

## 추계학적 계획모형을 이용한 하천수질관리

## Stochastic Programming Model for River Water Quality Management

조 재 현\*

Cho, Jae Heon

## Abstract

A stochastic programming model for river water quality management was developed. River water quality, river flow, quality and flowrate of the wastewater treatment plant inflow were treated as random variables in the model. Withdrawal for water supply and submerged weir reaeration were included in the model itself. A probabilistic model was formulated to compute the expectation and variance of water quality using Streeter-Phelps equation. Chance constraints of the optimization problem were converted to deterministic equivalents by chance constrained method. Objective function was total annual treatment cost of all wastewater treatment plants in the region. Construction cost function and O & M cost function were derived in the form of nonlinear equations that are functions of treatment efficiency and capacity of treatment plant. The optimization problem was solved by nonlinear programming. This model was applied to the lower Han River. The results show that the reliability to meet the DO standards of the year 1996 is about 50% when the treatment level of four wastewater treatment plants in Seoul is secondary treatment, and BOD load from the tributary inflows is the same as present time. And when BOD load from Tanchon, Jungangchon, and Anyangchon is decreased to 50%, the reliability to meet the DO standards of the year 1996 is above 60%. This results indicated that for the sake of the water quality conservation of the lower Han River, water quality of the tributaries must be improved, and at least secondary level of treatment is required in the wastewater treatment plants.

## 요 지

본 연구에서는 하천본류의 유량과 수질, 하수처리장 유입수량과 유입수질을 확률변수로 두고, 취수 문제와 수중보에 의한 재포기현상을 포함하는 추계학적 하천수질관리모형을 개발하였다. Streeter-Phelps식을 이용해서 각 구간 하천수질의 기대값과 분산을 계산하는 확률모형을 만들고, 최적화문제의 확률적 제약식은 chance constrained 방법을 이용해서 확정적 제약식으로 변환한다. 목적함수는 지역내 하수처리장의 연간처리비용으로 두었다. 건설비용함수와 유지관리비함수는 처리효율과 처리용량의 함수인 비선형의 단일식으로 유도되었다. 최적화문제는 비선형계획법으로 해를 구하였다. 본 모형을 한강하류부에 적용한 결과 서울시내 4개 하수처리장에서 2차처리를 하고, 지천유입수의 BOD부하량이

\* 정희원 · 관동대학교 이공대학 환경공학과 부교수

현재와 같을 때, 1996년 DO수질기준을 만족하는 신뢰도는 50% 정도였다. 그리고 탄천, 중랑천, 안양천의 BOD부하량을 현재보다 50% 감소시켰을 때 1996년 DO수질기준을 만족하는 신뢰도는 60% 이상이였다. 따라서 한강하류부의 수질보전을 위해서는 유입지천의 수질개선과 2차처리 이상의 하수처리가 요구된다.

## 1. 서 론

하천수질관리에 있어서는 하천수질보전이라는 수질목표와 수질관리비용의 최소화라는 경제적 목표를 동시에 만족해야 한다. 이러한 관점에서 하천수질관리모형을 수립하여 하천수질관리에 이용하게 되었다. Revelle 등,<sup>(1,2)</sup> Johnson,<sup>(3)</sup> Arbabi,<sup>(4)</sup> 이순탁 등,<sup>(5)</sup> 구자공 등<sup>(6)</sup>은 선형계획법에 의한 하천수질관리모형을 개발하였고, 구자공 등<sup>(7)</sup>은 혼합정수계획법을 이용하여, Liebman 등<sup>(8)</sup>은 동적계획법을 이용하여, 그리고 Pingry 등,<sup>(9)</sup> McNamara 등,<sup>(10)</sup> Ecker<sup>(11)</sup>은 비선형계획법을 이용하여 하천수질관리모형을 개발한 바 있다. 그러나 이러한 확정적 하천수질관리모형은 각 수질영향인자의 함수로서 나타나는 수질현상을 잘 반영하지만 각 수질영향인자가 일정하게 주어져서 하천수질의 한 단면만으로 수질관리계획을 수립하게 되는 단점이 있다.

추계학적 하천수질관리모형은 하천수질에 영향을 미치는 수질영향인자를 확률변수로 두어서 하천수질의 변동특성을 고려할 수 있다. 또한 대상하천의 목표수질을 달성하는 신뢰도를 도출할 수 있는 장점이 있다. Lohani 등<sup>(12-14)</sup>은 Camp의 용존산소수지모형을 이용해 각 구간 하류의 DO수질기준을 만족하는 각 구간 상류의 최대허용 BOD부하량을 구하고, 각 처리장으로부터의 BOD부하량이 각 구간 상류의 최대허용 BOD부하량보다 적게 되도록 확률적 제약식을 구성하고 chance constrained 방법<sup>(15-17)</sup>을 이용하여 확정적 제약식으로 변환하였다. 각 구간의 하천유량을 확률변수로 두었고, 목적함수에는 선형의 하수처리비용함수를 이용하였다. 각 신뢰도별로 수질기준을 만족하는 하수처리장의 최적처리효율을 선형계획법으로 결정하였다. 그러나 각 구간 상류의 최대허용 BOD부하량은 각 구간 상류의 초기 DO부족량을 알 때만 계산 가능하고, 초기 DO부족량은 수질관리모형의 계산결과로서만

알 수 있기 때문에 해의 정확도가 떨어지는 문제가 있다.<sup>(18)</sup> Fujiwara 등<sup>(18)</sup>은 Lohani 등의 모형에서 나타난 문제점을 개선하였다. Streeter-Phelps식과 그가 개발한 반복식으로 하류 각 구간의 수질을 수식화하여 DO수질기준을 만족하도록 하는 확률적 제약식을 만들고, chance constrained 방법을 이용해서 확정적 제약식으로 변환하였다. 여기서도 하천유량을 확률변수로 두었고, 선형계획법으로 최적화문제를 풀어서 DO수질기준을 만족하는 하수처리장의 최적처리효율을 결정하였다. 한편 Fujiwara 등<sup>(19)</sup>은 하천유량과 지천유량을 확률변수로 두는 chance constrained 모형을 제시한 바 있다. 조재현 등<sup>(20)</sup>은 하천분류유량과 하수처리장 유입수량을 확률변수로 보고, 처리효율의 함수로 하수처리비용함수를 각 처리장별로 구하여 최적화문제의 목적함수로 이용하는 비선형계획법의 수질관리모형을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 Fujiwara 등<sup>(18)</sup>의 반복식을 이용하여 취수까지 고려한 수질모형을 만들어서 수질관리모형의 수질계산을 하도록 하였다. 또한 Lohani 등<sup>(12-14)</sup>과 Fujiwara 등<sup>(18)</sup>의 모형에서는 하천유량만이 확률변수로 고려되고, Fujiwara 등<sup>(19)</sup>의 모형에서는 하천유량과 지천유량이 확률변수로 고려되는 점을 개선하여 본 모형에서는 대상하천 최상류부의 유량과 수질, 각 하수처리장의 처리수량과 유입수질, 유입지천의 유량과 수질등 하천수질에 큰 영향을 미치는 수질영향인자들을 확률변수로 고려할 수 있도록 하였다. 수증보에 의한 재포기현상도 모형에 포함되었다. 국내외의 처리비용자료를 이용해 중선형회귀분석하여 처리효율과 처리장용량의 함수로 표시되는 비선형의 처리비용함수를 만들어서 최적화에 이용하였다. 본 수질관리모형을 현재의 수역별 환경기준<sup>(21)</sup>을 적용한 경우와 96년 목표치의 수역별 환경기준적용등급<sup>(22)</sup>을 적용한 경우에 대하여 한강 하류부에 실제 적용하였다.

## 2. 수질모형

침전가능한 부유물질을 다량 함유한 지천이 유입된 직후의 하천에는 침전에 의한 BOD의 제거량이 많기 때문에, 본 수질관리모형에서는 BOD 분해와 침전을 고려한 다음의 Streeter-Phelps식을 적용하였다.

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

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

여기서  $L_i$  =  $i$ 구간 하류의 최종BOD농도(mg/l)

$L_{is}$  =  $i$ 구간 상류의 최종BOD농도(mg/l)

$D_i$  =  $i$ 구간 하류의 DO부족량(mg/l)

$D_{is}$  =  $i$ 구간 상류의 DO부족량(mg/l)

$\rho_i = \exp(-k_{ri}t_i)$

$\beta_i = \exp(-k_{ai}t_i)$

$k_{ri} = k_{di} + k_{si}$

$k_{ai}$  = 재포기계수(1/day)

$k_{di}$  = 탈산소계수(1/day)

$k_{si}$  = 침전계수(1/day)

$$\gamma_i = \frac{k_{di}}{k_{ai} - k_{ri}} (\rho_i - \beta_i)$$

본 연구에서는 수중보(submerged weir)에 의한 재포기현상을 수질모형에 포함시켰는데, Butts 등<sup>(23)</sup>의 다음 식을 적용하여 수중보 하류의 DO농도를 계산한다.

$$\frac{D_a}{D_b} = 1 + 0.38 abH(1 - 0.11 H)(1 + 0.046 T) \quad (3)$$

여기서  $D_a$ ,  $D_b$ 는 수중보 위와 수중보 아래의 DO부족량(mg/l),  $H$ 는 낙차(m),  $T$ 는 수온(°C),  $a$ ,  $b$ 는 계수이다. 한강하류부예의 적용시 잠실수중보의  $H$ 는 3.7 m,  $ab$ 는 0.82를 적용하였다.

일반적인 용존산소수지모형을 이용해 확률모형을 만들 때 각 구간마다 확률변수의 특성을 알아야 하는 문제점이 있기 때문에 본 모형에서는 하천 본류와 지천 그리고 하수처리장과 오염원별로 각각의 하천으로의 유입수는 독립된 가닥으로 가정한다. 각 가닥의 수질은 Fujiwara 등<sup>(18)</sup>의 반복식 개념으로 계산하고, 여기에 취수문제를 포함시켜 개발한 조재현 등<sup>(20)</sup>의 아래와 같은 DO수지모형으로 하천수질을

계산한다.

$$H_i^k = \frac{QE_i + \sum_{k=1}^i q_k e_i^k + \sum_{k=1}^i q_k e_i^k - \sum_{k=1}^i w_k h_i^k}{Q + \sum_{k=1}^i q_k + \sum_{k=1}^i q_k - \sum_{k=1}^i w_k} \quad (4)$$

$$h_i^k = P_i^k G_{k-1} + R_i^k H_{k-1} \quad (5)$$

$$G_i = \frac{QB_i + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k - \sum_{k=1}^i w_k g_i^k}{Q + \sum_{k=1}^i q_k + \sum_{k=1}^i q_k - \sum_{k=1}^i w_k} \quad (6)$$

$$g_i^k = BR_i^k G_{k-1} \quad (7)$$

여기서  $h_i^k$ ,  $g_i^k$  =  $k$ 번째 취수량이 그대로 하천으로 흘렀을 때  $i$ 구간 하류에서의 DO부족량과 최종 BOD농도(mg/l)

$w_k$  =  $k$ 번째 취수량(m<sup>3</sup>/sec)

$P_i^k$ ,  $R_i^k$  =  $k$ 번째 취수량의  $i$ 구간에서의 DO부족량 영향인자

$BR_i^k$  =  $k$ 번째 취수량의  $i$ 구간에서의 BOD농도 영향인자

$G_{k-1}$ ,  $H_{k-1}$  =  $k$ 번째 취수직전 하천의 최종BOD와 DO부족량(mg/l)

$H_i$ ,  $G_i$  = 본 수질관리모형에서  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종BOD농도(mg/l)

$E_i$ ,  $B_i$  = 최상류 본류류량  $Q$ 에 의한  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종BOD농도(mg/l)

$q_k$  =  $k$ 번째 하수처리장 배출수량(m<sup>3</sup>/sec)

$q_k$  =  $k$ 번째 지천 유입수량(m<sup>3</sup>/sec)

$e_i^k$ ,  $b_i^k$  =  $k$ 번째 하수처리장 배출수에 의한  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종BOD농도(mg/l)

$e_i^k$ ,  $b_i^k$  =  $k$ 번째 지천 유입수에 의한  $i$ 구간 하류의 DO부족량과 최종BOD농도(mg/l)

위의 (4)~(7)식의  $E_i$ ,  $e_i^k$ ,  $e_i^k$ ,  $B_i$ ,  $b_i^k$ ,  $b_i^k$ ,  $P_i^k$ ,  $R_i^k$ ,  $BR_i^k$ 는 (1), (2)식과 Fujiwara 등<sup>(18)</sup>의 반복식을 이용해서 계산한다.<sup>(20)</sup> 여기서  $R_i^k = \beta_i \beta_{i-1} \cdots \beta_{k+1} \beta_k$ ,  $BR_i^k = \rho_i \rho_{i-1} \cdots \rho_k + 1 \rho_k$ 이고,  $P_i^k$ 는 반복적인 수식표현이 너무 복잡하므로 예를들면  $P_4^2 = (\gamma_4 \rho_3 + \gamma_3 \beta_4) \rho_2 + \beta_4 \beta_3 \gamma_2$ 와 같다.

### 3. 하수처리장의 처리비용함수

본 연구에서는 처리장용량과 BOD제거효율의 함수로 표시되는 하수처리비용함수를 도출하고자 한다. 하수처리비용자료로 국내의 하수처리장 비용자료<sup>(24,25)</sup>가 있으나 주로 활성슬러지 처리방식에 국한되어 있기 때문에 국내자료만으로는 처리효율별 비용함수를 구할 수 없다. Klemetson 등,<sup>(26)</sup> Smith<sup>(27)</sup>의 처리비용자료와 국내자료를 이용해서 처리용량과 처리효율의 함수로 단일식의 처리비용함수를 구하고 국내비용자료와 비교하여 그 적용성을 검토한다. 처리장건설비용은 ENR-B Cost Index<sup>(28)</sup>와 GNP Deflator<sup>(29)</sup>를 기준으로 1990년 원화로 환산하였고, 유지관리비용은 Labor Rates<sup>(30)</sup>와 가스수도업의 산업별 임금지수<sup>(29)</sup>를 기준으로 산출하였다.

#### 3.1 건설비용함수

처리효율별 하수처리장 건설비용함수는 1차처리, 표준살수여상, 표준활성슬러지, 암모니아 stripping, 여과, 흡착 등의 공정에 대해서 처리효율별로 구하였다. 각 용량에 적합한 처리효율별 건설비용함수는 처리효율이 높아짐에 따라 처리비용이 점차 증가되는 것을 감안하여 아래의 3차함수 형태로 구하였다.<sup>(31)</sup>

$$Y = a + b(X - c)^3 \quad (8)$$

여기서 X는 처리효율(0.35 ≤ X ≤ 0.975), Y는 건설비용(억원), a, b, c는 상수이다. (8)식에서 c의 변곡점은 Y와 (X - c)<sup>3</sup>간의 상관계수가 가장 높게 되는 값으로 0.58을 채택하였다. 한편 처리장건설비용을 처리장용량과 처리효율의 함수로 표현하기 위해 위의 (8)식의 처리효율별 비용함수에다 처리장용량함수를 결합하여 다음 식과 같은 형태로 나타내었다.<sup>(31)</sup>

$$Y = dQ^e [f(X - 0.58)^3 + 1]^h \quad (9)$$

(9)식에서 Q는 하수처리장용량(만톤/일), X는 처리효율(0.35 ≤ X ≤ 0.975), d, e, f, h는 상수이다. 처리장용량 Q가 일정하고, c는 0.58로 두고, h를 1로 둔다면, (8)식과 (9)식은 동일식이 되고, (9)식의 f는 (8)식의 b/a와 같게 된다. (8)식은 처리용량이 일정할 때의 처리효율별 처리장건설비용함수이므로 처리용

량을 변화시켜가면서 (8)식의 b/a값을 구했을 때 각 용량에 대한 평균값이 22.6221이고 편차가 미소하므로 f값으로 22.6221을 채택하였다. (9)식의 좌우변에 log를 취하고, 1만톤/일부터 198만톤/일까지의 처리효율별 비용자료를 적용해 중선형회귀분석으로 d, e, h값을 결정하였다. 도출된 처리장 건설비용함수는 다음과 같다.

$$Y = 37.0425 Q^{0.7921} [22.6221(X - 0.58)^3 + 1]^{0.9925} \quad (10)$$

중선형회귀분석 결과 잔차차승평균(MSE)이 0.0012, 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.9964, 검정통계량 F<sub>0</sub>는 10399.61이었다.

#### 3.2 유지관리비함수

대용량의 처리장에서는 살수여상의 유지관리비자료를 적용하는데 난점이 있기 때문에 활성슬러지 이상의 처리를 대상으로 비용함수를 도출하였다. 유지관리비함수의 도출 방법은 앞의 건설비용함수 도출과 같은 방법으로 하였고, (8)식으로 변곡점과 b/a값을 구한 결과 대용량과 소용량에서 차이가 있기 때문에 10만톤/일 이상 용량과 10만톤/일 이하 용량으로 구분하여 구하였다. 중선형회귀분석시킨 결과 도출된 유지관리비함수는 다음과 같다.

$$10\text{만톤/일 이하} : Y = 1.8720 Q^{0.7582} [322.3220 (X - 0.76)^3 + 1]^{0.9857} \quad (11)$$

$$10\text{만톤/일 이상} : Y = 1.4461 Q^{0.7597} [193.5812 (X - 0.70)^3 + 1]^{0.9974} \quad (12)$$

여기서 Q는 하수처리장용량(만톤/일), X는 처리효율(0.875 ≤ X ≤ 0.975), Y는 유지관리비(억원/년)이다. 중선형회귀분석 결과 10만톤/일 이하 시 R<sup>2</sup>=0.9948, MSE=0.0007, F<sub>0</sub>=2123.56이었고, 10만톤/일 이상 시 R<sup>2</sup>=0.9933, MSE=0.0008, F<sub>0</sub>=2370.81이었다. 이상의 처리장건설비함수와 유지관리비함수를 국내자료<sup>(24,25)</sup>와 비교한 것은 표 1과 같고, 그 차이가 미소하므로 개괄적인 처리비용을 산정할 때 본 연구의 처리비용함수가 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 처리비용의 비교

처리장	용량 (만톤/일)	건설비(억원)		유지관리비(억원/년)	
		본 연구의 비용합수	사업비*	본 연구의 비용합수	하수도정책방향 연구의 비용곡선**
탄천	50	1293.7	1159.2	57.4	52.1
부산장림	30	863.2	1000.4	39.0	37.0
수원	15	498.5	529.8	23.0	23.3
구리	5	208.8	163.0	9.4	11.2
과천	3	139.3	127.2	6.4	7.9

\*하수도<sup>(24)</sup>의 사업비로부터 90년 원화로 환산

\*\*하수도정책방향연구<sup>(25)</sup>의 비용곡선으로부터 90년 원화로 환산

#### 4. 추계학적 하천수질관리모형

##### 4.1 최적화문제

하수처리비용 중 현재 기시설된 처리장의 기존 건설비와 목표년도에 대한 추가용량의 건설비를 고정비용(fixed cost)으로 보고, 추가되는 용량과 현재 용량을 합한 목표년도의 전체용량에 대한 유지관리비와 현재 상태에서 처리효율을 증가시키는데 드는 추가 건설비용을 변동비용(variable cost)으로 산정했다. 총건설비용의 연차등가액에 연간 유지관리비를 합한 연간처리비용으로 비용합수를 구하고, 내구년한 20년, 사회적 할인율 10%를 적용한다. 최적화문제의 목적함수로는 변동비용합수를 사용하였다.

하천의 DO농도는 BOD, TKN, SOD, 수중조류의 광합성과 호흡, 재포기 등에 의한 복합적인 영향을 받는 대표적인 하천수질항목이므로 일반적인 하천수질관리모형에서는 목표수질항목으로 DO농도를 택하고 있다.<sup>(1-14,18,19)</sup> 따라서 본 수질관리모형에서는 DO농도를 목표수질항목으로 하였다. 각 구간에서의 수질은 (4)~(7)식으로 계산하고 각 구간 하류에서 최대한 허용할 수 있는 DO부족량(HA<sub>i</sub>)을 만족하는 신뢰도 α<sub>i</sub>를 포함해서 다음과 같은 확률적 제약식이 구성된다.

$$P\{H_i \leq HA_i\} \geq \alpha_i \quad \forall i \quad (13)$$

확률적 제약식을 최적화문제로 구성하기 위해서는 확정적 제약식으로 변환시켜야 된다. Chance constrained 방법을 적용하여<sup>(15-17)</sup> (13)식의 다변수 확률

부등식을 확정적 제약식으로 변환하면 다음과 같이 된다.<sup>(20)</sup>

$$E\{H_i\} + F_{\alpha_i}^{-1}(\alpha_i)(\text{Var}\{H_i\})^{1/2} \leq HA_i \quad \forall i \quad (14)$$

본 모형의 최적화문제는 목적함수와 제약식이 비선형인 형태이므로 비선형계획으로 해석한다. 비선형계획의 해석에는 ADS(A Fortran Program for Automated Design Synthesis) version 2.01<sup>(32)</sup>의 augmented Lagrange multiplier method 알고리즘을 사용한다.

##### 4.2 확률모형

###### 4.2.1 기대값

2장의 (4)식에서 분자를 M<sub>i</sub>, 분모의 역수를 N<sub>i</sub>라 두고 M<sub>i</sub>와 N<sub>i</sub>는 서로 독립이라고 가정하면 H<sub>i</sub>의 기대값은 다음과 같다.

$$E\{H_i\} = E\{M_i\}E\{N_i\} \quad \forall i \quad (15)$$

분류 최상류의 유량 Q, BOD농도 L<sub>0</sub>, DO부족량 D<sub>0</sub>와 하수처리장의 배출수량 q<sub>k</sub>, 유입수BOD l<sub>k</sub>를 확률변수로 둘 때 M<sub>i</sub>의 기대값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\{M_i\} = & P_i[E\{Q\}E\{L_0\} + \text{Cov}\{Q, L_0\}] \\ & + R_i[E\{Q\}E\{D_0\} + \text{Cov}\{Q, D_0\}] \\ & + \sum_{k=1}^i P_i^k(1-X_k)[E\{q_k\}E\{l_k\} \\ & + \text{Cov}\{q_k, l_k\}] + \sum_{k=1}^i R_i^k d_k E\{q_k\} \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k=1}^i q_k e_i^k - \sum_{k=1}^i [w_k P_i^k E\{Q_{k-1}\} + w_k R_i^k E\{H_{k-1}\}] \quad \forall i \quad (16)$$

2장의 (6)식에서 분자를  $GM_i$ , 분모의 역수를  $GN_i$ 라고 두고  $GM_i$ 와  $GN_i$ 는 독립이라고 가정하면  $E\{G_{k-1}\}$ 와  $E\{GM_i\}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$E\{G_i\} = E\{GM_i\} E\{GN_i\} \quad \forall i \quad (17)$$

$$E\{GM_i\} = BR_i [E\{Q\} E\{L_0\} + Cov\{Q, L_0\}]$$

$$+ \sum_{k=1}^i BR_i^k (1-X_k) [E\{l_k\} E\{q_k\} + Cov\{l_k, q_k\}] + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k - \sum_{k=1}^i w_k BR_i^k E\{G_{k-1}\} \quad \forall i \quad (18)$$

(15)~(18)식을 반복 적용하여  $E\{GM_i\}$ ,  $E\{G_i\}$ ,  $E\{M_i\}$ ,  $E\{H_i\}$ 의 순으로 전 구간의 BOD와 DO부족량의 기대값을 계산한다.

#### 4.2.2 분산

기대값 계산과 같이 분자를  $M_i$ , 분모의 역수를  $N_i$ 라 두고 서로 독립이라고 가정하면 DO부족량과  $M_i$ 의 분산은 다음과 같다.

$$Var\{H_i\} = [E\{M_i\}]^2 Var\{N_i\} + [E\{N_i\}]^2 Var\{M_i\} + Var\{M_i\} Var\{N_i\} \quad \forall i \quad (19)$$

$$Var\{M_i\} = Var\{QE_i + \sum_{k=1}^i q_k e_i^k + \sum_{k=1}^i q_k e_i^k - \sum_{k=1}^i w_k h_i^k\} \\ = (P_i)^2 Var\{QL_0\} + (R_i)^2 Var\{QD_0\} \\ + \sum_{k=1}^i (1-X_k)^2 (P_i^k)^2 Var\{q_k l_k\} + \sum_{k=1}^i (R_i^k d_k)^2 Var\{q_k\} \\ + 2P_i R_i Cov\{QL_0, QD_0\} + 2 \sum_{k=1}^i P_i (1-X_k) P_i^k Cov\{QL_0, q_k l_k\} \\ + 2 \sum_{k=1}^i R_i R_i^k d_k Cov\{QD_0, q_k\} \\ + 2 \sum_{k=1}^i P_i R_i^k d_k Cov\{QL_0, q_k\} \\ + 2 \sum_{k=1}^i R_i (1-X_k) P_i^k Cov\{QD_0, q_k l_k\} \\ + 2 \sum_{k=1}^i R_i R_i^k d_k Cov\{QD_0, q_k\} \\ + \sum_{l \neq m} [(1-X_l) P_l^l] [(1-X_m) P_l^m] Cov\{q_l l_l, q_m l_m\}$$

$$+ \sum_{l \neq m} (R_l^l d_l) (R_l^m d_m) Cov\{q_l, q_m\} \\ + \sum_{l=1}^i \sum_{m=1}^i [(1-X_l) P_l^l] (R_l^m d_m) Cov\{q_l l_l, q_m\} \\ + \sum_{k=1}^i (w_k P_i^k)^2 Var\{G_{k-1}\} + \sum_{k=1}^i (w_k R_i^k)^2 Var\{H_{k-1}\} \quad \forall i \quad (20)$$

i구간 하류BOD  $G_i$ 와  $GM_i$ 의 분산은  $GM_i$ 와  $GN_i$ 가 서로 독립이라고 가정하면 다음과 같이 구해진다.

$$Var\{G_i\} = [E\{GM_i\}]^2 Var\{GN_i\} + [E\{GN_i\}]^2 Var\{GM_i\} + Var\{GM_i\} Var\{GN_i\} \quad \forall i \quad (21)$$

$$Var\{GM_i\} = Var\{QB_i + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k + \sum_{k=1}^i q_k b_i^k - \sum_{k=1}^i w_k g_i^k\} \\ = (BR_i)^2 Var\{QL_0\} + \sum_{k=1}^i (BR_i^k)^2 (1-X_k)^2 Var\{q_k l_k\} \\ + \sum_{l \neq m} BR_i^l (1-X_l) BR_i^m (1-X_m) Cov\{q_l l_l, q_m l_m\} \\ + 2 \sum_{k=1}^i BR_i BR_i^k (1-X_k) Cov\{QL_0, q_k l_k\} \\ + \sum_{k=1}^i (w_k BR_i^k)^2 Var\{G_{k-1}\} \quad \forall i \quad (22)$$

(19)~(22)식을 반복 적용하여 전 구간 DO부족량의 분산값이 계산된다.

## 5. 적용사례

### 5.1 적용대상

본 연구의 적용대상은 팔당댐으로부터 신곡수중보지점까지로 하였다. 이 지역에는 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천등의 하천이 유입되고 있고, 강북, 암사, 구의 등 상수도용수의 취수지점이 있다. 이 지역내 하수처리장 현황을 보면 서울시에 현재 4개 하수처리장이 가동중에 있다. 이중 탄천과 중랑하수처리장은 2차처리를 하고 있고, 안양천과 난지하수처리장은 현재 1차처리를 하고 있으나 93년말 완공목표로 2차처리시설을 건설중에 있다.

본 연구의 수질관리모형은 각 지천과 하수처리장 배출수의 유입지점, 취수지점 등을 기준으로 그림

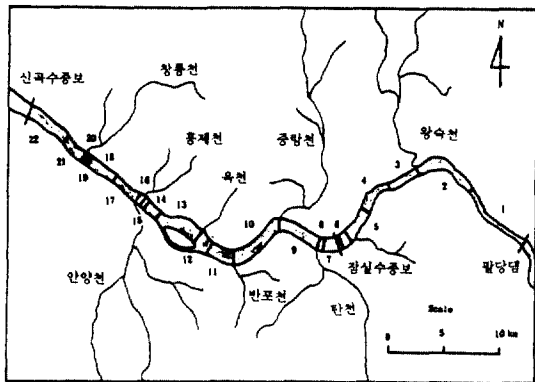


그림 1. 한강하류부의 유역도.

1, 2와 같이 22개의 구간으로 나누었다. 신곡 수중보 완공 이후에는 대조시 역류되기는 하나 하류부 전 구간에 대해서 대조와 소조시의 수질이 별 차이가 없는 것으로 판명되었으므로<sup>(33)</sup> 본 모형에서는 감소 하천이 아닌 일반 하천으로 해석하였다.

### 5.2 수질 및 유량자료

본 모형의 입력자료를 도출하기 위해 서울시내 4개 하수처리장의 유입수질과 수량,<sup>(34)</sup> 팔당댐의 방류량자료<sup>(35)</sup>를 분석하였다. 1990년의 일별 수질 및 유량자료의 계절별 특성은 표 2와 같다. 팔당 방류량은 예년에 비해서 여름과 가을에 심하게 분산되어

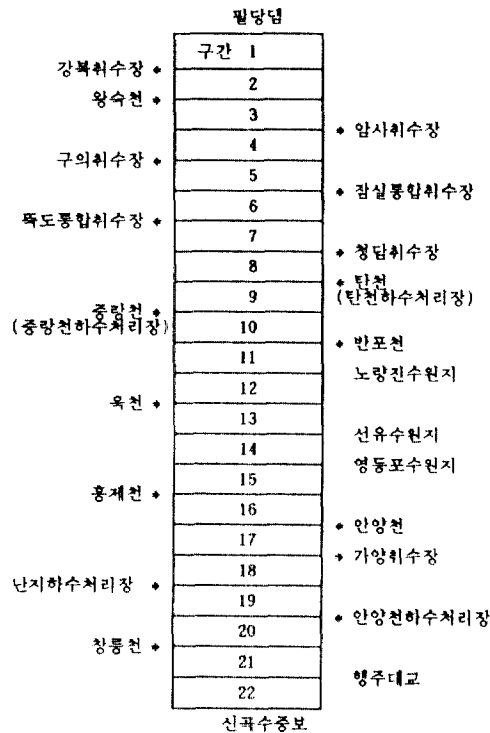


그림 2. 수질관리모형의 구간분할.

있고, 하수처리장 유입수량과 BOD는 여름에 많이 분산되어 있다. 표 2의 일별 수질 및 유량자료의 각 항목간에 상관계수를 검토한 결과 모든 계절에 대

표 2. 수질 및 유량자료의 계절별 평균, 표준편차

단위 : 수량(m<sup>3</sup>/s), BOD(mg/l)

구 분		봄		여름		가을		겨울	
		평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
팔 당	방류량	580.924	150.403	2003.446	2021.410	1454.747	3964.818	293.373	171.500
탄 천	유입수량	7.747	0.581	8.205	1.201	7.485	1.093	7.550	0.659
	유입수BOD	87.163	12.706	80.103	15.780	79.099	18.367	86.627	9.048
중 랑	유입수량	18.659	1.596	22.508	2.768	15.376	2.098	18.198	1.777
	유입수BOD	115.463	8.636	105.525	13.983	101.420	12.773	118.249	15.158
난 지	유입수량	12.118	1.328	10.187	2.738	10.740	2.211	10.495	0.922
	유입수BOD	52.029	9.423	41.372	8.788	46.989	11.590	56.915	24.979
안양천	유입수량	17.072	1.780	15.929	4.136	13.213	6.306	17.933	0.633
	유입수BOD	92.717	16.461	73.630	26.240	69.055	19.267	87.271	12.397

표 3. 수질 및 유량자료간의 상관계수

구 분	팔당 유량	중랑 STP 유량	탄천 STP 유량	안양천 STP 유량	난지 STP 유량	중랑 STP BOD	탄천 STP BOD	안양천 STP BOD	난지 STP BOD
팔당 유량	1.00 1.00								
중랑 유량	-0.38 0.36	1.00 1.00							
탄천 유량	0.20 0.55	0.45 0.48	1.00 1.00						
안양천 유량	0.44 -0.65	0.14 -0.00	0.34 -0.37	1.00 1.00					
난지 유량	0.37 -0.75	0.15 -0.11	0.26 -0.28	0.43 0.77	1.00 1.00				
중랑 BOD	-0.09 -0.24	0.07 -0.13	0.08 -0.25	-0.07 0.15	0.10 0.14	1.00 1.00			
탄천 BOD	0.15 -0.14	-0.14 -0.10	0.11 0.02	0.14 0.29	-0.08 0.22	-0.11 0.26	1.00 1.00		
안양천 BOD	0.10 -0.38	0.03 -0.19	0.08 -0.22	0.07 0.15	0.03 0.28	-0.16 0.24	0.14 0.10	1.00 1.00	
난지 BOD	-0.04 -0.04	-0.21 -0.21	0.07 -0.11	-0.05 -0.07	-0.29 -0.01	0.02 0.22	0.29 0.32	0.04 0.14	1.00 1.00

\*상단값은 봄, 하단값은 여름

구 분	팔당 유량	중랑 STP 유량	탄천 STP 유량	안양천 STP 유량	난지 STP 유량	중랑 STP BOD	탄천 STP BOD	안양천 STP BOD	난지 STP BOD
팔당 유량	1.00 1.00								
중랑 유량	0.58 0.55	1.00 1.00							
탄천 유량	-0.54 0.34	0.26 0.67	1.00 1.00						
안양천 유량	-0.48 0.02	-0.09 0.40	0.35 0.34	1.00 1.00					
난지 유량	-0.80 0.13	-0.37 0.13	0.58 0.22	0.43 -0.03	1.00 1.00				
중랑 BOD	-0.25 0.35	-0.30 0.37	-0.03 0.50	0.27 0.31	0.21 -0.11	1.00 1.00			
탄천 BOD	0.01 -0.23	-0.03 -0.01	-0.03 0.11	0.18 -0.29	-0.01 0.31	0.35 -0.20	1.00 1.00		
안양천 BOD	-0.11 0.06	-0.07 0.23	0.05 0.18	0.20 0.37	-0.05 -0.06	0.14 0.36	0.10 -0.28	1.00 1.00	
난지 BOD	-0.34 -0.04	-0.37 0.29	0.00 0.39	0.37 0.24	0.09 0.11	0.35 0.11	0.25 0.03	0.30 -0.04	1.00 1.00

\*상단값은 가을, 하단값은 겨울



표 4. 수질 및 유량자료의 Chi-square값

구 분		팔당 방류량	중랑 STP 유량	탄천 STP 유량	안양천 STP 유량	난지 STP 유량	중랑 STP BOD	탄천 STP BOD	안양천 STP BOD	난지 STP BOD
정규 분포	봄	65.65	10.72	30.95	42.67	10.41	10.41	29.44	13.15	31.26
	여름	88.63	9.35	10.57	39.18	48.15	9.50	8.59	18.48	14.22
	가을	316.46	55.08	57.85	163.38	89.69	23.23	25.85	4.77	8.15
	겨울	58.34	17.29	10.88	18.24	8.98	19.19	13.49	10.41	96.07
대수 정규 분포	봄	76.61	7.67	27.0	48.91	7.52	9.20	17.72	4.63	22.74
	여름	57.89	18.48	32.78	186.93	192.11	11.33	10.57	5.09	7.07
	가을	83.38	39.38	91.23	338.77	188.15	20.15	12.62	11.23	11.85
	겨울	17.76	14.44	8.51	19.42	8.51	19.42	11.59	14.44	61.42

표 5. 팔당댐 일별방류량의 계절별 평균, 표준편차

구 분	봄	여름	가을	겨울
평 균 (m <sup>3</sup> /s)	305.185	1155.190	520.945	225.942
표준편차 (m <sup>3</sup> /s)	194.474	1558.357	865.582	116.429

해서 자료간의 상관계수가 낮게 나타났다. 각 항목간의 계절별 상관계수는 표 3과 같다.

각 자료의 분포 특성을 알기 위해 IMSL을 이용해서 Chi-square test를 한 결과의 Chi-square값은 표 4와 같다. 자유도가 4이고 유의수준 10%일 때 Chi-square값의 한계치가 7.78이기 때문에 유의수준 10%에서 정규분포의 적합성이 인정되는 것은 가을의 안양천STP BOD이고, 대수정규분포의 적합성이 인정되는 것은 봄의 중랑STP 유량, 난지STP 유량, 안양천STP BOD와 여름의 안양천STP BOD, 난지STP BOD로 나타났다. 한강하류부에서 확률적 제약식이 만들어지는 탄천합류점 이후 구간은 하수처리장 배출수와 오염된 지천에서 많은 오염물질이 유입되고 있어서 DO부족량이 크기 때문에 대수정규분포보다 정규분포가 더 적합하고,<sup>(36)</sup> 가장 최근 자료인 84년 노량진 지점의 자동측정에 의한 DO부족량 분포가 정규분포의 특성을 가지므로 본 모

형의 적용시 DO부족량의 분포는 안정된 정규분포로 가정하였다.

하수처리장의 유입수자료는 다년간의 자료를 이용하면 모형의 정도를 더 높일 수 있으나 자료의 제약으로 인해 본 모형의 한강하류부에서의 적용에 있어서는 앞의 1990년의 자료를 이용하였다. 목표년도인 1996년 하수처리장 유입수량의 평균값은 1996년의 계획일평균하수량<sup>(37)</sup>을 적용하고, 1996년 유입수량의 표준편차는 표 2로부터 계산되는 변동계수와 1996년 유입수량의 평균값을 이용하여 도출하였다. 목표년도의 유입수질은 1990년과 동일한 값을 적용하였다. 각 하수처리장 유입수량과 유입수질, 팔당댐방류량간의 상관계수는 동일시기의 자료로 분석하는 것이 적합하므로 1990년 자료의 분석결과인 표 2의 자료를 본 모형에 적용하였다. 팔당댐방류량의 통계치는 충주댐 완공이후의 1986년부터 1990년까지의 자료를 적용하였다. 일평균방류량이 10,000 m<sup>3</sup>/s 이상되는 5일동안의 자료를 제외하고 1986년부터 1990년까지 팔당댐 일평균방류량의 계절별 평균과 표준편차를 구한 것은 표 5와 같다.

### 5.3 모형의 보정과 최적화문제

본 하천수질관리모형에서는 앞에서 제시된 수질 모형과 확률모형을 결합해서 DO부족량의 기대값과

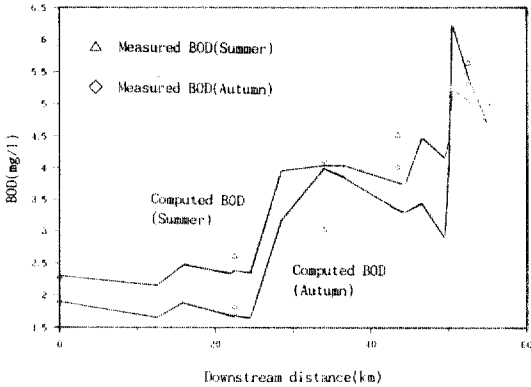


그림 3. 수질모형의 보정결과(BOD).

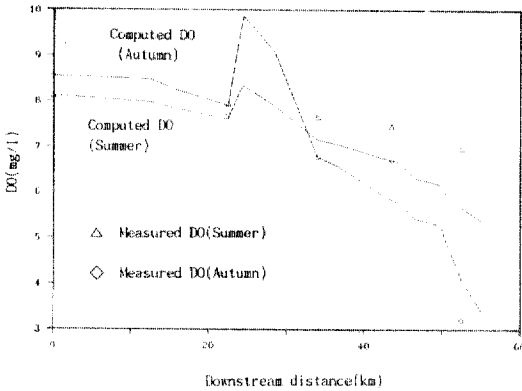


그림 4. 수질모형의 보정결과(DO).

분산을 계산한다. 수질모형의 보정에는 한강 하류부와 각 지천에 대한 91년 8월 6일부터 9일까지의 1차 수질조사와 11월 2일부터 3일까지의 2차 수질조사 결과인 조재현<sup>(38)</sup>의 조사결과를 이용하였다. 수질모형의 보정을 위해서 2차조사의 최종BOD실험결과로 최소자승법을 적용해서 산출한 잠실대교 지점과 행주대교 지점의 20°C 탈산소계수( $K_d$ )는 각각  $0.14 \text{ day}^{-1}$ ,  $0.29 \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 20°C 탈산소계수를 기초로 1차조사(여름)와 2차조사(가을)의 한강 하류부 각 지점 수질이 측정결과와 맞도록 각 구간의 탈산소계수와 침전계수를 조정하였다. 재포기계수는 O'Connor & Dobbins 식으로 도출하였다. 보정의 결과는 그림 3, 4와 같다. 본 연구의 수질관리모형은 대상구간 최상류의 하천유량과 BOD, DO, 그리고 대상구간내 각 하수처리장 처리수량과 유입수질을 확률변수로 둘 수 있도록 프로그램을 작성하였으나

팔당댐 BOD와 DO의 일별자료가 없기 때문에, 한강하류부의 적용에 있어서는 팔당댐 방류량과 서울 시내 4개 하수처리장의 처리수량 및 유입수 BOD를 확률변수로 고려하였다. 확률변수로 고려한 항목간의 공분산도 계산에 포함되었다.

#### 5.4 적용결과

본 연구의 적용시점은 서울시하수도기본계획<sup>(37)</sup>의 장기 1단계 목표년도인 1996년으로 하였다. 보정을 위한 현장의 수질측정이 여름과 가을에 이뤄졌으므로 본 관리모형을 여름과 가을에 대해 적용하였다. 본 연구에서는 수질관리모형의 일반적인 수질항목인 DO농도의 수질기준을 만족하는 신뢰도별 처리효율과 처리비용을 계산하였다. 계산이 수행된 신뢰도는 60%, 70%, 80%, 95%에 대해서이다. 하수처리장의 처리비용은 1996년의 계획일평균하수량<sup>(37)</sup>을 기준으로 산출하였고, 96년 계획용량을 기준으로 2차처리 이상으로 처리효율을 높일 때의 추가건설비에 대한 년차등가액과 년간유지관리비를 합하여 처리장의 년간총처리비용으로 하였다. 유입지천의 BOD부하량이 현재와 같다고 보고 현재의 수역별환경기준을 적용한 경우(CASE 1)와 유입지천의 BOD부하량은 현재와 같고 수질기준은 수역별환경기준적용등급<sup>(22)</sup>의 96년 목표치를 적용한 경우(CASE 2)와 탄천, 중랑천, 안양천 유입수의 현재의 BOD부하량을 1/2로 감소시킨다고 보고 수역별환경기준적용등급의 96년 목표치의 수질기준을 적용한 경우(CASE 3)의 세가지 경우에 대하여 분석하였다.

##### 5.4.1 현재기준적용

DO농도의 수질기준을 만족하는 신뢰도별 처리효율과 처리비용의 최적해는 표 6과 같다. 96년 여름에는 각 하수처리장에서 2차처리(87.5% 처리효율)를 할 때 DO의 수질기준에 70% 신뢰도까지 만족되었다. 80% 이상의 신뢰도를 만족하기 위해서는 탄천과 중랑처리장에서 2차처리 이상으로 처리정도를 높여야 한다.

96년 가을에는 각 하수처리장에서 2차처리를 할 때 DO의 수질기준에 60% 신뢰도까지 만족되었다. 70% 신뢰도를 만족하기 위해서는 탄천과 중랑처리장에서 97.5%로 BOD 제거효율을 높여야 한다. 이처럼 가을에 여름보다 수질기준을 만족하기 어려운 것은 팔당댐 일별방류량의 변동계수가 크고, 유량에

**표 6. 신뢰도별 하수처리장 처리효율 및 처리비용 (CASE 1)**

단위 : 처리효율(%), 처리비용(억원)

구 분	여름(60%, 70%)	여름(80%)	가을(70%)
처 탄 천STP	87.5	90.9	97.5
리 중 량STP	87.5	96.5	97.5
효 난 지STP	87.5	87.5	87.5
울 안양천STP	87.5	87.5	87.5
가	0	272.37	976.10
처 나	0	1525.63	1755.10
다	0	0	0
리 라	0	0	0
마	83.64	113.78	205.83
비 바	146.83	330.03	361.34
사	82.09	82.09	82.09
용 아	169.02	169.02	169.02
자	0	211.26	320.91
차	481.57	906.17	1139.18

\*가 : 탄천처리장의 2차처리 이상으로 처리효율 증대 시 건설비  
 나 : 중량처리장의 2차처리 이상으로 처리효율 증대 시 건설비  
 다 : 난지처리장의 2차처리 이상으로 처리효율 증대 시 건설비  
 라 : 안양천처리장의 2차처리 이상으로 처리효율 증대 시 건설비  
 마 : 탄천처리장의 연간 유지관리비  
 바 : 중량처리장의 연간 유지관리비  
 사 : 난지처리장의 연간 유지관리비  
 아 : 안양천처리장의 연간 유지관리비  
 자 : 4개 하수처리장 건설비의 년차동가액(=CRF×(가+나+다+라))  
 차 : 연간 총 처리비용(=마+바+사+아+자)  
 \*\*가을(60%)는 여름(60%, 70%)와 동일

의한 회석효과가 작게 나타나기 때문이다.

5.4.2 목표기준적용

DO농도의 기준치를 수역별환경기준적용등급의

**표 7. 신뢰도별 하수처리장 처리효율 및 처리비용 (CASE 3)**

단위 : 처리효율(%), 처리비용(억원)

구 분	여름(60%)	여름(70%)	가을(70%)
처 탄 천STP	87.5	97.5	94.1
리 중 량STP	87.5	87.5	97.5
효 난 지STP	87.5	87.5	87.5
울 안양천STP	87.5	87.5	89.8
가	0	976.04	585.18
처 나	0	0	1755.10
다	0	0	0
리 라	0	0	365.41
마	83.64	205.83	152.65
비 바	146.83	146.83	361.34
사	82.09	82.09	82.09
용 아	169.02	169.02	207.31
자	0	114.68	317.92
차	481.57	718.45	1121.31

\*가~차 : 표 6과 동일  
 \*\*가을(60%)는 여름(60%)와 동일

96년 목표치에 따라 팔당댐 하류부터 중량천 합류점 전까지는 1등급, 중량천 합류점부터 안양천 합류점 전까지는 2등급, 안양천 합류점부터 신곡수중보지점까지는 3등급을 기준으로 하여 제약식을 만들고 최적화문제의 해를 구하였다(CASE 2). 이때 여름의 경우 신뢰도 50%를 만족하려면 4개 하수처리장에서 87.5%의 2차처리를 하면 되고, 신뢰도 60%를 만족하려면 각 하수처리장에서 97.5%의 고도처리를 하여야 한다. 가을에는 탄천처리장에서 92.1%, 중량처리장에서 97.5%, 난지처리장에서 87.5%, 안양천처리장에서 88.0% 처리할 때 신뢰도 50%를 만족할 수 있었다.

반면에 탄천, 중량천, 안양천 유입수의 BOD부하량을 1/2로 감소시켰을 때(CASE 3)의 신뢰도별 하수처리장 처리효율 및 처리비용은 표 7과 같다. 여

름과 가을 공히 60%의 신뢰도를 만족하려면 4개 하수처리장에서 87.5%의 2차처리를 하면 되었다. 여름에 70%의 신뢰도를 만족하는 데는 탄천처리장에서 97.5%, 중랑, 난지, 안양천처리장에서 각각 87.5%의 처리를 하면 되었다. 가을에 70% 신뢰도를 만족하기 위해서는 탄천처리장에서 94.1%, 중랑처리장에서 97.5%, 난지처리장에서 87.5%, 안양천처리장에서 89.8% 처리가 요구되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 DO농도의 확률모형을 개발하고, 이를 이용하여 처리비용최소화라는 경제적 목표와 수질목표를 동시에 달성하도록 하는 수질관리모형을 개발하여 한강하류부에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 처리장용량과 처리효율의 함수로 표시되는 비선형의 하수처리비용함수를 만들어서 기존의 수질관리모형에서 주로 이용한 선형의 비용함수의 단점을 해소하였다.

2) 하천분류의 용량과 BOD, DO, 각 오염원의 배출량과 BOD등 다수의 수질영향인자를 확률변수로 두고, 확률변수간의 공분산까지 고려한 DO농도의 확률모형을 개발함으로써 하천용량 위주인 기존연구의 단점을 해소하였다.

3) 한강하류부의 각 지천 수질이 현재 상태와 같다고 하고 96년 목표수질을 기준으로 할 때 서울 시내 4개 하수처리장에서 2차처리를 하면 수질기준에 만족되는 신뢰도는 50% 정도이다. 탄천, 중랑천, 안양천 유입수의 BOD부하량을 1/2로 감소시켰을 때는 60% 이상의 신뢰도를 확보할 수 있다. 따라서 유입지천의 수질개선과 2차처리 이상의 하수처리가 한강하류부의 수질보전을 위한 중요한 과제이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 일반기초연구비(과제번호 913-1304-007-1)지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Revelle, C.S., Loucks, D.P. and Lynn, W.R., "A Management Model for Water Quality Control", *Journal WPCF*, Vol. 39, No. 7, 1967, pp. 1164-1183.
2. Revelle, C.S., Loucks, D.P. and Lynn, W.R., "Linear Programming Applied to Water Quality Management", *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 1, 1968, pp. 1-9.
3. Johnson, E.L., "A Study in the Economics of Water Quality Management", *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 2, 1967, pp. 291-305.
4. Arbabi, M. and Elzinga, J., "A General Linear Approach to Stream Water Quality Modelling", *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, 1975, pp. 191-196.
5. 이순탁, 김상경, "선형계획법에 의한 하천구역의 최적수질관리", *한국수문학회지*, 제 16권, 제 3호, 1983, pp. 159-169.
6. 구자공, 이병국, "환경자원의 선용을 통한 경제적 하천수질관리", *대한토목학회논문집*, 제 7권, 제 3호, 1987, pp. 13-21.
7. 구자공, 이병국, 한상욱, "폐수처리장 건설위치와 구간별 하천수질기준의 설정을 위한 방법론 개발", *한국수질보전학회지*, 제 3권, 제 1호, 1987, pp. 61-70.
8. Liebman, J.C. and Lynn, W.R., "The Optimal Allocation of Stream Dissolved Oxygen", *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 3, 1966, pp. 581-591.
9. Pingry, D.E. and Whinston, A.B., "Multigoal Water Quality Planning Model", *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, Vol. 99, No. 6, 1973, pp. 909-922.
10. McNamara, J.R., "An Optimization Model for Regional Water Quality Management", *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 2, 1976, pp. 125-134.
11. Ecker, J.G., "A Geometric Programming Model for Optimal Allocation of Dissolved Oxygen", *Management Science*, Vol. 21, No. 6, 1975, pp. 658-668.
12. Lohani, B.N., *A Chance Constrained Approach to Regional Water Quality Management*, Ph.D. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1977.
13. Lohani, B.N. and Thanh, N.C., "Stochastic Programming Model for Water Quality Management in a River", *Journal WPCF*, Vol. 50, No. 9, 1978, pp. 2175-2182.
14. Lohani, B.N. and Thanh, N.C., "Probabilistic Water Quality Control Policies", *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, Vol. 104,

- No. 4, 1979, pp. 713-725.
15. Vajda, S., *Probabilistic Programming*, Academic Press, New York and London, 1972, pp. 78-84.
  16. Taha, H.A., *Operations Research*, Macmillan Publishing Company, New York, 1987, pp. 802-805.
  17. Stancu-Minasian, I.M., *Stochastic Programming with Multiple Objective Functions*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht/Boston/Lancaster, 1984, pp. 113-118.
  18. Fujiwara, O., Gnanendran, S.K. and Ohgaki, S., "River Quality Management under Stochastic Streamflow", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 2, 1986, pp. 185-198.
  19. Fujiwara, O., Gnanendran, S.K. and Ohgaki, S., "Chance Constrained Model for River Water Quality Management", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 5, 1987, pp. 1018-1031.
  20. 조재현, 박중현, "추계학적 비선형계획에 의한 하천수질관리", *한국상하수도학회지*, 제 3권, 제 2호, 1990, pp. 1-16.
  21. 환경처, 한국환경연감, 1990, pp. 230-440.
  22. 환경처, 한국환경연감, 1991, p. 579.
  23. Butts, T.A. and Evans, R.L., "Small Stream Channel Dam Aeration Characteristics", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 3, 1983, pp. 555-573.
  24. 건설부, 하수도, 1991, pp. 16-33.
  25. 건설부, 하수도정책방향연구, 1988, pp. 141-159.
  26. Klemetson, S.L. and Grenney, W.J., "Physical and Economic Parameters for Planning Regional Wastewater Treatment Systems", *Journal WPCF*, Vol. 48, No. 12, 1976, pp. 2690-2699.
  27. Smith, R., "Cost of Conventional and Advanced Treatment of Wastewater", *Journal WPCF*, Vol. 40, No. 9, 1968, pp. 1546-1574.
  28. McGraw-Hill Construction Weekly, *Engineering News Record*, Sept.3, 1987, p. 40.
  29. 통계청, 주요경제지표, 1991.
  30. Bureau of Labor Statistics, *Employment and Earnings*, March, 1988, p. 95.
  31. Graves, G.W. and Hatfield, G.B., "Mathematical Programming for Regional Water Quality Management", *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 2, 1972, pp. 273-290.
  32. Vanderplaats, G.N., *ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis* Version 2.01, 1987.
  33. 서울시, 안양천, 난지하수처리장 방류구 위치조정 타당성조사 및 기본설계보고서, 1988, p. 129.
  34. 서울시 상하수국, 하수처리장 측정일지, 1990.
  35. 건설부, 한국수문조사년보, 1990, pp. 708-709.
  36. Burn, D.H. and McBean, E.A., "Optimization Modeling of Water Quality in an Uncertain Environment", *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 7, 1985, pp. 934-940.
  37. 서울시, 하수도기본계획제정비보고서(안), 1991.
  38. 조재현, 추계학적 계획모형을 이용한 하천수질관리, KOSEF 913-1304-007-1, 한국과학재단, 1992, p. 31.

(接受 : 1993. 7. 21)