개 항목으로 하였고 非點源 汚染源에 의한 영향은 무시하였으며 modeling에 사용된 각地點의 水理 및 水質特性資料는 Table 1과 같다.

河川의 地理的인 位置는 밤낮의 길이를 算定하고 太陽에너지 交換量을 計算하기 위하여 사용되는데 北位 37°5' 東京 127°로 하였으며 大氣混濁度 3으로 하였다.¹⁾

全區間을 통하여 初期入力된 水質은 一定하다고 假定하여 初期狀態의 水質은 入堂 Dam 流出水의 水質과 같다고 假定하였다. 氣象資料로는 氣象月報를 참고하여 日別雲量, 氣溫 및 露點, 大氣壓, 風速등이 사용되었다.

IV. 結果 및 考察

水理特性 Modeling 結果 各 node에서의 平均水深,

水表面積, 水體積, 平均流速, 平均流出量 등의 水理特性과 再曝氣 係數가 計算되었으며, 이 結果를 水質解析에 Model에 使用하여 Simulation 한 結果 32時間 經過後 水質은 定常狀態(Steady-State)가 되었으며 그 結果를 Table 2에 나타내었다.

BOD의 경우는 성내천이 流入되기 前까지는 1mg/l 以下로서 環境保全法上 “甲” 水域 水質¹¹⁾을 維持하고 있으나 성내천이 流入되면서 1mg/l 以上(1.1mg/l)이 되고 탄천이 流入되는 17km 지점에서는 2.34mg/l으로 “乙” 水流을 維持하게 되며 증량천 流入後 汚染度는 급격히 증가하여 8.57mg/l 를 나타냈다.

Total Nitrogen의 傾遇에도 성내천 流入前에는 1mg/l 이하를 維持하나 성내천 流入後에는 1mg/l 以上이 되며, 증량천 유입후에는 4.5mg/l 로서 매우 높게 나타났다.

이들 豫測值을 收集可能했던 實測值과 比較하여 Fig. 3에 나타내었다.

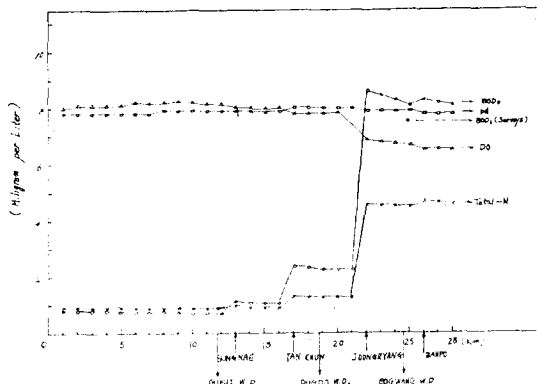


Fig.3. Comparison of predicted Water Quality

DO 濃度는 水溫이 약 21~25°C로 維持될 때의 飽和 濃度 8.99~8.38mg/l과 比較할 때 7.0~8.3mg/l 程度로 比較的 높은 水準을 나타내고 있으며 역시증량

Table 2. Results of Water Quality Modeling (After 32hr)

Abbreviated Summary of Inflow and Stream Quality

Flenn	Temp C	Oxygen MG/L	BOD ₅ MG/L	Colie MPN	TSS MG/L	TDSS MG/L	Alka MG/L	pH UNITS	H/C MG/L	TOT-N MG/L	PO ₄ -P MG/L	Algae MG/L	Aalga MG/M	Zoo MG/L	Insectis MG/M ₂	Benthos MG/M ₂	Fish KG
1	22.1	8.0	.79	134.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.898	0.000	.000	1790.	.000	404.0	506.9	0.0
2	22.0	8.1	.79	128.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.897	0.000	.000	1802.	.000	404.1	507.0	0.0
3	21.9	8.1	.78	123.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.897	0.000	.000	1812.	.000	404.2	507.1	0.0
4	21.7	8.1	.78	117.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.897	0.000	.000	1820.	.000	404.3	507.2	0.0
5	21.5	8.1	.77	112.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.897	0.000	.000	1826.	.000	404.4	507.3	0.0
6	21.4	8.2	.77	107.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.897	0.000	.000	1830.	.000	404.4	507.4	0.0
7	21.5	8.2	.76	103.	0.	0.	42.	7.8	10.4	.896	0.000	.000	1833.	.000	404.5	507.5	0.0
8	21.6	8.2	.76	98.	0.	0.	42.	7.9	10.4	.895	0.000	.000	1835.	.000	404.6	507.6	0.0
9	21.8	8.2	.75	93.	0.	0.	42.	7.9	10.4	.894	0.000	.000	1837.	.000	404.7	507.7	0.0
10	22.1	8.3	.74	89.	0.	0.	42.	7.9	10.3	.893	0.000	.001	1839.	.000	404.7	507.8	0.0
11	22.5	8.3	.73	84.	0.	0.	42.	7.9	10.3	.891	0.000	.003	1840.	.000	404.8	507.9	0.0
12	23.0	8.3	.72	98.	0.	0.	42.	7.9	10.3	.888	0.000	.010	1841.	.001	404.8	507.9	0.0
13	23.6	8.3	1.11	26407.	0.	0.	42.	7.9	10.4	1.000	0.000	.025	1840.	.001	404.8	507.9	0.0
14	24.1	8.3	1.09	24367.	0.	0.	42.	7.9	10.4	.997	0.000	.054	1837.	.003	404.8	507.9	0.0
15	24.5	8.3	1.08	22898.	0.	0.	42.	8.0	10.4	.994	0.000	.095	1835.	.006	404.8	507.9	0.0
16	24.7	8.3	1.07	20767.	0.	0.	42.	8.0	10.4	.992	0.000	.137	1834.	.008	404.8	507.9	0.0
17	24.8	8.3	2.34	23170.	0.	0.	43.	8.0	10.6	1.290	0.000	.173	1838.	.010	404.8	507.9	0.0
18	24.8	8.3	2.32	21962.	0.	0.	43.	8.0	10.6	1.289	0.000	.201	1840.	.012	404.8	507.9	0.0
19	24.7	8.3	2.31	20958.	0.	0.	43.	8.0	10.6	1.287	0.000	.224	1844.	.014	404.8	507.9	0.0
20	24.5	8.3	2.28	19986.	0.	0.	43.	8.0	10.6	1.286	0.000	.245	1849.	.015	404.8	507.9	0.0
21	24.3	8.3	2.27	18989.	0.	0.	43.	8.0	10.6	1.286	0.000	.265	1854.	.016	404.8	507.9	0.0
22	24.1	7.7	8.57	375353.	0.	0.	53.	7.9	13.1	4.548	0.000	.266	1855.	.016	404.9	508.0	0.0
23	23.9	7.5	8.46	351312.	0.	0.	53.	7.9	13.1	4.542	0.000	.281	1855.	.017	404.9	508.0	0.0
24	23.9	7.4	8.30	323215.	0.	0.	53.	7.9	13.1	4.528	0.000	.294	1852.	.018	404.9	508.0	0.0
25	24.1	7.2	8.11	295447.	0.	0.	53.	7.9	13.1	4.504	0.000	.304	1857.	.018	404.9	508.0	0.0
26	24.3	7.0	7.80	271881.	0.	0.	53.	7.9	13.0	4.469	0.000	.311	1855.	.019	404.9	508.0	0.0
27	24.5	7.0	7.70	252890.	0.	0.	53.	7.9	13.0	4.423	0.000	.316	1854.	.019	404.9	508.0	0.0
28	24.6	7.0	7.40	235918.	0.	0.	52.	7.9	13.0	4.362	0.000	.319	1854.	.019	404.9	508.0	0.0

천이 流入되면서 낮아지는 傾向을 보였다.

pH의 變化는 7.8~8.0으로 거의 일정한 狀態로 계속되었으며 Coliform의 경우는 성내천이 流入되면서 100 정도의 水準이 2.6×10^4 으로 급격히 上昇하여 전반적으로 區間內의 水質은 중량천의 汚染 부하에 매우 큰 影響이 있음을 알 수 있다.

V. 結 論

本 研究의 結果 얻어진 結論은 다음과 같다.

1. 모델링 結果 얻어진 관당댐 下流에서 人道橋地點에 이르는 28km 區間의 水理 特性資料로는 平均水深, 表面積, 水體積 平均流速, node 上流流量, 流入量 및 再曝氣係數(K_2) 등이다.
2. 2일 동안의 Simulation 결과 수질의 定常狀態 (Stady state)는 32시간 經過後에 나타났다.
3. 豫測된 水質의 變化는 中量천이 流入되면서 급격히 惡化되는 現象을 나타내, BOD의 경우 8.6mg/l, T-N 4.5mg/l, Coliform 3.7×10^5 을 나타냈다.
4. 豫測된 水質은 比較가 可能한 몇 개 地點의 實測資料와 比較해 볼 때 거의 비슷한 程度를 나타냈으며 앞으로 朝夕에 관한 資料와 보다 充分한 水質資料를 收集하여 動的 解析을 實行한다면 WQRRS에 의한 水質의 豫測 및 評價는 보다 精確하리라 期待되며 이를 基礎로 하여 우리 실정에 맞는 水質豫測 모델의 開發도 可能하리라 判斷된다.

참 고 문 헌

1. Gehm, H.W. and Bregman, J.I. "Handbook of

Water Resources and Pollution Control" (New York; VNR Co. 1976).

2. 신 응배 외, "수자원 오염관리 및 폐수처리 공정개발에 관한 연구" KAIST 보고서 (BSE 476(1)-1391-6) 서울, 1979.
3. 신 응배외, "대기 수질 환경관리 전산모델 연구(제 1차)" KAIST 보고서 (BSE 586(2)-1970-6) 서울, 1982. 12.
4. Hydrologic Engineering Center, "Water Quality for River-Reservoir Systems, WQRRS", US Army Corps of Engineers, California, 1978.
5. Hydrologic Engineering Center, "Stream Hydraulics Package, Computer Program Description, "US Army Corps of Engineers, 1979.
6. A personal contact with Tom Barnwell, EPA. 1982. 8.
7. Streeter, H.W. and Phelps, E.B. "A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River" *Public Health Bulletin* US Dept. of Health Education and Welfare No. 146 (1925).
8. Zison, S.W. et. al. "Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling," EPA-600/3-78-105, NTIS, 1978.
9. NCASI, "A Review of the Mathematical Stream Water Quality Model, QUAL-II, "Stream Improvement Technical Bulletin No. 338. 1980.
10. 서울시 자료 "한강개발 기본계획 중간보고", 1982. 11. 24.
11. 안기희, "환경 보전관계 법규" 서울, 동원사, 1981.