

## 동적계획법을 이용한 추계학적 하천수질관리

## Stochastic River Water Quality Management by Dynamic Programming

조 재 현\*

Jae-Heon Cho

## Abstract

A river water quality management model was made by Dynamic programming. This model optimizes the wastewater treatment cost of the application area, and computed water quality with it must meet the water quality standard. And this model takes into consideration tributary input, wastewater treatment plant effluent, withdrawals for several purposes.

Modified Streeter-Phelps equation was used to calculate BOD and DO. Optimization problem was solved with particular exceedance probability flow, and the water quality of each point was calculated with the decided treatment efficiencies. At that time, the probability satisfying the water quality standard of constraints equals to the exceedance probability of the flow.

The developed model was applied to the lower part of the Han-River. The reliability to meet the water quality standard is 70 % when 4 wastewater treatment plants of Seoul City are operated by activated sludge system at autumn of the year 2001. Treatment cost of this case is 121.288 billion won per year.

## 1. 서 론

94년과 95년에 발생한 영호남의 가뭄으로 인해 낙동강과 영산강 등 하천의 수량이 줄어들어 따라 하천수질이 극도로 악화되는 현상이 나타난 바 있다. 이러한 하천수질 오염에 영향을 주는 중요한 인자중의 하나인 오염부하를 생활하수, 가축폐수, 공장폐수, 삼림이나 경작

지로부터의 비점원 오염물질 등이다. 이중에서 하천 오염현상의 주된 요인이 되고 비교적 쉽게 통제할 수 있는 것은 도시지역에서 대량으로 배출되는 생활하수와 공업단지 등에서 배출되는 공장폐수이다. 그러나 하천수질은 통제 불가능한 자연현상인 강우에 의해 나타나는 하천수량과도 밀접한 관련을 가지고 있다. 94, 95년의 갈수시에 나타난 수질의 악화는 하천수량의 영향이 극단적으로 나타난 결과이다. 이와 같은 하천수량의 가변성을 하천수질관리에 시는 반드시 고려해야 한다.

\*관동대학교 환경공학과 교수

하수처리장을 증설하거나 적절한 처리정도로 처리효율을 높일 때에는 처리수를 받아 들이는 하천의 수질목표를 만족하면서 하수처리비용도 최소화되도록 하는 것이 경제적이다. 선형계획법과 비선형계획법을 이용한 수질관리모형은 하수처리장의 처리효율을 결정할 때 처리효율의 상한계치와 하한계치 사이의 어떤 실수도 해가 될 수 있는데 실제 처리장의 운영시에는 이와 같은 넓은 범위의 처리효율을 기대하는 것은 어렵고, 1차, 2차, 3차 처리의 처리계통에 따라 일정한 처리효율로만 운영되기 때문에 실제 운용 가능한 처리효율 중에서 각 처리장의 처리효율을 결정해 줄 필요가 있다. 따라서 본연구에서는 동적계획법을 이용한 하천수질관리모형을 개발하고자 한다.

따라서 하천수량의 가변성을 고려하면서 하천수질기준을 만족하고 지역내 하수처리비용의 최적화문제를 해결할 수 있는 수질관리모형을 수립하고자 한다.

## 2. 수질모형

BOD분해식과 침전을 고려한 Streeter-Phelps식은 (1), (2)식과 같고, DO농도가 최소가 되는 임계시간은 (3)식과 같이 계산된다.

$$L_i = \rho_i L_{0i} \quad (1)$$

$$D_i = \gamma_i L_{0i} + \beta_i D_{0i} \quad (2)$$

$$t_c = \frac{1}{k_{ai} - k_{ri}} \ln \left[ \frac{k_{ai}}{k_{ri}} \left( 1 - \frac{D_{0i}(k_{ai} - k_{ri})}{k_{di} L_{0i}} \right) \right] \quad (3)$$

여기서  $L_i$  =  $i$ 구간 하류의 최종BOD농도,  
 $L_{0i}$  =  $i$ 구간 상류의 최종BOD농도  
 $D_i$  =  $i$ 구간 하류의 DO부족량,  
 $D_{0i}$  =  $i$ 구간 상류의 DO부족량  
 $\rho_i = \exp(-k_{ri}t)$ ,  $\beta_i = \exp(-k_{ai}t)$ ,  
 $k_{ri} = k_{di} + k_{si}$   
 $k_{ai}$  = 재폭기계수(1/day),  
 $k_{di}$  = 탈산소계수(1/day),  
 $k_{si}$  = 침전계수(1/day)  
 $\gamma_i = k_{di}(\rho_i - \beta_i)/(k_{ai} - k_{ri})$

하천분류와 지천, 하수처리장 유입수를 여러 개의 독립된 가닥으로 가정하면 다음과 같은 반복식<sup>1),2)</sup>으로 각 구간 하류의 수질을 계산할 수 있다.

$$\beta_i \leftarrow \beta_{(i+1)} \beta_i \quad (4)$$

$$\gamma_i \leftarrow \gamma_{(i+1)} \rho_i + \beta_{(i+1)} \gamma_i \quad (5)$$

( $i + 1$ )번째 구간의 수질을 계산할 때는  $i$ 번째 구간의  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  대신에 (4), (5)식의 우변값을 대입하여 각구간의 수질을 반복계산한다. 하천 각 구간의 수질은 분류, 지천, 하수처리장유출수 등의 합으로 다음과 같이 계산한다.

$$D_i = \frac{QE_i + \sum_{k=1}^i q_k c_i^k + \sum_{k=1}^i q_k e_i^k}{Q + \sum_{k=1}^i q_k + \sum_{k=1}^i q_k} \quad (6)$$

$$L_i = \frac{QB_i + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k}{Q + \sum_{k=1}^i q_k + \sum_{k=1}^i q_k} \quad (7)$$

여기서  $D_i$ ,  $L_i$  =  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종BOD농도

$E_i, B_i$  = 최상류 본류유량  $Q$ 에 의한  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종BOD농도

$q_k$  =  $k$ 번째 하수처리장 유출수량,  $q_k$  =  $k$ 번째 지천 유출수량

$e_i^k, b_i^k$  =  $k$ 번째 하수처리장 유출수에 의한  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종 BOD농도

$e_i^k, b_i^k$  =  $k$ 번째 지천 유출수에 의한  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종 BOD농도

(4), (5)식을 이용해서  $E_i, B_i, e_i^k, b_i^k, e_i^k, b_i^k$ 를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E_i &= L_0 P_i + R_i D_0 \\ e_i^k &= l_k (1 - X_k) P_i^k + R_i^k d_k \\ e_i^k &= l_k P_i^K + R_i^k d_k \\ B_i &= BR_i L_0 \end{aligned} \quad (8)$$



$$b_i^k = BR_k^i l_k (1 - X_k)$$

$$b_i^k = BR_k^i l_k$$

여기서  $I_0, D_0 =$  최상류 분류의 DO부족량과 최종BOD농도

$d_k, d_k =$  k번째 처리장유출수와 지천유출수의 DO부족량

$l_k, l_k =$  k번째 처리장유입수와 지천유출수의 최종BOD농도

$X_k =$  k번째 처리장의 BOD제거효율

### 3. 최적화문제

#### 3.1 확률적 제약식

각 구간의 수질을 (6), (7)식으로 계산하고, 각 구간 하류에서 최대한 허용할 수 있는 수질 기준의 DO부족량( $DA_i$ )을 만족하는 확률이  $\alpha_i$  이상이 되는 확률적 제약식은 다음과 같다.

$$P\{D_i \leq DA_i\} \geq \alpha_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

(9)식에 (6)식을 대입하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$P\{QE_i + \sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k \leq DA_i(Q + \sum q_k + \sum q_k)\} \geq \alpha_i \quad (10)$$

위식에서 분류유량  $Q$ 를 확률변수로 두고, 확률변수와 확정변수를 구분하여 정리하면 아래 식과 같다.

$$O(Q(DA_i - E_i)) \geq \sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k - DA_i(\sum q_k + \sum q_k) \geq \alpha_i \quad (11)$$

(11)식에서  $(DA_i - E_i)$ 가 양일 경우와 음일 경우, 그리고 0일 경우로 나누어서 확정식 제약식으로 변환할 수 있다. 식을 간략하게 나타내기 위해 다음과 같이  $YH_i$ 를 정의한다.

$$YH_i = \sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k - DA_i(\sum q_k + \sum q_k) \quad (12)$$

먼저  $(DA_i - E_i)$ 가 양일 경우는 다음과 같이 정리된다.

$$P\{Q \geq YH_i / (DA_i - E_i)\} \geq \alpha_i \quad (13)$$

일반적으로 외부의 오염원이 유입되기 전의 분류만의 DO부족량은 수질기준치 ( $DA_i$ )보다 작다. 따라서 특수한 지역을 제외하고는  $(DA_i - E_i)$ 가 양일 경우가 일반적이다.

(13)식에서  $Q$ 가 확률변수이므로  $Q$ 에 대한 누적확률로 표시되도록 변환하면 다음과 같이 된다.

$$P\{Q \leq YH_i / (DA_i - E_i)\} \geq 1 - \alpha_i \quad (14)$$

(14)식을 chance constrained method<sup>3),4)</sup>를 이용해서 확정적 제약식으로 변환하면 아래와 같다.

$$YH_i / (DA_i - E_i) \leq F_Q^{-1}(1 - \alpha_i) \quad (15)$$

위식에서  $F_Q$ 는  $Q$ 의 누적확률분포함수이다.

다음에  $(DA_i - E_i)$ 가 음일 경우는 다음과 같이 정리된다.

$$P\{Q \leq YH_i / (DA_i - E_i)\} \geq \alpha_i \quad (16)$$

(16)식을 chance constrained method를 이용해서 확정적 제약식으로 변환하면 아래와 같다.

$$YH_i / (DA_i - E_i) \geq F_Q^{-1}(\alpha_i) \quad (17)$$

다음에  $(DA_i - E_i)$ 가 0일 경우 (11)식은 다음과 같이 정리된다.

$$P\{0 \geq \sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k - DA_i(\sum q_k + \sum q_k)\} \geq \alpha_i \quad (18)$$

(18)식에는 확률변수가 포함되어 있지 않기 때문에 다음과 같이 변환된다.

$$\sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k - DA_i(\sum q_k + \sum q_k) \leq 0 \quad (19)$$

(15)식의  $F_Q^{-1}(1 - \alpha_i)$ , (17)식의  $F_Q^{-1}(\alpha_i)$ , (18)식의 0를  $Q'$ 로 두고 정리하면,  $(DA_i - E_i)$ 가 양일 경우와 음일 경우, 그리고 0일 경우의 3가지 case 모두 아래와 같은 확정적 제약식으로 표시할 수 있다.

$$YH_i \leq Q'(DA_i - E_i) \quad (20)$$

(20)식에 (12)식을 대입하고,  $e_i^k, b_i^k$ 를 처리효율  $X$ 의 함수로 표시되도록 (8)식을 대입해서



정리하면 다음과 같이 된다.

$$\sum q_k [1_k(1-X_k)P_i^k + R_i^k d_k] + \sum q_k e_i^k - DA_i(\sum q_k + \sum q_k) \leq Q'(DA_i - E_i) \quad (21)$$

일반적으로 외부의 오염원이 유입되기 전의 본류만의 DO부족량은 수질기준치(DA<sub>i</sub>)보다 작다. 따라서 특수한 지역을 제외하고는 (DA<sub>i</sub> - E<sub>i</sub>)가 양일 경우가 일반적이다. 그리고 확률모형의 신뢰도 α를 전구간에 동일하게 적용하면 (15)식의 F<sub>Q</sub><sup>-1</sup>(1 - α)는 초과확률 α인 최상류구간의 유량 Q로 일정한 값이 된다.

chance constrained method로 변환한 결과의 제약식에 (DA<sub>i</sub> - E<sub>i</sub>)가 양일 경우를 가정하면 (15)식과 같이 확정적으로 변환되고 다시 α가 일정하다고 하면 다음과 같이 된다.

$$(\sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k - DA_i(\sum q_k + \sum q_k)) / (DA_i - E_i) \leq F_Q^{-1}(1 - \alpha) \quad (22)$$

$$F_Q^{-1}(1 - \alpha)E_i + \sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k \leq DA_i(F_Q^{-1}(1 - \alpha) + \sum q_k + \sum q_k) \quad (23)$$

한편 확률을 고려하지 않고, 각 구간 하류의 수질이 수질기준을 만족하도록 하는 확정적 제약식은 아래의 (24), (25)식과 같다.<sup>5)</sup>

$$D_i \leq DA_i \quad (24)$$

$$QE_i + \sum q_k e_i^k + \sum q_k e_i^k \leq DA_i(Q + \sum q_k + \sum q_k) \quad (25)$$

(23)식에서 F<sub>Q</sub><sup>-1</sup>(1 - α)는 초과확률 α인 일정한 유량 Q이므로, (24), (25)식의 Q를 일정 초과확률의 유량으로 생각하면 (23)식과 (25)식은 완전히 일치한다.<sup>1)</sup> 따라서 chance constrained method로 변환한 제약식의 최적화문제와 일정 초과확률의 유량에 대한 확정적 최적화문제는 동일한 해가 계산된다.

### 3.2 동적계획법

본연구에서는 지역내 총하수처리비용으로 표시되는 다음 (26)식의 목적함수와 i 구간내 DO부족량의 최대치가 수질기준을 만족하도록

하는 (27)식의 제약식을 이용한 최적화문제를 해석한다. 구간내 DO부족량의 최대치는 (3)식의 임계시간에 해당되는 지점의 DO부족량이다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n (C1_i(X_i) \times CRF + C2_i(X_i)) \quad (26)$$

subject to

$$D \max_i \leq DA_i \quad (27)$$

여기서 Dmax<sub>i</sub> = 구간내 DO부족량의 최대치

하수처리장의 처리효율은 연속적으로 0 - 100% 범위의 어떤 효율로도 운영될 수 있는 것이 아니고, 1차 처리, 2차 처리, 3차 처리에 따라 특정한 효율로서 운영된다. 또한 처리비용함수를 선형으로 가정하고 제약식도 선형의 제약식을 구성한다면 정수계획법을 적용할 수 있지만, 하수처리비용함수의 비선형성을 무시하는 큰 오차가 발생한다. 따라서 본연구에서는 처리비용함수의 비선형성을 고려하고 확률적 의미도 부여하기 위해, 정책결정자에게 유용한 정보가 되고 확률적 의미를 가지는 다수의 유량에 대해 각각 동적계획법을 적용해서 최적하수처리비용을 결정한다. 초과확률 α인 유량으로 확정적 최적화문제의 해를 구하고, 그 해에 따른 각 지점의 수질을 계산하면, 제약식의 수질기준을 만족할 확률은 전구간에서 α가 된다.

동적계획법의 적용을 위해 BOD와 DO의 계산식은 (1), (2)식의 변형된 Streeter-Phelps 식을 이용한다. 각 구간의 상류에는 하수처리장의 방류수와 지천이 유입되거나, 취수지점이 있는 것으로 하였고, 각 구간 상류에서 이들 오염물질의 유입과 취수를 고려했을 때 합류직후의 BOD, DO부족량은 각각 (28), (29)식과 같다.

$$L_0 = \frac{(QB_{i-1})(L_{i-1}) + (q_i)(LS_i) + (q_i)(LT_i)}{QA_i - W_i} \quad (28)$$

$$D_0 = \frac{(QB_{i-1})(D_{i-1}) + (q_i)(DS_i) + (q_i)(DT_i)}{QA_i - W_i} \quad (29)$$



여기서  $QA_i = i$ 구간 상류의 유량  
 $(= QB_{i-1} + q_i + q_i + W_i)$

$QB_i = i$ 구간 하류의 유량

$LS_i, DS_i = i$ 번째 하수처리장 유출수의  
 최종BOD와 DO부족량

$LT_i, DT_i = i$ 번째 지천의 최종BOD와  
 DO부족량

동적계획법의 state는 각 구간 하류의 수질  
 (BOD, DO)로 하고, 각 구간 사이의 관계는  
 (1), (2), (28), (29)식을 이용해서 연관성을 갖  
 도록 한다. 6) DO의 제약에 대한 동적계획모형  
 의 recursive equation과 제약식은 다음과 같  
 다.

$$F_i(R_i) = \text{Min. } \{F_{i-1}(R_{i-1}) + C_i(X_i)\} \quad (30)$$

subject to  $D_i \leq DA_i$   
 $X_i \in (0.875, 0.90, 0.95, 0.975)$   
 for all  $i, i = 1, 2, \dots, n$

각 구간의 state는 BOD와 DO이므로 그 값  
 이 원래 연속적이지만, 계산의 효율성을 위해  
 서 허용 가능한 범위내의 BOD와 DO를 다수의  
 구간으로 잘게 쪼개어서 각 구간 하류 수질의  
 state로 한다.

#### 4. 한강하류부예의 적용

##### 4.1 적용대상지역

본 연구의 적용대상은 팔당댐부터 신곡수중  
 보까지의 한강하류부 55km 구간이다. 이 지역  
 에는 탄천, 중랑천, 안양천 등의 오염된 지천  
 이 있고, 서울시에서는 4개의 대형 하수처리장  
 을 운영중에 있고, 4개 하수처리장의 94년 현  
 재 처리용량은 중랑하수처리장 146만 톤/일,  
 탄천하수처리장 75만 톤/일, 가양하수처리장  
 100만 톤/일, 난지하수처리장 50만 톤/일이  
 다. 7) 2001년에 필요한 용량은 중랑하수처리장  
 191만 톤/일, 탄천하수처리장 93만 톤/일, 가  
 양하수처리장 216 만톤/일, 난지하수처리장  
 86 만톤/일이다. 8) 구간내 취수상황은 서울시  
 상수도사업본부의 보고서를 이용하였다. 9) 대상

구간의 구간분할은 그림 1과 같다.

##### 4.2 하수처리비용함수

국내의 처리비용자료와 Klemetson 등<sup>10)</sup>,  
 Smith 등<sup>11)</sup>의 자료와 ENR-B Cost Index,  
 Labor Rates 등을 이용해서 처리용량과 처리효  
 율의 함수로 단일식의 처리비용함수를 구하였  
 다. 기존의 건설비용함수<sup>12)</sup>에 95년도의 GNP  
 Deflator<sup>13)</sup>를 기준으로 수정한 하수처리상 건  
 설비용함수는 아래와 같다.

$$Y = 51.822Q^{0.7921} [22.622(X - 0.58)^3 + 1]^{0.9925} \quad (32)$$

위식에서  $Q$ 는 하수처리장용량(만 톤/일),  $X$ 는  
 BOD제거효율( $0.35 < X < 0.975$ ),  $Y$ 는 건설  
 비용(억 원)이다.



그림 1. 수질관리모형의 구간분할

기존의 유지관리비함수<sup>12)</sup>에 95년도 건설업의 임금지수<sup>13)</sup>로 수정한 하수처리장 유지관리비함수는 아래와 같다.

10만 톤/일 이하  

$$Y = 2.5721Q^{0.7582}[322.322(X - 0.76)^3 + 1]^{0.9857}$$
 (33)

10만톤/일 이상  

$$Y = 1.9869Q^{0.7597}[193.581(X - 0.70)^3 - 1]^{0.9974}$$
 (34)

위식에서 Q는 하수처리장용량(만톤/일), X는 BOD제거효율(0.875 ≤ X ≤ 0.975), Y는 유지관리비용(억 원/년)이다.

4.3 보정 및 적용자료

본 모형의 적용을 위해 91년 11월 3일의 실측 수질 및 유량자료<sup>14)</sup>로 탈산소계수, 침전계

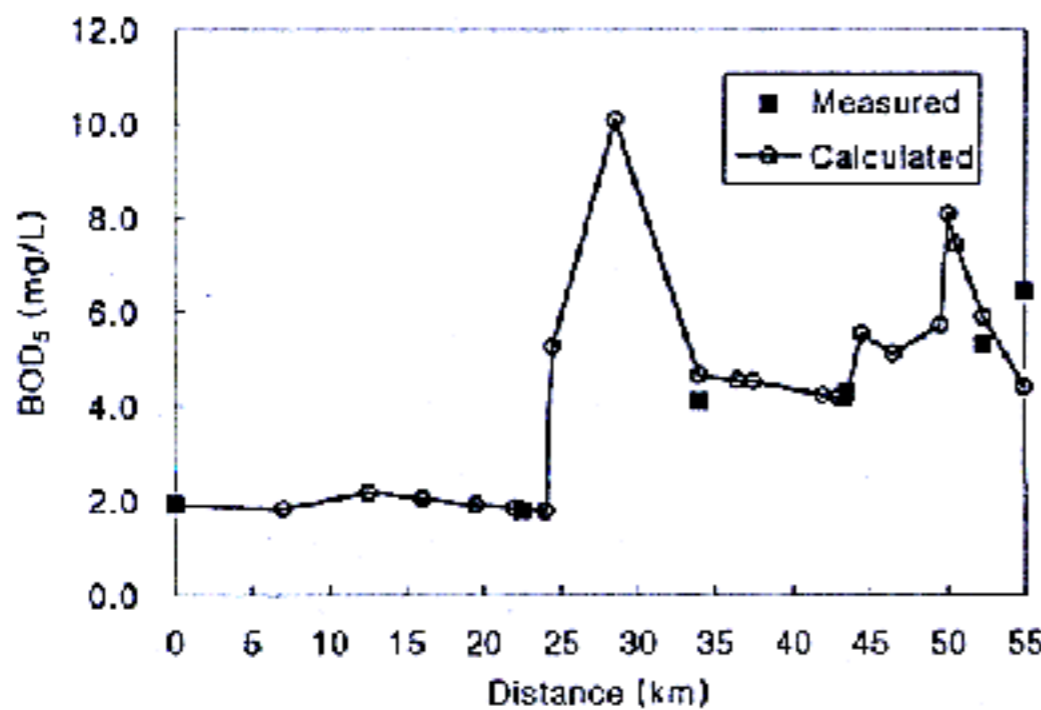


그림 2. BOD<sub>5</sub>보정결과

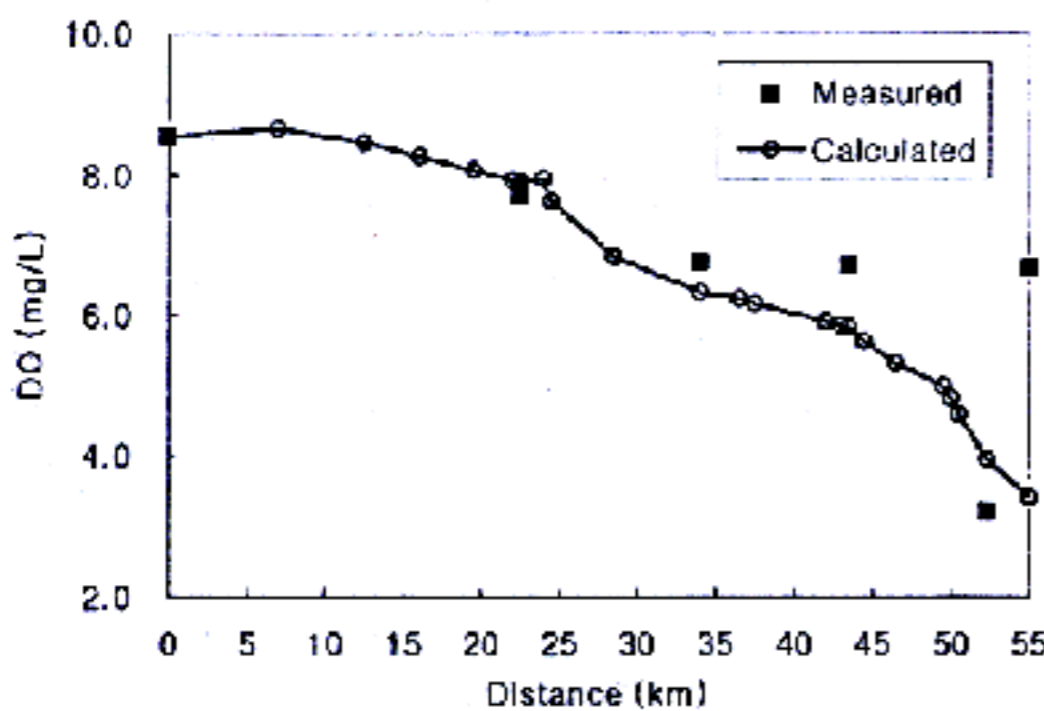


그림 3. DO보정결과

표 1. 팔당댐방류량 분석결과

초과확률(%)	유량(M <sup>3</sup> /S)
90	136
80	150
70	200
60	236
50	259
40	290
30	366
20	461
10	690
5	1,569

수, 재폭기계수를 보정하였다. BOD<sub>5</sub>, DO의 보정결과는 그림 2, 그림 3과 같다.

2001년의 장래 각 하수처리장의 처리효율을 결정하기 위해 이용된 팔당댐과 각 지천의 수질자료는 환경연감의 자료<sup>7)</sup>를 사용했고, 유수자료는 서울시 상수도사업본부의 자료를 이용하였다. 각 지천의 유량자료는 91년 11월의 실측자료를 사용했다.

확률변수로서 고려되는 하천본류의 유량으로는 팔당댐 방류량자료를 이용한다. 충주댐 완공이후인 86년부터 93년까지의 9월-11월의 유량을 순위배김 프로그램에 의해 분석하였다. 각 초과확률에 대한 팔당댐방류량 분석결과는 다음 표 1과 같다.

4.4 적용결과

초과확률 90%, 80%, 70%, 60%, 50% 유량 즉 136m<sup>3</sup>/s, 150m<sup>3</sup>/s, 200m<sup>3</sup>/s, 236m<sup>3</sup>/s, 259m<sup>3</sup>/s의 유량에 대해 동적계획법을 적용하여 DO의 수질기준을 만족하는 서울시내 4개 하수처리장의 2001년 가을의 최적처리효율을 결정하였다. 하수처리 효율은 최소한 87.5%를 유지하고 최대 97.5%까지 처리가능한 것으로 하였다. 본 연구에서는 표준활성슬러지법은 87.5%, 표준활성슬러지 + 암모니아 stripping의 공정은 90%, 표준활성슬러지 + 암모니아 stripping + 여과의 공정은 95%, 표준활성슬러지 + 암모니아 stripping + 여과 +



완성탄흡착의 공정은 97.5%의 BOD제거효율을 가정하였다.<sup>10)</sup> 2001년 가 하수처리장의 유입수 BOD는 중량 110mg/L, 탄천 88mg/L, 가양 114mg/L, 난지 61mg/L를 적용하였다.<sup>15)</sup> 하수처리비용은 현재 용량과 처리효율에서 2001년까지 증가되는 용량과 처리효율에 대한 추가 건설비용의 년차증가액에 2001년의 처리용량에 대한 유지관리비를 합하여 연간처리비용을 산출하였다. 이때 비용은 95년 원화를 기준으로 산출되었다.

Case 1은 90%의 신뢰도를 가지는 경우이며, 136m<sup>3</sup>/s의 유량으로 계산되었다. 탄천이 유입되는 구간 9는 원래 수질기준 1등급 구간이나 7.5mg/L의 수질기준을 만족할 수 없기 때문에 7.0mg/L의 기준을 적용하였다.

Case 2는 80%의 신뢰도를 가지는 경우이며, 150m<sup>3</sup>/s의 유량으로 계산되었다. 이경우에도 구간 9의 DO기준으로 7.0mg/L를 적용했다. Case 3는 70%의 신뢰도를 가지는 경우이며, 200m<sup>3</sup>/s의 유량으로 계산되었다. Case 4는 60%의 신뢰도를 가지는 경우이며, 236m<sup>3</sup>/s의 유량으로 계산되었다. Case 5는 50%의 신뢰도를 가지는 경우이며, 259m<sup>3</sup>/s의 유량으로 계산되었다. 각 신뢰도별로 계산된 최적처리효율과

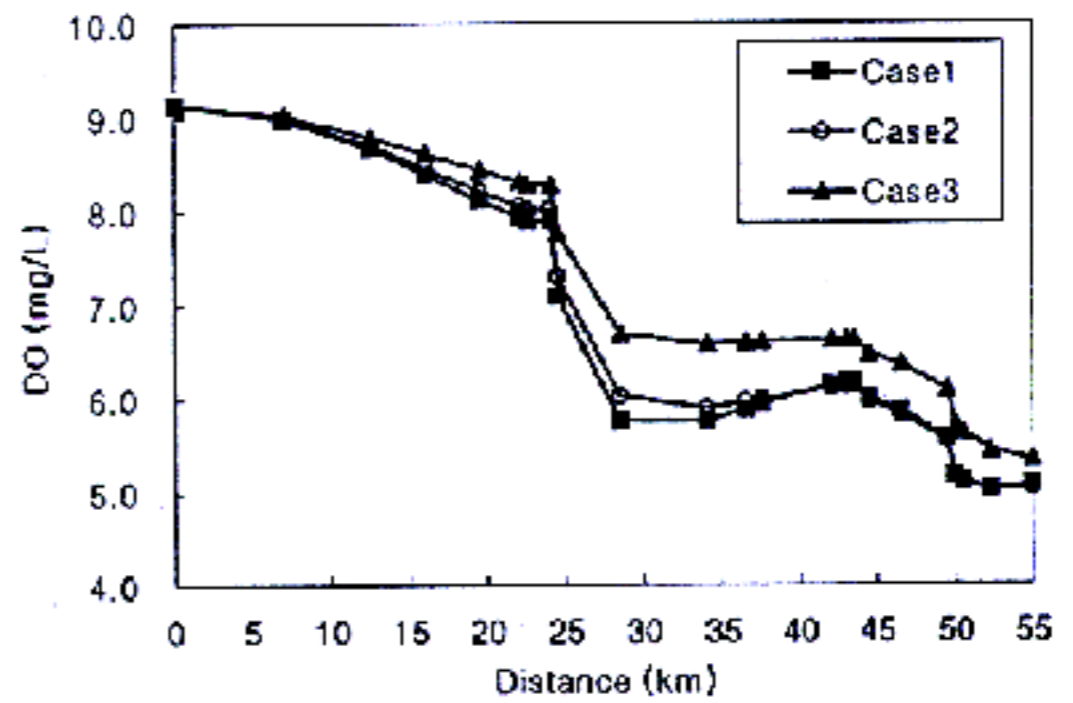


그림 4. Case별 DO 계산결과

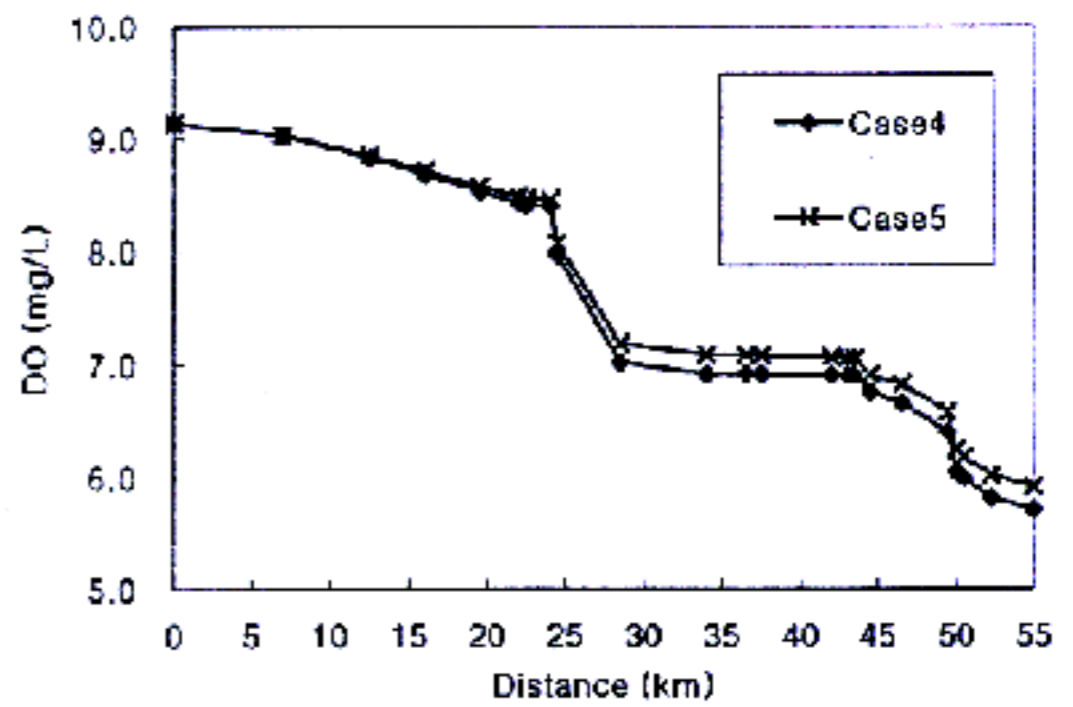


그림 5. Case별 DO 계산결과

표 2. Case별 하수처리장 처리효율과 처리비용

구 분		탄천STP	중량STP	난지STP	가양STP
Case 1	처리효율 (%)	87.5	95.0	87.5	95.0
	처리비용 (억 원/년)	2048.75			
Case 2	처리효율 (%)	87.5	87.5	87.5	95.0
	처리비용 (억 원/년)	1650.80			
Case 3, 4, 5	처리효율 (%)	87.5	87.5	87.5	87.5
	처리비용 (억 원/년)	1212.88			

표 3. 최적해의 총처리비용의 110% 이내의 대안들(Case 1)

구 분	처리효율(%)				총처리비용(억 원/년)
	탄천STP	중랑STP	난지STP	가양STP	
No.1	87.5	95.0	90.0	95.0	2106.72
No.2	90.0	95.0	87.5	95.0	2110.14
No.3	90.0	95.0	90.0	95.0	2168.11
No.4	87.5	90.0	95.0	97.5	2180.31
No.5	95.0	90.0	87.5	97.5	2192.95
No.6	87.5	97.5	87.5	95.0	2237.06
No.7	90.0	90.0	95.0	97.5	2241.69
No.8	95.0	90.0	90.0	97.5	2250.92

표 4. 최적해의 총처리비용의 110% 이내의 대안들(Case 2)

구 분	처리효율(%)				총처리비용(억 원/년)
	탄천STP	중랑STP	난지STP	가양STP	
No.1	87.5	87.5	90.0	95.0	1708.78
No.2	90.0	87.5	87.5	95.0	1712.19
No.3	87.5	95.0	87.5	90.0	1729.05
No.4	87.5	90.0	87.5	95.0	1758.23
No.5	90.0	87.5	90.0	95.0	1770.16
No.6	87.5	95.0	90.0	90.0	1787.02
No.7	90.0	95.0	87.5	90.0	1790.44

표 5. 최적해의 총처리비용의 110% 이내의 대안들(Case 3)

구 분	처리효율(%)				총처리비용(억 원/년)
	탄천STP	중랑STP	난지STP	가양STP	
No.1	87.5	87.5	90.0	87.5	1270.85
No.2	90.0	87.5	87.5	87.5	1274.27
No.3	87.5	90.0	87.5	87.5	1320.30
No.4	87.5	87.5	87.5	90.0	1331.10
No.5	90.0	87.5	90.0	87.5	1332.24

처리비용은 다음 표 2와 같다. Case 1에서는 중랑 및 가양하수처리장에서 3차 처리를 해야 하고, Case 2는 가양하수처리장에서 3차 처리를 해야 하는 것으로 나타난다. Case 3, 4, 5에서는 각 하수처리장에서 활성슬러지처리를 하면 수질기준을 만족한다. 각 Case별 처리효율에 따라 계산된 각 지점의 DO농도는 그림

4, 그림 5와 같다. 하천유량이 증가함에 따라 DO농도도 점차 증가한다. Case 1, 2, 3에 대해 최적해의 처리비용의 110% 이내에 드는 대안들을 표 3, 4, 5에 표시하였다. Case 4, 5는 Case 3과 동일하다. 최적해에 의한 하수처리장 운영이 불가능시는 각 대안에 대해서 검토해 볼 수 있다.



### 5. 결 론

1) 하천수량의 가변성을 고려하면서 하천수질기준을 만족하고 지역내 하수처리비용의 최적화문제를 해결할 수 있는 동적계획법의 수질관리모형을 개발하였다.

2) 계산된 최적해로 하수처리장 운용이 불가능할 때는 추가로 계산되는 순위별 최적 대안을 참고하여 하수처리장을 운용할 수 있다.

2) 2001년 가을에 서울시내 4개 하수처리장에서 정상적으로 표준활성슬러지처리를 하면 수질기준을 만족하는 신뢰도는 70% 정도이다.

3) 2001년 가을에 한강하류부 대상구간의 수질기준을 만족하는 신뢰도가 90%가 되려면 서울시내 4개 하수처리장에서 연간 2048 억 원, 80%의 신뢰도를 만족하려면 연간 1650억 원, 70% 신뢰도를 만족하려면 연간 1212억 원의 하수처리비용이 소요된다.

### 참고문헌

1. Fujiwara, O., Gnanendran, S.K., Ohgaki, S., "River Quality Management under Stochastic Streamflow," *Journal of the Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 2, pp.185-198, 1986.
2. 조재현, 박중현, "추계학적 비선형계획에 의한 하천수질관리," *한국상하수도학회지*, 제3권, 제

- 2호, pp.1-16, 1990.
3. Vajda, S., *Probabilistic Programming*, Academic Press, New York, 1972, pp.78-84.
4. Taha, H.A., *Operation Rcsearch*, Macmillan Publishing Company, New York, pp.802-805, 1987.
5. Revelle, C.S., Loucks, D.P., Lynn, W.R., "Linear Programming Applied to Water Quality Management," *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 1, pp.1-9, 1968.
6. Liebman, J.C., Lynn, W.R., "The Optimal Allocation of Stream Dissolved Oxygen," *Water Rcsources Research*, Vol.2, No.3, pp.581-591, 1966.
7. 환경부, 환경통계연감, 1995.
8. 서울시, 하수도기본계획제정비보고서, 1992.
9. 서울시 상수도사업본부, 강북정수장계통 송수관로 실시설계보고서, 1993.
10. Klemetson, S.L., Grenny, W.J., "Physical and Economic Parameters for Planning Regional Wastewater Treatment Systems," *Journal WPCF*, Vol. 48, No. 12, pp.2690-2699, 1976.
11. Smith, R., "Cost of Conventional and Advanced Treatment of Wastewater," *Journal WPCF*, Vol. 40, No. 9, pp.1546-1574, 1968.
12. 조재현, "추계학적계획모형을 이용한 하천수질관리," *대한토목학회논문집* 제14권 제1호, 1994.
13. 통계청, 한국주요경제지표, 1996.
14. 조재현, 추계학적 계획모형을 이용한 하천수질관리, KOSEF 913-1304-007-1, 한국과학재단, 1992.
15. 환경부, 하수도통계, 1995.