

〈論 文〉

線型計画法에 의한 河川流域의 最適水質管理

—Optimum Water Quality Control of River Basin by Linear Programming—

金 祥 貝*
Sang-Kyung Kim李 舜 鐸**
Soon-tak Lee

Abstract

In this paper, a linear programming was used for determining the optimum efficiency required of each wastewater treatment facility and minimum total treatment costs in order to meet any set of stream dissolved oxygen standards within a river basin.

The optimum solution of water quality control which was obtained with the inventory equation of Camp-Dobbins' equation incorporated into the constraints of linear programming was compared with that of Streeter-Phelps' equation.

It can be concluded that correlation coefficient was 0.997. Then the linear programming incorporating the inventory equation of selected Streeter-Phelps equation was used in order to obtain the optimum solution of water quality control based on data from the Nakdong River.

要 旨

本 研究는 河川의 DO 基準을 維持하기 爲해 河川流域內의 各 處理場에 要求되는 廢水處理의 最適效率과 最小 處理費用의 組合을 決定하는 線型計画法에 있어서 制約條件의 諸式(inventory equations)으로 利用되는 Camp-Dobbins 式과 Streeter-Phelps 式에 依한 最適水質管理의 解를 相互 比較分析하였다. 그 結果 相關係數가 0.997로 強相關關係를 보여 주었고 測定하기 어려운 R,A,K_s의 파라메터를 零으로 假定한 Streeter-Phelps 式을 線型計画法의 制約條件의 諸式으로 使用하여 最適解를 求하여도 만족함을 줄 수 있음을 알았으며 이 結果로 實際 河川流域을 對象으로 하여 河川流域의 最適水質管理의 解를 求하였다.

1. 序 論

河川水質保全과 汚染防止를 爲한 水質管理方法으로 水質監視體制의 強化政策도 重要하지만 水質測定만으로 언제든지 河川水質의 適切한 管理가 이루어졌다고 斷定할 수는 없다. 河川의 質을 높이기 爲하여 水質許容基準値를 높이면 높일수록 廢水處理場은 필요이상의 高度處理를 行하여야 할때가 있으며 이는 곧 處理費用

을 增大시켜 現代 經濟시스템에 큰 影響을 미치고 있는 바, 때로는 企業活動의 生命을 短縮시킬때도 있다.

河川系, 水質源地點의 要求水質과 自然條件에 따라 보다 適切한 管理政策이 設定된다면 그러한 經濟的 惡影響이 解決되리라 본다.

河川의 最適水質管理政策의 設定에 있어서 河川汚染源이 單一地點이라면 水質許容基準을 違背하지 않고 排出될 수 있는 廢水量의 算出은 簡單하나 汚染源이 둘 혹은 그 이상일 때는 問題는 복잡해진다. 한 地點

* 嶺南大學校 環境大學院 環境工學科 碩士課程, 現在 大韓重石(株) 근무

** 本學會理事·嶺南大學校工科學教授·工學博士

으로부터 배출된 廢棄物은 다른 地點에서 배출된 廢棄物과 混合하여 또 다른 地點에 影響을 주기 때문이다. 또한 上流와 下流에 걸쳐 또 時間的으로 各 河川別 特性에 따라 變化를 하기 때문에 各 地點에서의 水質許容基準值을 달리할 수 있다. 問題는 許容基準을 違背하지 않으면서 各 處理場의 廢棄物處理費用을 最小化하는 것이며 또한 處理場間의 水質許容基準의 適正한 分配라 하겠다. 즉 여러 地點에서 可能한 한 最小로 하는 DO 許容基準을 設定하는 것이다.

이러한 問題를 解決하기 爲해 1965年 North Western 大學의 Deininger 氏가 經濟的 最適汚染管理에 數理計劃法(mathematical programming)중의 하나로 개발된 線型計劃法(linear programming, LP)을 使用하였다.¹⁾ 이 線型計劃法은 1947年 Dantzig²⁾氏에 의해 最初로 開發되었고 初期에는 주로 軍事問題를 다루는데 適用되었다. 그 후 效果가 좋은 反應을 보이자 점차 광범위한 分野에서 適用되어지고 있으며 특히 經營관리자의 意思決定技法으로 發展하여 企業活動의 제한된 資源을 어떻게 生産의 用途에 合理的으로 分配할 것인가를 決定하는 最適化問題를 解決하는 技法으로 開發되었다.

水質管理分野에서는 最近에 몇몇 사람들에 의하여 그 適用 및 모델들이 開發된 바 있다. Liebman 과 Lynn 은 DO profile 을 說明하기 爲해 使用된 Streeter-Phelps 式과 LP 를 使用한 線型計劃모델을 河川 溶存酸素의 最適分配(optimum allocation)에 利用하였으며³⁾ Lo-uicks 와 Revelle 및 Lynn 역시 Camp-Dobbins 의 微分方程式으로 表示되는 線型計劃모델을 同一한 問題解決에 使用하였다.^{4,5)} Kerri 역시 DO 要求濃도를 維持하기 爲한 河川의 어느 一定한 地域을 試驗하는 데 이 線型計劃모델을 利用하였다.⁶⁾ Thomann 과 Sobel 은 河川의 여러 條件에 관련하여 線型計劃法을 展開하였다.⁷⁾ 1970年 Texas A & M 大學의 Shih⁸⁾는 Frenkel 과 Hasen⁹⁾의 DO 모델을 利用하여 좀더 깊은 관심으로 同一問題를 研究하기 爲해 動的計劃法(dynamic programming)을 소개했다.

本 論文에서는 水質汚染에 重要한 指標가 되는 BOD, DO 를 가지고 河川의 DO 基準을 維持하기 爲하여 河川流域內의 各 處理場에 要求되는 廢水處理의 最適效率와 最小處理費用의 組合을 決定하는 線型計劃의 利用에 있어서 制約條件의 諸式(inventory equation)으로 使用되고 있는 Camp-Dobbins 式 및 Streeter-Phelps 式에 依한 最適水質管理의 解를 比較하고 그 結果에 依하여 選擇된 모델을 利用한 線型計劃法이 河川流域의 最適水質管理의 解를 求함에 있어 應用可能性을 살펴 보며 그 適用을 보이고자 하였다.

2. 水質管理를 爲한 線型計劃모델

2.1 基本概念

河川에 排出되는 都市廢水와 工業廢水의 大部分은 有機物質이다. 이들 有機物質은 河川의 많은 有機生命體의 좋은 營養소가 된다. 河川에 含有된 溶存酸素는 이들 有機生命體에 依해 減少되며 生物學的 分解性廢棄物(bio-degradable waste)의 量이 많으면 많을수록 有機物의 汚染은 크다. 따라서 酸素要求量도 더 많아진다. 만약 DO 濃도가 高갈된다면 河川은 嫌氣性狀態가 되고 有機物이 嫌氣性 微生物에 依해서 分解되므로서 水質은 크게 惡化된다. 이러한 理由때문에 河川水質의 DO 파라메터는 有機廢棄物로부터 生인 汚染의 程度를 測定하는데 가장 一般的으로 使用되고 있다. 河川의 DO 濃도를 決定하는데는 Camp-Dobbins 式과 Streeter-Phelps 式을 利用하고 있다.

(1) Camp-Dobbins 式^{10,11)}

Camp 式에 依하면 時間에 따른 BOD 濃도의 變化速度 dB/dt 는 現存하는 BOD 濃도 B 에 比例하고 雨水와 洗掘에 依한 BOD 付加速度 R 에 比例한다.

$$dB/dt = -(K_1 + K_3)B + R \quad (1)$$

K_1 = 脫酸素係數(days⁻¹)

K_3 = 沈澱速度定數(days⁻¹)

Dobbins 式에 依하면 溶存酸素不足量(DO deficit)의 變化速度 dD/dt 는 現存하는 BOD 濃도 B 에 比例하고 酸素不足量 D 와 植物의 光合成과 呼吸에 依한 酸素의 生成과 減少速度 A 에 比例한다.

$$dD/dt = K_1B - K_2D - A \quad (2)$$

K_2 = 再曝氣係數(days⁻¹)

(1)式을 積分하면 最初 BOD 濃도 B_0 로부터 흘러 時間 t 에 이르는 어느 한 地點에 이르렀을때의 BOD 濃도 B_t 를 求할 수 있다.

$$B_t = \left[B_0 - \frac{R}{K_1 + K_3} \right] e^{-(K_1 + K_3)t} + \frac{R}{K_1 + K_3} \quad (3)$$

(2)式과 (3)式을 利用하여 最初酸素不足量 D_0 로 흘러내린 어느 時間 t 에서의 酸素不足量 D_t 를 求할 수 있다.

$$D_t = \frac{K_1}{K_2 - (K_1 + K_3)} \left\{ \left[B_0 - \frac{R}{K_1 + K_3} \right] e^{-(K_1 + K_3)t} - e^{-K_2t} \right\} + \frac{K_1}{K_2} \left\{ \left(\frac{R}{K_1 + K_3} - \frac{A}{K_1} \right) (1 - e^{-K_2t}) \right\} + D_0 e^{-K_2t} \quad (4)$$

어느 時間 t 에서 DO 飽和濃도 C_s 에서 D_t 를 빼면

DO 濃度 C_t 가 된다.

$$C_t = C_s - D_t \quad (5)$$

(2) Streeter-Phelps 式¹³⁾

(4)식에서 K_2, A, R 을 모두 零으로 假定하면 Streeter-Phelps 式이 된다.

$$D_t = \frac{K_1 B_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \quad (6)$$

(6)식은 Fig. 1의 溶存酸素輸荷曲線으로 說明된다. 溶存酸素量이 最小가 되는 點에서는 酸素利用率과 再曝氣率이 같게 됨으로 이때의 溶存酸素는 最大不足量이 되며 臨界不足量(Critical deficit) D_c 로 表示된다.

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} B_0 e^{-K_1 t_c}$$

D_c 까지 물이 흐르는데 要하는 時間을 t_c 라 하면,

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \frac{D_0 (K_2 - K_1)}{K_1 B_0} \right]$$

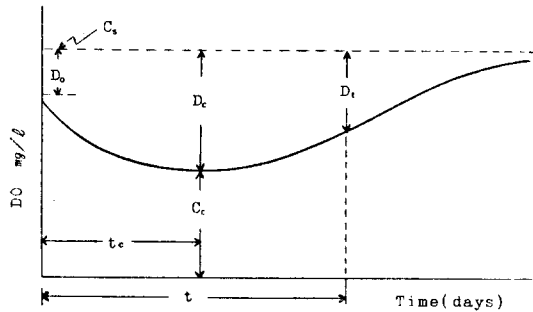


Fig. 1 Dissolved oxygen Sag curve.

어느 區間內의 한 地點에서 DO 濃度を 決定하기 爲해서는 그 區間의 始點에서의 DO와 BOD 濃도가 처음에 決定되어야 한다. 어느 한 區間의 始點에서 同一 區間內의 한 特定地點에 흐르는 물의 時間 t 를 알면 그 特定地點에서의 DO 濃度を Camp-Dobbins 式 또는 Streeter-Phelps 式, 그리고 (5)式을 使用하여 計算될 수 있다.

2.2 線型計画法

Fig 2와 같이 N 개의 廢水排出이 있는 河川은 N 개의 區間으로 나누어지는 모델로 생각되어 진다. 즉 廢

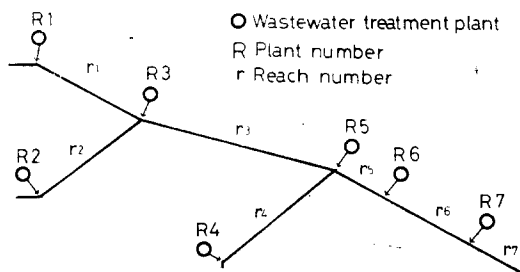


Fig. 2 Reaches in river basin.

水排出源 R 번째와 $(R+1)$ 번째 사이의 河川길이를 區分된 區間을 r 區間으로 하여 全體 N 개의 區間으로 區分한다. 마지막 區間은 N 번째 排出口로부터 入口까지 河川의 잔유물로 쌓인다. 各 區間에서 DO 濃度の 最小 許容基準이 주어졌고 各 處理場에서 BOD 除去函數로 주어진 處理費는 最小化되고 基準値를 違背하지 않는다면,

$$\text{Minimize : } Z = \sum_{r=1}^N (C_r P_r) \quad (7)$$

$$\text{Subject to : } CE_r \geq S_r \quad (8)$$

$$r = 1, 2, 3, \dots, N$$

여기서 函數 $(C_r P_r)$ 는 R 번째 排出口에서 BOD 除去量 P_r 만큼에 드는 總費用을 나타낸다.

$CE_r = r$ 區間의 終點에서의 DO 濃度 (mg/l)

$S_r = r$ 區間에서의 DO 最小許容濃度 (mg/l)

(1) 制約條件 (constraints)

(8)식의 制約條件은 非線型溶存酸素輸荷曲線인 (4)식과 (6)식이 線型制約條件의 한 係列로 개조되어 河川流域의 여러가지 水質管理政策의 最小費用解를 決定하는 線型計劃모델로 具體化 시킬 수 있다. 酸素輸荷式을 使用하기 爲해서는 支流 혹은 廢水排出物이 河川에 流入하는 모든 地點에서 完全 混合이 일어난다고 假定한다. 우선 各 區間의 始點과 終點에서의 BOD 濃도와 DO 濃度を 計算한다.

一般的으로 r 區間에서 總流量은 이전의 區間에서의 流量 QS_{r-1} , 區間으로 流入하는 支流量 QT_r , 區間에 排出된 廢水量 QW_r 의 합으로서 다음식과 같으며 아래 쓴 첨자는 r 區間의 번호를 의미한다.

$$QS_r = QS_{r-1} + QT_r + QW_r \quad (9)$$

各 區間의 始點에서 BOD 濃度 BB_r 는 여러 區間의 終點에서의 BOD 濃度 BE_{r-1} , 支流에서의 BOD 濃度 BT_r , 廢水排出에서의 BOD 濃度 BW_r 에 各各의 流量을 곱하여 合하고 總流量으로 나눈 것이다.

$$BB_r = \frac{BE_{r-1} QS_{r-1} + BT_r QT_r + BW_r QW_r QS_r}{DO} \quad (10)$$

各 區間의 始點에서 DO 濃度 CB_r 는 여러 區間의 終點에서 주어진 DO 濃度 CE_{r-1} , 支流의 濃度 CT_r , 廢水排出에서의 DO 濃度 CW_r 로 決定된다.

$$CB_r = \frac{CE_{r-1} QS_{r-1} + CT_r QT_r + CW_r QW_r}{QS_r} \quad (11)$$

各 區間의 始點에서 DO 不足量 DB_r 는 飽和濃度 CS_r 과 最初 DO 濃度 CB_r 의 差이다.

$$DB_r = CS_r - CB_r \quad (12)$$

各 區間의 最初 BOD 濃도와 DO 不足량이 計算되면 (3)식, (4)式을 使用하여 各 區間의 終點에서의 BOD 濃도와 DO 不足量を 決定할 수 있다. 이들 式에서 時

間 t 는 各 區間의 始點에서 그 區間의 終點까지 흐르는 流達時間 T_r 과 같다. 그리고 各 區間의 $K_1, K_2, K_3, A, R, T_r, CS_r$ 가 決定되어야 하며 一定해야 한다.

r 區間의 終點에서 BOD 濃度 BE_r 는

$$BE_r = \lambda_r BB_r + \mu_r \quad (13)$$

여기서

$$\lambda_r = e^{-(K_1 + K_3)t}$$

$$\mu_r = (1 - \lambda_r) \left(\frac{R}{K_1 + K_3} \right)$$

r 區間의 終點에서 DE_r 는

$$DE_r = \alpha_r DB_r + \beta_r BB_r + \rho_r \quad (14)$$

여기서

$$\alpha_r = e^{-K_2 t}$$

$$\beta_r = \frac{K_1}{K_2 - (K_1 + K_3)} (\lambda_r - \alpha_r)$$

$$\rho_r = \frac{K_1}{K_2 - (K_1 + K_3)} \left[\frac{R}{K_1 + K_3} (\alpha_r - \lambda_r) \right] + \frac{K_1}{K_2} \left(\frac{R}{K_1 + K_3} - \frac{A}{K_1} \right) (1 - \alpha_r)$$

各 區間의 終點에서 DO 濃度 CE_r 는 飽和濃度 CS_r 와 最終 DO 不足量 DE_r 과의 差이다.

$$CE_r = CS_r - DE_r \quad (15)$$

制約條件은 지금까지 展開된 諸式(inventory equations)으로 表現된다. (8)式에서 CE_r 값은 (15)式에서 求해진다. (5)式은 (15)式과 同一하게 쓸 수 있으므로 (t 에서의 값)

$$CE_r \geq S_r \quad (r=1, 2, \dots, N)$$

가 된다.

各 區間에 따라 여러 地點 t 에서 DO 不足量 $D_r t$ 는 그 區間에서의 最大許容不足量 D_r^{max} 와 같거나 그 이하로 되어야 한다.

$$D_r t \leq D_r^{max} \text{ (여러 } t \text{ 값에 대해서)}, 0 \leq t \leq T_r \quad (16)$$

(2) 目的函數(Objective function)

目的函數는 最小費用으로 河川流域의 水質基準를 維持하는데 要求된 廢水處理量을 일일이 貯積할 수 있어야 한다. 이 目的函數 (7)式은 (8)式 또는 (16)式, 그리고 諸式(9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)으로 表現된 것처럼 水質基準에 制約을 받는다. Camp-Dobbins 式과 Streeter-Phelps 式 모두 制約條件의 諸式에 同一하게 취급된다.

3. 最適解에서 파라메터의 影響調査

3.1 分析條件

制約條件을 만족시키는 諸式의 計算式에선 K_1, K_2, K_3, A, R 의 파라메터를 모두 고려한 Camp-Dobbins 式과 K_3, A, R 를 零으로 假定하고 K_1, K_2 만을 고려한 Streeter-Phelps 式을 使用하는 두 경우가 있다.

一般的으로 K_3, A, R 의 決定은 매우 어려운 것으로 믿어진다. 만약 LP 모델에서 이들 파라메터들이 最適

Table 1. Data for Reaches in River Basin

Reach No.	T_r days	$\frac{QW_r}{10m^6/d}$	$\frac{QT_r}{10m^6/d}$	$\frac{QS_r}{10m^6/d}$	CS_r mg/l	CW_r mg/l	CT_r mg/l	BT_r mg/l	K_1 days ⁻¹	K_2 days ⁻¹	K_3 days ⁻¹	A mg/l/d	R mg/l/c
1	0.235	0.02	5.13	5.15	10.20	1.0	9.5	1.66	0.31	1.02	0.02	0.85	0.15
2	1.330	0.14	4.88	5.02	9.95	1.0	8.0	0.68	0.41	0.68	0.03	0.41	0.14
3	1.087	0.03	5.15	10.20	9.0	1.0	-	-	0.36	0.63	0.04	0.18	0.14
4	2.067	0.05	1.12	1.17	9.54	1.0	9.7	1.0	0.35	0.09	0.04	0.05	0.11
5	0.306	0	1.17	11.37	9.0	-	-	-	0.34	0.72	0.05	0.39	0.01
6	1.050	0.1	0	11.47	8.35	1.0	-	-	0.35	0.14	0.06	0.07	0.13
7	6.130	0.16	0	11.65	8.17	1.0	-	-	0.30	0.02	0	0	0

解를 求하는데 커다란 影響을 준다면 Streeter-Phelps 式보다 Camp-Dobbins 式을 選擇하는 것이 바람직하다고 생각된다. 따라서 이들 파라미터의 影響을 調査하기 爲해 하나의 假說의 河川流域을 設定하고 Willamette River의 資料¹³⁾를 比較基準資料로 選擇하였다.

3.2 最適解모델

Fig. 2와 같이 河川流域을 7개의 區間과 6개의 廢水處理場으로 區分하고 7개의 區間的 水質은 6개의 廢水處理場으로부터 流入된 BOD 量에 影響을 받으며 이들 處理場은 水質基準을 維持하기 爲해 많은 BOD 量을 매일 除去하고 있다고 假定한다. Table 1과 Table 2에 依해 作成된 Fig. 3 各 區間別 年間廢水處理費用

曲線의 資料를 利用하여 最適解를 求하였다. 모든 處理場은 적어도 35%의 BOD 除去率이 要求되며 90% 以上の BOD 除去는 處理場의 구조상 技術的인 어려움이 있기 때문에 90% 除去率을 最大要求라 假定한다.

假說된 河川의 目的函數는 다음과 같다.

$$\text{Minimize} : \sum_{r=1}^7 C_{r,j} P_{r,j}$$

$$\text{Subject to} : CE_{r,j} > S_r$$

여기서 첨자 j 는 區間 r 에서의 BOD를 35%에서 90%까지 除去할 경우 BOD 除去率의 等級順位이다. $CE_{r,j}$ 는 BOD 除去率에 따라 各 區間的 終點에서 算出된 DO 濃度를 나타낸다.

$$r=1, 2, \dots, 7$$

$$j=1, \dots, 56(35\% \sim 90\%)$$

Table 2. Wastewater Treatment Data for Plant on the River Basin

Reach	Plant	BOD Load mg/ℓ	present% Removal Load	Annual Costs of Various Removals in Dollar					
				35 %	50 %	60 %	75 %	85 %	90 %
1	SPRINGFIELD(M)	248	67	0	0	0	22,000	78,000	120,600
2	SALEM(M)	408	10	546,000	552,000	630,000	780,000	987,000	1,170,000
3	WESTKRAFT(M)	240	26	160,000	170,000	210,000	277,500	323,000	378,000
4	SPAULDING(P)	1440	24	324,000	339,000	413,000	523,000	626,000	698,000
5*	CORVALLIS(M)	-	-	-	-	-	-	-	-
6	OREGONFLAX	2180	12	385,000	408,000	500,000	638,000	790,000	900,000
7	CROWZ & PUB. PAPER(P)	279	26	670,000	690,000	840,000	1,072,000	1,233,000	1,350,000

Note : M=Municipal, P=Paper and pulp * : No remove

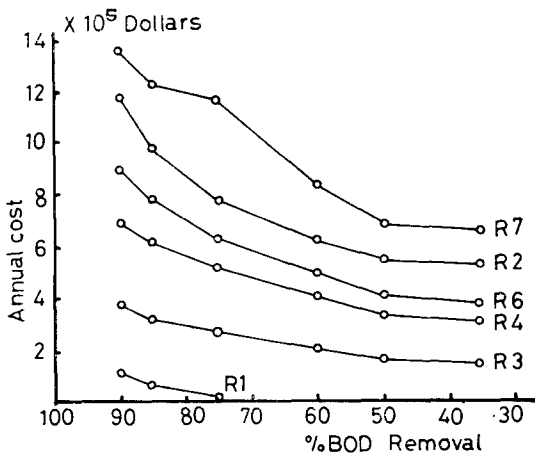


Fig. 3 Annual cost of wastewater treatment for each reach.

5區間을 除外한 모든 區間에 對해 制約條件이 成立된다.

1區間과 7區間을 통해

$$BE_r = \lambda_r BB_r + \mu_r$$

$$CE_r = CS_r - (\alpha_r DB_r + \beta_r BB_r + \rho_r) \quad r=1, 2, \dots, 7$$

1, 2, 4區間에서

$$BB_r = \frac{BT_r QT_r + BW_r QW_r}{QT_r + QW_r}$$

5區間을 除外한 모든 區間에 對해 (9)式부터 (15)式까지의 制約條件이 成立된다.

Streeter-Phelps 式에 依한 最適解는 Camp-Dobbins 式의 파라미터중 A, R, K_s 를 모두 零으로 놓고 위에서 說明한 目的函數 및 制約條件에 따라 同一하게 處理한다.

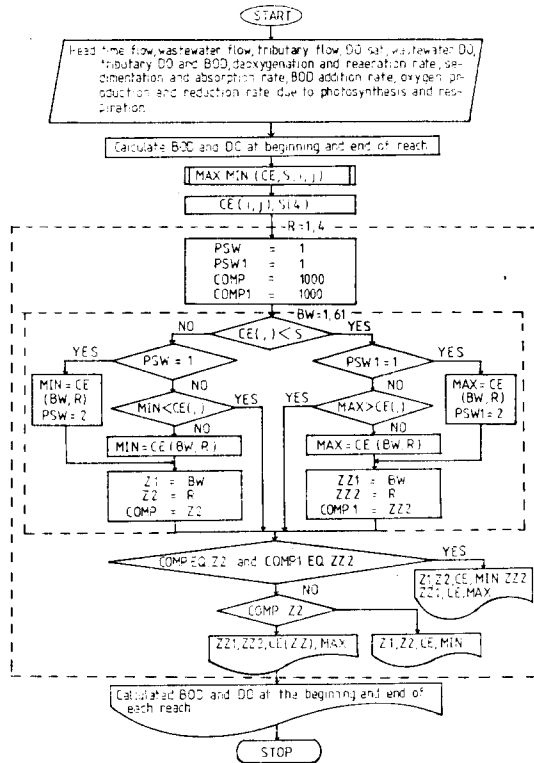


Fig. 4 Flow chart of generation program

3.3 分析 및 結果의 討議

위의 모델의 解는 Table 1의 入力資料로 (9)式~(15)式에 依하여 BOD 除去率을 35%부터 90%까지 1%씩

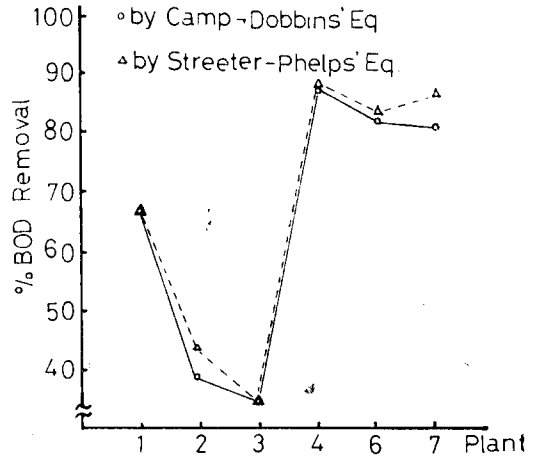


Fig. 5 The result of comparison with optimum BOD removal percentage by Camp-Dobbins and Streeter-Phelps' equation

除去하였을 경우 最終 CE_{rj} 값을 求하고 規制濃度와 比較하여 同一대지 큰 값을 찾는 Fig. 4의 컴퓨터 計算過程에 따라 얻어졌다. Fig. 3에서 各區間의 處理場의 BOD 除去率에 對한 處理費用은 볼록곡선(convex function)을 나타내나 處理效率間의 費用을 部分的으로 直線化하여 部分線型이라고 假定하고 解에 依한 BOD 除去率에 따라 相當한 年間費用을 圖式解法(graphical method)으로 求하였다.

Camp-Dobbins 株에 依한 最適解의 結果는 Table 3과 같으며 Table 4는 Streeter-Phelps 式에 依한 最適解의 結果를 보여준다. 이들 두 式간의 比較그림은

Table 3. Minimum Cost Solution for Maintaining DO Standard by Camp-Dobbins Eq.

Plant No.	% BOD Removal	Annual Cost Dollar	BOD Released to Stream mg/l/d	Minimum DO in Reach mg/l	Minimum Allowable DO mg/l
1	67	0	82	9.7	6.5
2	39	550,000	248	7.0	7.0
3	35	160,000	156	4.9	4.5
4	87	535,000	187	5.2	5.0
5	-	-	-	6.1	6.0
6	82	720,000	392	5.6	5.5
7	86	1,250,000	39	3.7	3.5
Total		3,215,000	1,104		

Table 4. Minimum Cost Solution for Maintaining DO Standard by Streeter-Phelps Eq.

Plant No.	% BOD Removal	Annual Cost Dollar	BOD Released to Stream mg/l/d	Minimum DO in reach mg/l	Minimum Allowable DO mg/l
1	67	0	82	9.5	6.5
2	44	535,000	228	7.0	7.0
3	35	160,000	156	4.8	4.5
4	88	665,000	173	5.3	5.0
5	-	-	-	6.0	6.0
6	84	770,000	349	5.5	5.5
7	87	1,275,000	36	3.7	3.5
Total		3,405,000	1,024		

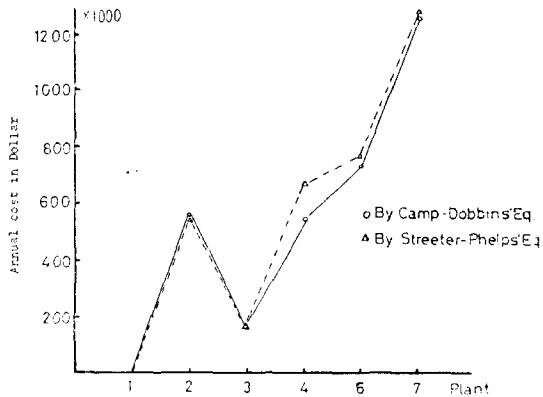


Fig. 6 The result of comparison with optimum cost by Camp-Dobbins and Streeter-Phelps' equations.

Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 이와 같이 BOD除去率과 BOD除去費用은 두式間의 커다란 差를 보이지 않고 있다. 두式間의 最適解의 研互比較를 爲하여 Table 1의 Data를 基準하되 K_3 , A , R 값을 最大 1.0, 最小 0.01로 하였을 경우의 最適解를 求한 結果로 相關分析을 하여 본 結果, 平均相關係數 r 는 0.997로써 强相關關係를 보여 주었다.

測定하기 어려운 R , A , K_3 의 파라메터를 零으로 假定한 Streeter-Phelps式을 最適解에 使用하여도 그 解의 結果에 만족한 값을 줄 수 있음을 알 수 있다.

4. 河川流域의 最適水質管理의 解

4.1 分析資文

分析資料는 洛東江流域과 琴湖江을 對象으로 하여 慶尙北道保健研究所의 環境汚濁實態報告資料 中 水質汚染指標가 되는 BOD 및 DO, 水溫을 採擇하였고¹⁴⁾ 建設部 下水處理計劃資料¹⁵⁾를 下水處理場의 分析資料로 하였다. 流量資料는 資料蒐集이 可能的한 安東, 倭舖東村, 江亭의 4個觀測所 資料를 擇하였다.¹⁵⁾ 處理場의 地點은 Fig. 7과 같이 龜尾, 安東, 大邱達四川으로 하고 最終到達地點을 花園地點으로 하였다. 渴水期의 水質條件을 最惡條件으로 하여 7月 資料를 中心으로 한 最適解를 求하였다. Table 6의 地點間 流達時間 T_r 는 Kirpich式과 California 道路局公式¹⁷⁾을 適用하여 算出된 同一結果值를 擇하였다. 또한 DO飽和濃度 CS_r 는 水溫別溶存酸素飽和濃度表¹⁸⁾를 使用하여 求하되 鹽素

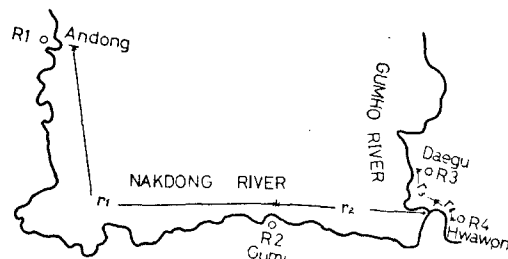


Fig.7 Reach in Nakdong River basin.

Table 5. Data for Wastewater Treatment on the Nackdong River Basin (1980.7)

Plant No.	Plant & Point Name	Distance of reach km	Point Position		Temp °C	Wastewater Flow × 10 ⁶ m ³ /days	BOD Load mg/ℓ
			From	TO			
1	Andog	134	Andong Bridge	Guminakdong Bridge	25.9	0.015	230
2	Gumi	40	Guminakdong Bridge	The confluence of Nakdong-Gumho River	21.8	0.124	71.7
3	Daegu	16.5	Paldal Bridge	The confluence of Nakdong-Gumho River	31.0	0.25	200
4	Hwawon	2.5	The confluence of Nackdong-Gumho River	Hwawon	23.0	0	0

Table 6. Stream and Wastewater Data (1980.7)

Plant No.	T _r days	QW _r × 10 ⁶ m ³ /d	QT _r × 10 ⁶ m ³ /d	QS _r × 10 ⁶ m ³ /d	CS _r mg/ℓ	CW _r mg/ℓ	CT _r mg/ℓ	BT _r mg/ℓ	K ₁ * days ⁻¹	K ₂ * days ⁻¹	K ₃ days ⁻¹	A mg/ℓ/d	R mg/ℓ/d
1	2.27	0.015	3.63	3.645	8.25	1.0	6.7	1.80	0.43	0.48	0	0	0
2	0.81	0.124	3.645	3.769	8.40	1.0	7.95	1.35	0.43	0.48	0	0	0
3	0.09	0.25	0.27	0.52	7.70	1.0	3.90	36.0	0.48	0.56	0	0	0
4	0.09	0	4.289	4.289	8.68	0			0.43	0.48	0	0	0

Table 7. Wastewater Treatment Data for Plant on the Nakdong River Basin¹⁶⁾

Plant No.	Plant name	BOD Load mg/ℓ	Annual Cost of various Removals in Dollars					
			35 %	50 %	60 %	75 %	85 %	90 %
1	Andog	230	546,000	552,000	630,000	780,000	987,000	1,170,000
2	Gumi	71.7	166,000	170,000	210,000	278,000	323,000	378,000
3	Daegu	200	670,000	690,000	840,000	1,072,000	1,232,500	1,350,000

의 함량을 중심으로 하였다. BOD 除去率에 따른 處理費用의 資料는 우리나라의 經驗値가 없기 때문에 外國의 경우를 BOD 負荷量에 따라 유사한 處理場의 경우와 같이 Table 7처럼 適用하고 이에 Fig. 8의 年間 處理費用曲綫을 作成하여 利用하였다. DO 許容基準은 環境保全法¹⁹⁾의 環境基準이 甲水域과 乙水域인 것을 基準으로 하였다. 또한 K₁과 K₂ 값은^{20,21)} Thomas' graphical method에 依하여 算出된 K₁ 값과 churchill의 實驗式에 依하여 算出된 K₂ 값을 使用하였으며 溫度보정을 위하여 schroepfer式(20°~30°C에서 K_T=

K₂₀ × 1.056^(T-20))을 使用하였다. BOD 除去는 35%以上, 90%까지로 하고 前述한 컴퓨터의 計算過程에 따라 計算하였다.

4.2 目的函數 및 制約條件

目的函數 및 制約條件은 (7)式과 (8)式에 따르며 DO 輸荷式을 使用하기 爲하여 洛東江本流와 流入하는 琴湖江의 支流는 完全混合한다고 假定한다.

Fig. 7과 같이 河川流域을 4개의 區間과 3개의 廢水 處理場으로 區分하고 4개의 區間的 水質은 3개의 廢水

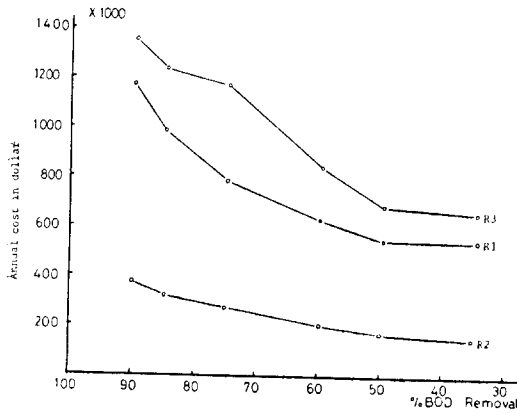


Fig. 8 Annual cost of wastewater treatment for each reach.

處理場으로 부터 流入된 BOD 量에 依해 影響을 받으며 이들 處理場은 水質基準을 維持하기 위해 많은 BOD 負荷量 (Table 5)을 매일 除去하고 있다고 한다. 河川과 廢水의 水質은 Table 5, 6과 같으며 BOD 除去率에 對한 經驗的 處理費用은 Table 7과 이것을 利用하여

作成된 Fig. 8의 年間處理費用 曲線과 같다.

4.3 最適解의 結果 및 討議

甲水域인 環境水質基準 7.5mg/l 以上과 水域인 6.5mg/l 以上의 범위에서 0.5mg/l씩 減少시키면서 求한 最適水質管理의 解는 Table 8, 9, 10과 Fig. 9와 같다.

濁水期의 경우 3區間의 廢水處理場은 어느 規制値이던 間に 最大效率로 處理되어야 하며 Table 8에서와 같이 7.5mg/l가 DO 許容濃度라 하면 모든 處理場이 90% 以上을 處理하여야 하고 이 規制値를 0.5mg/l를 減少시켜 7.0mg/l로 하였을 때 (Table 9) 安東下水處理場은 72%, 龜尾處理場은 75%만 處理하여도 規制値를 維持할 수 있어서 年間處理費用이 規制値가 7.5mg/l일 때보다 621,500달러 以上을 節約할 수 있으며 規制値를 6.5mg/l로 하였을 때는 安東, 龜尾 모두 35%以下의 處理效率로 BOD를 除去하여도 規制値를 維持할 수 있어서 DO 最小許容濃度가 7.0mg/l일 때보다 315,500달러 상당의 節約을 볼 수 있다.

Table 8. Minimum Cost Solution for Maintaining DO Standard 7.5mg/l

Plant No.	% BOD Removal	Annual Cost Dollar	BOD Released to Stream mg/l	Min. DO in Reach mg/l	Min. Allowable DO mg/l
1	> 90	> 1,170,000		Max. 7.06	7.5
2	> 90	> 378,000		Max. 7.14	7.5
3	> 90	> 1,350,000		Max. -1.68	7.5
4	-	-		Max. 6.23	7.5
Total		> 2,898,000			

Table 9. Minimum Cost Solution for Maintaining DO Standard 7.0mg/l

Plant No.	% BOD Removal	Annual Cost Dollar	BOD Released to Stream mg/l	Min. DO in Reach mg/l	Min. Allowable DO mg/l
1	71	750,000	66.7	7.00	7.0
2	75	278,000	17.9	7.01	7.0
3	> 90	1,350,000	20.0	Max. -0.74	7.0
4	-	-	-	Max. 6.23	7.0
Total		2,378,000	104.6		

Table 10 Minimum Cost Solution for Maintaining DO Standard 6.5mg/l

Plant No.	% BOD Removal	Annual Cost Dollar	BOD Released to Stream mg/l	Min. DO in Reach mg/l	Min. Allowable DO mg/l
1	< 35	546,000	149.5	6.88	6.5
2	< 35	166,000	46.6	6.46	6.5
3	> 90	1,350,000	20.0	Max. -0.74	6.5
4	-	-	-	Max. 6.23	6.5
Total		2,062,000	216.1		

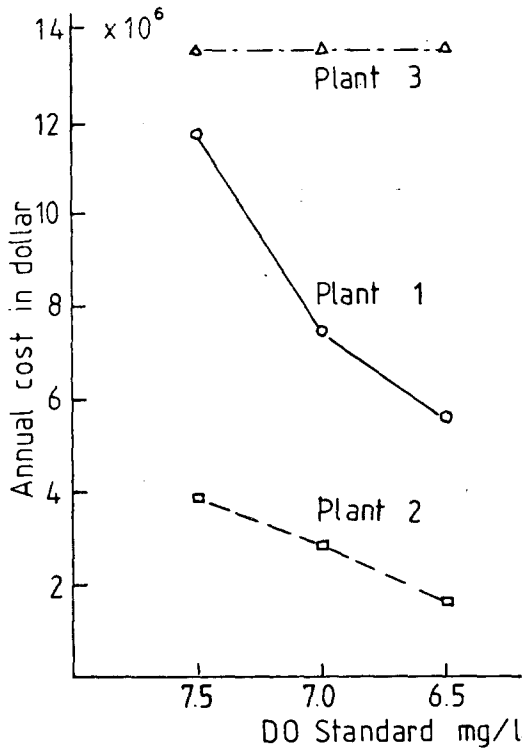


Fig. 9 Comparison of minimum cost solution by variable DO standard.

5. 結 論

Camp-Dobbins 式과 Streeter-Phelps 式에 의한 最適解의 比較에서 强相關의 關係로 거의 一致되는 結果를 보여주고 있으며 파라메터 A, R, K₃ 값을 고려하지 않는 Streeter-Phelps 式을 使用하여도 만족한 解를 求할

수 있음을 發見하였다.

그래서 LP 와 Streeter-Phelps 式을 모델로 하여 洛東江流域의 最適水質管理의 解를 求하여 본 結果,

(1) 7.5mg/l 의 甲水域 DO 基準으로 規制하였을 때 모든 處理場이 90% 以下の 高度處理를 하였다 할지라도 DO 가 7.0mg/l 를 넘지 못하므로 濁水期엔 規制値를 7.0~6.5mg/l 사이로 낮추어 乙水域條件으로 한 管理를 하는 것이 타당하다.

(2) 洛東江流域의 各 區間을 細分하고 區分別로 最小許用 DO 濃度を 設定하여 管理한다면 經濟的으로 더욱 節減된 處理費用으로 處理場이 운영될 수 있다 하겠다.

(3) 季節別로 洛東江의 各 區間別 特性에 따라 最適解를 求한다면 各 區間別로 季節에 따른 規制値를 設定 또는 汚染程度를 豫測할 수 있어 보다 適切한 水質管理를 行할 수 있다고 思料된다.

參 考 文 獻

1. Deininger, R.A., Water Quality Management: The Planning of Economically Optimal Pollution Control System, Ph. D. Thesis, Northwestern University, 1965.
2. 金基永, 郭魯均: 計量意思決定論 pp.127~283, 1979.
3. Liebman, J.C., and W.R. Lynn, The Optimal Allocation of Stream Dissolved Oxygen Water Resources Research, Vol. 2, No. 3, Sept. 1966.
4. Loucks, D.P., Wastewater Treatment Systems Analysis. Paper presented to ASCE Water Resources Engineering Conference, Denver, Colorado, Preprint No. 368, May, 1966.

5. Loucks, D.P. and W.R. Lynn, Probabilistic Models for Predicting Stream Quality, Water Resource Research, Vol. 2, No. 3, Sept. 1966.
6. Kerri, K.D., An Economic Approach to Water Quality Control. Paper presented at 38th Annual Conference of the Water Pollution Control Federation, Atlantic City, N.J., 1965.
7. Thomann, R.V., and M.J. Sobel, Estuarine Water Quality Management and Forecasting, Journal Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 90, No. SA5, 1964.
8. Shih, C.S., System Optimization for River Basin Water Quality Management, J. Water Pollut. Control Fed., Vol. 42, No. 10, Oct. 1970.
9. Frankel, R.J., and W.W. Hansen, Biological and Physical Responses in a Fresh Water Dissolved Oxygen Model, Advances in Water Quality Improvement. E.T. Gloyna and W.W. Eckenfelder, Jr., [Eds.] University of Texas Press, Austin, Tex., and London, Eng. 1967.
10. Camp, T.R., Water and Its Impurities, Reinhold Publishing Co., New York, 1963.
11. Dobbins, W.E., BOD and Oxygen Relationships in Streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 90, No. 3, June, 1964.
12. Loucks, Daniel P., Charles S. Revelle and Walter R. Lynn, Linear Programming Models for Water Pollution Control, Management Science Vol. 14, No. 4, December, 1967.
13. Streeter, H.W. and E.B. Phelps, A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River, Public Health Bulletin, 146, U.S. Public Health Service, Washington, D.C., Feb. 1925.
14. 慶尙北道 保健研究所：環境汚染實態報告書, 1980.
15. 建設部：洛東江流域 下川處理計劃, 1982.
16. 水文資料綴：洛東江流域 調查團報告書
17. 崔榮博, 李舜鐸, 李吉永：水文學·河川江學 I, II, 1973.
18. 崔義昭, 趙光明：環境工學 p.25, 1978.
19. 環境保存法：水質環境基準, 1981.
20. 李瑞來, 崔彥活 外 2名：洛東江水系の 水質保全을 위한 調査研究 제 3 보 1979年度 秀節別本流의 水質分析 및 제 4 보 自爭因子的 2次年度評價, 1980 : 환경원자력연구소
21. 朴永圭：대구 도시권 폐수에 의한 洛東江下流의 水質汚染과 그 保全對策, 영남대학교 논문집 第12輯 1978.