

비선형계획법을 이용한 수도권 하수처리장의 최적운영에 관한 연구 A Study of Optimal Operation of Sewage Treatment Plants Using NLP

김 중 훈* · 윤 용 남* · 안 재 현** · 김 정 환***

Kim, Joong Hoon · Yoon, Yong Nam · Ahn, Jae Hyun · Kim, Jeong Hwan

Abstract

The objective of this study is to develop an optimal operation model for the sewage treatment plants using nonlinear programming (NLP) technique and the QUAL2E model. The model finds the minimum-cost operation of sewage treatment plants while satisfying all design constraints and water quality (BOD) standard. The model is applied to four sewage treatment plants in Han River for the city of Seoul. It has been found that optimal operation schedule for the sewage treatment plants can be computed and it is more economic to operate the plants according to the schedule which satisfies the water quality constraints in the river. In addition, the water quality in the river can be predicted using the model under the treatment policy.

요 지

본 연구에서는 설계기준 및 수질기준에 합당한 제약조건을 고려하여 하수처리장의 최소비용 운영을 위해 비선형계획법을 적용하였으며, 수질변화는 QUAL2E모형을 이용하여 모델링을 하였다. 한강수계에 위치한 4개의 수도권 하수처리장에 적용한 결과, BOD 수질기준에 따른 하수처리장의 적절한 운영을 계산할 수 있었으며, 각 하수처리장에서 유입유량에 따라 하수를 처리하는 것보다 한강의 정해진 수질조건을 유지하는 한도내에서 적정하수량을 처리하는 것이 경제적임을 알 수 있었다. 또한, 이 모델을 이용하여 주어진 하수처리장 운영하에서의 한강 수질도 예측가능하다.

1. 서 론

현재 서울을 관통하는 한강에는 탄천, 중랑천, 안양천, 난지 등의 하수종말처리장이 가동되고 있

* 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
** 고려대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정
*** 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

다. 이곳에서 처리된 하수는 각각의 지천을 통해 한강으로 유입되고 있는데, 방류되는 하수의 수질 상태는 환경보존법 시행규칙의 방류수 수질기준을 따라야 하나, 실제로는 설계 처리용량보다 많은 하수가 유입되고 있으며, 그렇기에 수질기준에 맞는 방류를 하기는 어려운 실정이다. 그러나, 하수처리장의 방류수질 못지 않게 방류된 하수가 한강으로 유입되면서 발생하는 한강의 오염상태는 더욱 더 중요하며, 그에 대한 연구가 필요함은 물론이다.

이를 위해 한강의 수질변화를 예측하기 위해서 수질예측모형을 이용하여 한강수계에 대한 수질모델링을 실시하였다. 국내에서 주로 적용되었던 수질예측모형에는 QUAL2E와 WASP4가 있다.

QUAL2E 모형은 전경수와 이길성(1993)이 팔당호 상류의 한강수계에 적용하여 모의를 수행하였고, 류희정(1993)은 계산한 결과치를 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 관리하는 17개 관측소의 관측치와 비교, 분석하여 모형의 적용성을 검토한 바 있으며, WASP4 모형을 사용하여 조홍연 등(1993)은 팔당호에 보정 및 검증 수행, 모형의 타당성을 파악한 바 있다. 그러나 이들 수질예측모형을 대하천에 적용 및 하수처리장과 연계하여 적정수질유지를 위해 하천상태와 하수처리장 처리 수질을 동시에 고려한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 상황에서 정해진 한강의 수질조건을 만족시키는 한도내에서 각각의 하수처리장의 운영을 최소화하여, 그에 따른 최적운영비용을 산출하며, 하수처리장의 운영효율 및 하수처리장 시설보강의 필요 여부도 살펴보는 것이 목적이라 할 수 있겠다.

위의 목적을 위해 한강수계의 수질모델링에는 QUAL2E 모형을 이용하였고, 최적화를 위한 비선형계획법(NLP)은 GAMS/MINOS 프로그램을 사용하여 해석하였다.

2. 기본이론

2.1 최적화 모형

본 연구에서는 수식화된 비선형 최적화 모형의

풀이에 있어 World Bank에서 개발한 GAMS (General Algebraic Modeling System; Brooke 등, 1992)와 비선형 계획법 해석을 위한 MINOS를 병용하는 GAMS/MINOS를 이용하였다. GAMS/MINOS는 다음과 같은 형태로 표현될 수 있는 최적화 문제를 풀기 위해 제안된 프로그램이다.

$$\text{Minimize } F(x) + c^T x + d^T y \quad (1)$$

$$\text{Subject to } f(x) + A_1 y \leq b_1 \quad (2)$$

$$A_2 x + A_3 y \leq b_2 \quad (3)$$

$$l \leq \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \leq u \quad (4)$$

여기서 c, d, b_1, b_2, l, u 는 벡터이고, A_1, A_2, A_3 는 상수로 나타내지는 행렬이며, $F(x)$ 는 smooth scalar function, $f(x)$ 는 smooth function의 벡터이다. 위에서 식 (2)는 비선형 제약조건식, 식 (3)은 선형 제약조건식이고, 식 (2)와 (3)을 합해서 일반 제약조건식이라고 한다. 비선형 제약조건식과 비선형 변수의 갯수를 각각 m_1, n_1 이라 하고, 선형 제약조건식과 변수의 총갯수를 각각 m, n 이라 하면 A_3 는 $m-m_1$ 열과 $n-n_1$ 행으로 구성된 행렬을 이루게 되며, 식 (4)에서 주어진 제약조건에서는 모든 변수들에 대한 상한치와 하한치의 범위를 나타내게 된다. 제약조건식들 중에 비선형 식을 포함하고 있을 때 GAMS/MINOS에서는 projected augmented Lagrangian algorithm을 이용하여 비선형 계획법 문제를 풀이하게 되며 이 algorithm은 비선형 제약조건식들을 선형화하여 원래의 선형 제약조건식들을 포함한 제약조건식들이 모두 선형인 subproblem을 반복계산하는 과정을 거치게 된다. k 번째 반복계산에서 비선형 변수의 값을 x_k , Lagrange multiplier를 λ_k 라 하며, 위의 식 (2)에서 $f(x)$ 는 다음과 같이 선형화할 수 있다.

$$\bar{f} = f_k + J_k(x - x_k) \quad (5)$$

여기서 J_k 는 Jacobian matrix이며, k 번째 반복계산 과정에서 풀게되는 subproblem은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } F(x) + c^T x + d^T y - \lambda_k^T (f - \bar{f}) + \frac{1}{2} \rho (f - \bar{f})^T (f - \bar{f}) \quad (6)$$

$$\text{Subject to } \bar{f} + A_1 y \leq b_1 \quad (7)$$

$$A_2 x + A_3 y \leq b_2 \quad (8)$$

$$l \leq \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \leq u \quad (9)$$

이 subproblem의 목적함수인 식 (6)은 원래의 목적함수와 선형화된 비선형 제약조건식에 대한 Lagrange multiplier항과 penalty항을 포함하며 augmented Lagrangian이라 불리운다.

GAMS/MINOS는 reduced-gradient algorithm을 사용하여 원래의 선형과 선형화된 제약조건식들 하에서 이 augmented Lagrangian을 최소화하게 된다. 이러한 비선형계획법의 문제에서는 초기해($k=0$)의 영역을 바꾸어 실행해 봄으로써 더 나은 국지 최적해의 존재여부를 살펴보아야 한다.

2.2 QUAL2E 모형

2.2.1 기본 사항

QUAL2E 모형은 Texas Water Development Board에서 Masch 등(1971)이 개발한 QUAL1 모형을 기본으로 하여 미국 EPA에서 Roesner 등(1981)이 수질항목을 추가시켜 발전시킨 QUAL2 모형을 Brown과 Barnwell(1985)이 PC에서 사용할 수 있도록 한 것으로, 수정시 기존의 QUAL2 모형에서 온도보정계수, 댐에 의한 산소 공급등을 고려하여 BOD와 DO의 도식화 등 입·출력문제를 더욱 개량한 것인데, 여기에 다시 Brown과 Barnwell(1987)에 의해 불확실성 분석(uncertainty analysis)항이 추가된 것이

QUAL2E-UNCAS 모형이다.

이 모형에서는 하천수질 모델링에서 중요한 유체 이동과 오염물질의 확산을 1차원적으로 해석하고 있으며, 많은 점오염원과 비점오염원, 하천의 지류 및 용수취수 등을 다양하게 정상상태로 모의할 수 있으며, DO, BOD, 온도 등을 포함하여 여러 항목에 대한 모의가 가능하다.

2.2.2 기본 방정식

QUAL2E 모형을 구성하는 기본방정식은 1차원 이송, 확산 물질이동 방정식으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left(A D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} dx - \frac{\partial (A \bar{U} C)}{\partial x} dx + A dx \frac{dC}{dt} \pm S \quad (10)$$

여기서, M 은 물질의 질량[M], x 는 종방향 거리[L], t 는 시간[T], C 는 농도[M/L³], A_x 는 통수 단면적[L²], D_L 은 종방향 확산계수[L²/T], \bar{U} 는 평균유속[L/T]이고, S 는 외부로부터의 부하량 유입·유출을[M/T]을 나타낸다.

3. 내용 및 방법

3.1 대상구간 및 하수처리장 현황

대상구간은 한강의 잠실수중보에서 신곡수중보 구간으로 하였으며, 이 구간내에 위치한 탄천, 중랑, 안양, 난지 하수처리장에 대하여 분석하였다. 각각의 하수처리장의 설계용량, 유입유량, 유입 BOD 농도 및 처리효율은 박상진 등(1990)의 연구보고서와 한강하류 수질보전 대책수립 조사 보고서(1993)의 하수처리장 설계 및 운영현황과 증설 계획을 참고로 하여 작성하였으며 표 1과 같다.

하수처리장의 처리유량에 따른 운영경비 산출식은 유영석 등(1992)의 연구보고서에서 우리나라 하수처리장의 비용곡선식을 적용하였으며, 식 (11)과 같다.

표 1. 하수처리장의 현황

처리장	유입유량(cmd)		유입BOD(ppm)		
	실 계	평 균	평균유입농도	최대처리효율	평균처리효율
탄 천	600,000	656,953	91	95.3%	93.3%
중 량	1,460,000	1,729,441	105	91.3%	87.0%
안 양	1,000,000	1,484,235	83	41.4%	37.3%
난 지	500,000	935,972	54	52.7%	38.2%

$$\text{Cost} = 49.17 \times Q^{0.669} \quad (11)$$

여기서 Cost는 처리유량에 따른 비용(원/ton)이며, Q는 하수처리장에서의 처리유량(1,000 ton/day)이다.

3.2 QUAL2E 입력 자료

3.2.1 단면구성

1) 잠실수중보부터 신곡수중보까지 총 31.9 km의 구간을 모두 27개의 reach로 나누어 입력 단면을 구성하였다.

2) 대상구간내로 유입되는 지천중 하천수질에 영향이 미비한 몇개의 소하천을 제외하고 총 7개의 지천을 point source로 고려하였으며, 각 지천에서 유입되는 유량 및 수온, BOD농 도는 표 2와 같다.

표 2. 유입지천의 유량, 수온, BOD농도

배수구역	탄 천	중량천	용제천	안양천	난지도	가 양	창룡천
유입유량 (cms)	11.67	19.64	0.03	2.50	8.66	21.78	0.13
거리(km) (잠실수중보부터)	1.525	6.155	21.395	22.305	26.395	27.635	28.105
수 온(℃)	15.8	16.1	18.6	13.5	15.1	14.9	12.3
BOD(ppm)	19.5	13.0	39.8	39.2	57.5	46.4	15.2

표 3. 대상유역의 BOD측정 자료

위 치	BOD(ppm)	위 치	BOD(ppm)
울림떡대교	0.9	원효대교	4.5
잠실수중보	1.0	성산대교	4.3
잠실선착장	1.0	염 창 동	4.8
성수대교	1.3	가 양	5.2
동호대교	4.0	신곡수중보	6.1

3) 물수지분석은 팔당댐에서 10월의 평균방류량

인 255.50 cms를 이용해서 실시했으며, 이 때 잠실수중보에서의 유입유량은 203.21 cms이다.

4) 매개변수 추정을 위한 사용한 실측자료는 1993년 10월에 실시된 한강유역의 수질측정 자료를 사용하여 실시하였으며 표 3과 같다.

3.3 최적화 모형의 수식화

3.3.1 목적함수

목적함수는 운영비용을 최소화하는 것이므로 식 (11)의 하수처리장 처리비용을 최소화하는 것이며, 식 (12)와 같다.

$$\text{Minimize Cost} = \sum_{i=1}^4 49.17(Q_i/1000)^{0.669} \quad (12)$$

여기서 Cost는 각 처리장에서 처리비용(원/ton)의 합이며, Q_i는 각 처리장에서의 처리유량(ton/day)으로 결정변수이다.

3.3.2 제약조건

1) 하수처리장에서 처리율에 대한 제약조건
하수처리장이 운영될 때 최소운영율은 30% 이상이므로 다음과 같다.

$$0.3 \leq Q_i/Q_{WTP} \leq 1 \quad (13)$$

여기서 Q_{WTP}는 각 처리장에서의 처리능력(ton/day)을 나타낸다.

2) 수질기준에 대한 제약조건

하수처리장에서 방류된 처리수가 한강분류와 혼합되었을 때의 수질은 수질기준(표 4)을 넘지 말아야 하므로 한강분류 각 구간에서의 수질기준의 제약조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{BOD}_{\text{MIX}} &= \\ &= \frac{Q_{\text{WTP}} * \text{BOD}_{\text{WTP}} + Q_{\text{RIVER}} * \text{BOD}_{\text{RIVER}}}{Q_{\text{WTP}} + Q_{\text{RIVER}}} \\ &\leq \text{BOD}_{\text{LIMIT}} \end{aligned} \quad (14)$$

3) 한강분류에서의 이송·확산 물질이동 방정식

의 제약조건

이 제약조건식들은 한강본류구간의 27개 각 reach에서의 BOD의 농도변화를 나타내는 방정식이며 식 (10)의 형태를 가진다.

4) 하수처리장의 처리용량에 대한 제약조건

하수처리장에서 처리되는 유량은 설계용량을 초과할 수 없으므로 다음과 같다.

$$\text{처리용량 } Q \leq \text{설계용량 } Q_{\text{DESIGN}} \quad (15)$$

5) 비음 조건

결정되어야 할 모든 변수들은 음수가 되어서는 안된다.

표 4. BOD 수질기준

구 분	상수원수	상수원수	상수원수3급	공업용수2급	공업용수3급
	1급	2급	공업용수1급	농업용수	
BOD기준 (ppm)	1 이하	3 이하	6 이하	8 이하	10 이하

4. 결과분석 및 고찰

4.1 QUAL2E를 이용한 수질해석

4.1.1 반응계수의 추정 (K_1 , K_3)

표 5. QUAL2E 반응계수의 추정결과

구 간	잠실수중보~ 신곡수중보	문헌상의 범위
K_1 (1/day)	0.41	0.02~3.4
K_3 (1/day)	0.01	-0.36~0.36

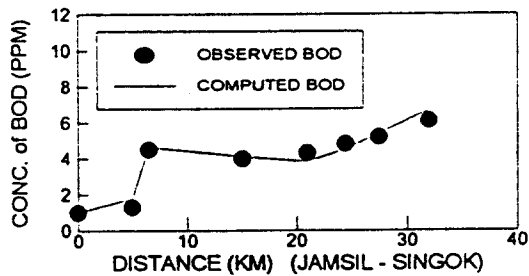


그림 1. 실측치와 계산치의 비교

1993년 10월에 한강의 여러 지점에서 실측된 자료를 바탕으로 하여 QUAL2E 모델링을 위해 반응계수의 추정을 실시하였으며 다음과 같은 결과를 나타내었다.

4.1.2 대상구간별 회귀분석식의 유도

3.3.2절에서 유도된 제약조건식들중 3)한강본류에서의 이송·확산 물질이동 방정식은 생략될 경우 한강본류에서의 BOD 농도변화를 고려해 줄 수 없게 되며 본 연구에서는 고전적인 Streeter-Phelps 식을 사용하지 않고 QUAL2E 모형을 이용하여 각 구간에서의 BOD 농도변화를 나타내는 회귀식을 상류에서의 BOD 경계조건을 변화시키면서 그에 따른 하류에서의 BOD 변화를 QUAL2E 모형의 반복실행 과정을 통해 유도해낼 수 있었다. 사용된 상류에서의 BOD 농도범위는 1~13 ppm의 값을 사용하여 실시하였으며, 그 결과는 표 6과 같다.

표 6. 대상구간별 회귀식

대 상 구 간	회 귀 식
탄 천 ~ 중랑천	$BOD_{\text{DOWNSTREAM}} = 0.945 BOD_{\text{MIX}}$
중랑천 ~ 안양천	$BOD_{\text{DOWNSTREAM}} = 0.815 BOD_{\text{MIX}}$
안양천 ~ 난 지	$BOD_{\text{DOWNSTREAM}} = 0.947 BOD_{\text{MIX}}$

4.2 BOD 기준에 따른 하수처리장의 최적화 결과

지금까지의 과정에서 구해진 목적함수, 제약조건 및 QUAL2E 모델링을 통해 유도된 회귀분석식을 3.3절에서 유도한 최적화모형에 적용하였다. 한강 본류에서의 BOD기준은 3, 6, 8, 10 ppm의 4가지 경우에 대하여 각 하수처리장에서의 최적처리량을 도출해 보았다.

4.2.1 상수원수 2급 기준 (BOD 3 ppm 이하)

현재에 작동되는 하수처리장의 설계처리용량으로는 상수원수 2급 기준을 한강 전구간에 걸쳐서 만족시킬 수가 없었으며, 따라서 최적처리용량을 산정할 수 없었다. 그러므로 상수원수 2급 기준에 한강의 수질기준을 만족시키기 위해서는 하수처리장의 신설이나, 기존 처리장의 용량을 증가시켜야

표 7. 상수원수 3급, 공업용수 1급 기준에서의 최적화 결과

하수처리장명	탄 천	중 량 천	안 양 천	난 지
하수처리장 유입BOD (ppm)	91	105	83	54
하수처리장 유출BOD (ppm)	13.884	24.070	59.849	45.463
분류와 혼합후의 BOD (ppm)	1.318	2.640	5.027	6.000
유입유량 처리율 (%)	0.889	0.844	0.674	0.300
유입유량 (cmd)	656,953	1,729,441	1,484,235	935,972
설계처리유량 (cmd)	600,000	1,460,000	1,000,000	500,000
처리유량 (cmd)	584,180	1,460,000	1,000,000	280,790

표 8. 공업용수 2급, 농업용수 기준에서의 최적화 결과

하수처리장명	탄 천	중 량 천	안 양 천	난 지
하수처리장 유입BOD (ppm)	91	105	83	54
하수처리장 유출BOD (ppm)	64.983	38.243	79.691	45.463
분류와 혼합후의 BOD (ppm)	2.582	4.627	7.205	8.000
유입유량 처리율 (%)	0.300	0.696	0.300	0.300
유입유량 (cmd)	656,953	1,729,441	1,484,235	935,972
설계처리유량 (cmd)	600,000	1,460,000	1,000,000	500,000
처리유량 (cmd)	197,090	1,204,300	445,270	280,790

표 9. 공업용수 3급 기준에서의 최적화 결과

하수처리장명	탄 천	중 량 천	안 양 천	난 지
하수처리장 유입BOD (ppm)	91	105	83	54
하수처리장 유출BOD (ppm)	64.983	76.240	72.691	45.463
분류와 혼합후의 BOD (ppm)	2.582	6.949	9.003	9.651
유입유량 처리율 (%)	0.300	0.300	0.300	0.300
유입유량 (cmd)	656,953	1,729,441	1,484,235	935,972
설계처리유량 (cmd)	600,000	1,460,000	1,000,000	500,000
처리유량 (cmd)	197,090	518,830	445,270	280,790

함을 알 수 있었다.

4.2.2 상수원수 3급, 공업용수 1급 기준 (BOD 6 ppm 이하)

이 기준에 맞추어 하수처리장을 운영할 경우, 총 처리비용은 17057.3(원/10³ ton/day)이 소요된다.

4.2.3 공업용수 2급, 농업용수 기준 (BOD 8 ppm 이하)

이 기준에 맞추어 하수처리장을 운영할 경우, 총 처리비용은 12389.3(원/10³ ton/day)이 소요된다.

4.2.4 공업용수 3급 기준 (BOD 10 ppm 이하)

이 기준에 맞추어 하수처리장을 운영할 경우, 총 처리비용은 9952.1(원/10³ ton/day)이 소요된다.

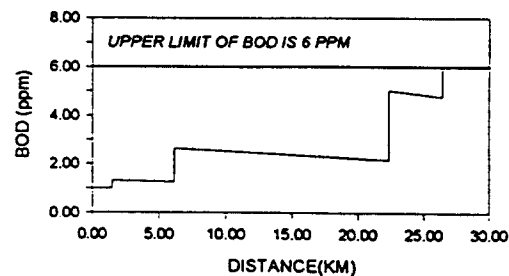


그림 2. 상수원수 3급, 공업용수 1급 기준 (BOD 6ppm이하)

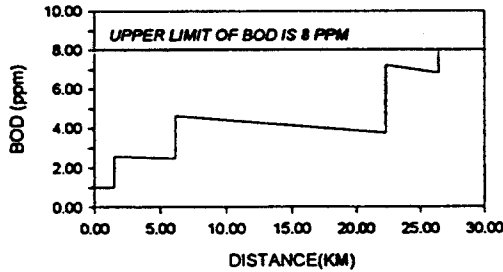


그림 3. 공업용수 2급, 농업용수 기준
(BOD 8ppm이하)

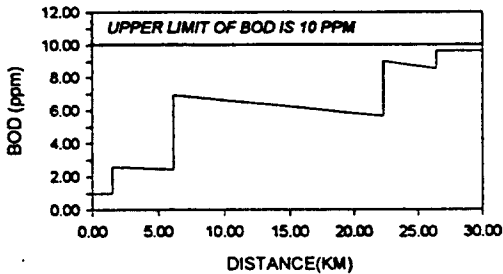


그림 4. 공업용수 3급 기준 (BOD 10ppm이하)

5. 결 론

한강의 수질변화를 BOD에 대해 QUAL2E모형을 이용하여 모델링을 하였으며, 그것을 통해서 각 하수처리장간의 수질변화를 예측할 수 있는 회귀식을 유도하였다. 이 식과 탄천, 중랑천, 안양천, 난지 등 4개의 하수처리장의 운영자료를 바탕으로 비선형계획법을 적용하여, 여러 상태의 BOD 수질기준에 만족시키면서, 최소의 경비로 하수처리장을 운영하는 것에 대하여 최적화를 하여 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 현재의 하수처리장의 처리능력에서 수질의 상태를 상수원수 2급(BOD 3 ppm 이하) 기준에 맞출 수는 없었으며, 현재보다 처리용량을 증가시켜야만 가능함을 알 수 있었다.

2) 상수원수 3급, 공업용수 1급(BOD 6 ppm 이하)의 수질기준은 현재의 하수처리 능력으로 만족시킬 수 있었으나, 각 하수처리장을 거의 최대 효율로 가동시킬 때에만 가능했으며, 이 정도의 수질기준을 충분히 만족시키기 위해서는 하수처리장의 처리용량의 증강 및 BOD처리 효율을 높이는

것이 시급함을 알 수 있었다.

3) 여러 수질기준하에서 하수처리장의 최적운영을 도출해본 결과, 각 하수처리장에서 유입유량에 따라 하수를 처리하는 것보다, 한강의 정해진 수질조건을 유지하는 한도내에서 적정하수량을 처리하는 것이 경제적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 류희정 (1993). "수문인자에 의한 하천 수질변화에 관한 연구: QUAL2E 모형을 중심으로." 한국수문학회지, 제26권, 제3호, pp. 75-85.
- 박상진 등 (1990). "하수도시설의 유지관리개선방안에 관한 연구: 하수처리장을 중심으로." 연구보고서, 건기연 90-EE-111, 한국건설기술연구원.
- 유영석 등 (1992). "하수처리장의 설계 및 비용분석 프로그램 개발에 관한 연구." 연구보고서, 건기연 92-EE-113-2, 한국건설기술연구원.
- 전경수, 이길성 (1993). "영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정." 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 163-176.
- 조흥연, 전경수, 이길성, 한광석 (1993). "WASP4 모형의 매개변수 추정: 팔당호를 중심으로." 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 177-188.
- 한강하류 수질보전 대책수립 조사 보고서. (1993). 서울시 한강관리사업소.
- Brooke, A., Kendrick, D., and Meeraus, A. (1992). *Release 2.25 GAMS: A user's guide*. The Scientific Press.
- Masch, F.D. et al. (1971). "Simulation of water quality in streams and canals, theory and description of the QUAL-I mathematical modeling system." *Report 128*, The Texas Water Development Board.
- Brown, L.C., and Barnwell, T.O., Jr. (1987). "The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual." *EPA/600/3-87/007*, EPA.
- Brown, L.C., and Barnwell, T.O., Jr. (1985). "Computer program documentation for the enhanced stream water quality model

QUAL2E." *EPA/600-3-85/065*, EPA.
Roesner, L.A., Giguere, P.R., and Evenson, D.E.
(1981). "Computer program documentation

for stream quality modeling (QUAL-II)." *EPA-600/9-81-014*, EPA.

〈접수: 1996년 1월 25일〉