

QUAL2E 모형에 의한 한강수계 수질모델링

WATER QUALITY MODELING OF THE HAN RIVER BY QUAL2E

田 庚 秀¹⁾ 李 吉 成²⁾
Jun, Kyung Soo and Lee, Kil Seong

1. 서론

인구의 증가와 도시집중, 산업화 등으로 인한 하천의 수질오염 문제는 날로 그 심각함을 더하여, 이제는 수량의 문제를 능가할 정도의 관심과 우려의 대상이 되었다. 하천의 오염은 생활용수, 농업 및 공업용수 등의 용수공급원 그 자체의 오염뿐만 아니라 하천 생태계에 미치는 영향 또한 지대하다. 이러한 하천오염을 유발하는 오염원의 완전한 제거는 불가능하나, 이의 조절에 의한 적정수질의 유지 및 관리가 요구되고 있다. 이를 위하여는 수체에 유입되는 오염원이 하천의 수질에 미치는 영향을 정량적으로 평가내지는 예측할 수 있는 수단이 필요하다. 이러한 수단의 하나가 수질모형으로서 물의 흐름, 오염원의 확산 및 여러 수질성분간의 상호반응 등 관련된 물리적, 화학적, 생물학적인 현상들을 수학적으로 나타내고, 이에 따른 계산을 수행하여 수질을 모의하게 된다. 1960년대 후반부터 본격적으로 연구, 개발되기 시작한 수질모형은 비교적 간단한 BOD 및 DO 모의모형인 Streeter-Phelps 모형으로부터 시작하여, 현재 널리 사용되고 있는 QUAL2E(Brown and Barnwell, 1987), WQRRS(Smith, 1978) 등의 하천 수질모형에 이르기까지 점점 복잡하고 상세한 모형으로 발전하여 왔다.

국내에서도 최근들어 환경문제에 대한 일반의 관심이 높아지고 수질관리의 필요성에 대한 인식이 고조됨에 따라, 이러한 수질모형들의 국내 주요하천에의 적용에 관한 연구가 행하여지고 있다.(金成淳 등, 1990; 심순보 등, 1984; 安泰弘, 1988; 이성기 등, 1993; 崔興植과 李吉成, 1987; 韓國建設技術研究院, 1990) 그러나, 가용자료의 제한등으로 인하여 대부분의 연구가 BOD 및 DO의 두 수질항목에 대한 모의에 국한되고 있으며, 흐름 및 수질과 관련된 여러 입력자료의 산정 및 구성에 대한 체계적인 연구가 미흡한 상태이다. 본 연구에서는 QUAL2E 모형을 사용하여 수도권의 상수공급원으로서 적정수질 확보에 대한 관심이 날로 증대되고 있는 漢江水系에 대한 수질모델링을 행하였다. 본 연구는 수도권의 주요 상수공급원인 八堂湖의 장래수질 평가를 위한 연구(李吉成 등, 1993)의 일환으로서, 八堂湖 수질모형의 수질 입력자료를 제공할 목적으로 수행되었다. 따라서 모의 대상지역은 八堂湖 상류의 漢江水系로 하였으며 모의 수질항목으로서 BOD 및 DO 외에도 호소 수질모형의 주요 수질성분인 조류, 질소 및 인 순환요소들을 포함하였다. 이와같이 구성된 모형에 대하여 水理學的 입력계수인 유량계수의 산정, 反應係數의 최적추정, 수질입력 자료인 지천 유달부하량 산정 및 이에 따른 장래수질의 모의를 수행하였다.

2. 모의모형의 구성

2.1 대상하천의 구분

모형의 대상지역은 漢江水系 중 충주댐-八堂湖의 南漢江 구간과 화천댐-八堂湖의 北漢江 구간으로서 각 구간에 대한 QUAL2E 적용 모식도는 각각 그림 1 및 2에 나타내었다. 南漢江 구간은 9개의 대구간(reach)과 104개의 소구간(element)으로, 北漢江 구간은 10개의 대구간과 112개의 소구간으로 구성하였으며 각 소구간의 길이는 南·北漢江 모두 1 Km이다. 南漢江 구간의 하류단(그림 1의 소구간 104)은 기두원, 北漢江 구간의 하류단(그림 2의 소구간 112)은 양수교 지점에 각각 해당한다. 南漢江 구간에 대해서는 21개, 北漢江 구간에 대해서는 16개의 유입지천을 각각 모형에 포함하도록 하였다.

2.2 수질모형

모의 수질항목으로서 조류(algae), 질소 및 인순환 요소들, 생화학적 산소요구량(CBOD) 및 용존산소량(DO) 등을 포함하였으며 이들 수질항목간의 상호반응 및 관련 반응계수를 나타내는 반응모식도는 그림 3과 같다.

3. 水理學的 입력계수의 산정

- 1 서울대학교 공과대학 토목공학과 연구원
- 2 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

3.1 QUAL2E의 水理學

하천수계에서의 수질계산에 앞서 흐름에 대한 계산이 선행해야 되는데 여기서 흐름계산이란 일반적으로 수계내의 각 지점에서의 단면평균 유속 및 수심을 결정하는 것을 뜻한다. 유속은 제반 수질성분의 종방향이송(advection)을 좌우할 뿐만 아니라 수심과 더불어 종확산계수 및 재폭기계수의 값을 결정하는 변수로서 의미를 갖는다. QUAL2E는 하천에서의 흐름으로서 等流를 가정한다. 즉 하천수계를 하상경사, 단면형상, 조도 등의 水理學的 성질들이 균일한 대구간들로 구분하고 동일한 대구간에 속한 지점(소구간)들에서는 평균유속 및 수심이 일정하게 주어진다. 본 연구에서는 주어진 等流流量에 대하여 평균유속 및 수심을 결정하는 방법으로서 단면형상의 제약이 없는 유량계수 방법을 사용하였다.

유량계수 방법은 주어진 유량(Q)에 대하여 다음과 같은 경험식들로부터 평균유속(V) 및 평균수심(d)을 각각 산정한다.

$$V = aQ^b, \quad d = \alpha Q^\beta$$

여기서 유량계수 a, b, α 및 β 는 단면의 크기 및 형상, 조도, 하상경사 등에 의하여 결정되는 水理學的 입력계수들로서 같은 대구간내에서는 동일한 값을 갖도록 되어있다. 그러나 실제 하천에 모형을 적용함에 있어서 같은 대구간에 속한 지점들에서의 단면조건, 하상경사, 조도 등이 완전히 일치할 수는 없기 때문에 각 대구간을 대표하는 값들의 산출이 필요하다.

3.2 유량계수의 산정

본 연구에서는 기존의 하상표고 및 Manning 조도계수 자료를 이용하여 漢江水系 각 대구간별 유량계수값들을 산출하였다. 사용자료는 기두원 지점부터 충주댐 직하류 구간과 양수교 지점부터 화천댐 직하류 구간에 대한 매 200 - 400 m 마다의 하천 횡단측량 및 Manning 조도계수 자료로서 이로부터 산정된 각 대구간별 평균 조도계수 및 하상경사는 표 1에 정리하였다. 각 대구간별 평균 하상경사는 대구간내 각 단면별 단면평균 하상고의 거리에 따른 線形回歸分析에 의하여 구하였다.

각 대구간별 유량계수 산정과정은 다음과 같다. 우선 대구간내 각 단면에 대하여 여러 수면표고 값들에 상응하는 평균수심, 평균유속 및 유량값들을 다음과 같은 방법으로 구한다.

- (1) 수면의 표고값을 가정한다.
- (2) 가정된 수면표고에 대한 각 횡단면의 통수면적 A, 수면폭 T 및 윤변 P를 구한다.
- (3) 각 단면에서의 평균수심 $d(= A/T)$ 와 동수반경 $R(= A/P)$ 을 계산한다.
- (4) Manning의 평균유속 공식을 이용하여 각 단면의 평균유속(V)과 유량(Q)을 계산한다.
- (5) 새로운 수면표고값들을 가정하고 (2) - (4)의 과정을 반복한다.

이와 같은 방법으로 계산된 대구간내 각 단면에서의 평균수심, 평균유속 및 유량자료군 중 일정범위의 유량값들에 해당하는 것들을 모두 선택하여 평균유속 및 유량자료를 이용한 回歸分析으로부터 a와 b를, 평균수심 및 유량자료를 이용한 回歸分析으로부터 α 와 β 를 각각 산출한다. 0 - 1,500 m³/sec 범위의 유량에 대하여 산정된 각 대구간별 유량계수값들은 표 2와 같다.

4. 反應係數의 推定

4.1 最適化에 의한 反應係數 추정방법

反應係數의 추정에 있어서 계수값들의 최적성을 판별하는 기준으로는 사용된 계수값들에 대한 수질 계산치들과 관측치들의 상대오차의 제곱합이 최소가 되도록 하였다. 즉 係數推定을 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$\min_{\mathbb{P}} S = \sum_{k=1}^K [1-C]^T [1-C] \quad (1)$$

여기서 $\mathbb{C} = [C_1, C_2, \dots, C_N]^T$ 는 N차 수질벡터로서 그 성분 C_1, C_2, \dots, C_N 은 관측치에 의하여 정규화된 각 수질성분의 계산치들이고, $\mathbb{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 는 N차 상수벡터, $\mathbb{P} = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T$ 는 M개의 反應係數를 그 성분으로 하는 M차 反應係數벡터이며 K는 자료군의 수이다. 反應係數벡터 \mathbb{P} 는 계수값들의 가변범위를 나타내는 다음과 같은 제약조건을 갖는다.

$$(\mathbb{F})' \leq \mathbb{P} \leq (\mathbb{F})'' \quad (2)$$

여기서 $(\mathbb{F})'$ 및 $(\mathbb{F})''$ 는 각각 계수값들의 하한치 및 상한치로 구성된 벡터이다.

식 (1) 및 (2)로 구성되는 최적화 문제의 해법으로서 Becker and Yeh(1972)에 의하여

개발된 影響係數法(Influence Coefficient Method)에 근거한 다음과 같은 algorithm을 사용하였다.

<1> 反應係數벡터 F^0 의 초기치 F^0 를 정하고 이를 사용하여 QUAL2E 모형에 의한 계산을 수행한다.

<2> 특정 자료군에 대하여 관측수질과 계산수질 비교지점에서의 각 수질항목의 상대오차 (E_i)는 다음과 같이 정의된다.

$$E_i = 1 - C_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

이를 이용하여 식 (1)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{F^0} S = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N E_i^2 \quad (4)$$

<3> 각 자료군에 대하여 反應係數벡터 F^0 의 각 성분 P_j , 즉 특정 反應係數의 값을, 다른 反應係數들의 값은 고정된 채, 각각 ΔP_j 만큼 변화시켜 가며 각각의 경우에 대한 E_i 의 변화량(ΔE_i)을 구한다. 이로부터 각 자료군에 대하여 다음과 같이 정의되는 影響係數(a_{ij})의 값을 계산한다.

$$a_{ij} = (\partial E_i / \partial P_j)^0 \approx \Delta E_i / \Delta P_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

<4> 새로이 추정할 反應係數벡터 F^1 에 대한 각 수질항목의 상대오차 (E_i)¹을 F^0 에 대하여 Taylor 급수로 전개하고 2차 이상의 항을 무시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} (E_i)^1 &= (E_i)^0 + (P_1^1 - P_1^0)(\partial E_i / \partial P_1)^0 + \dots + (P_M^1 - P_M^0)(\partial E_i / \partial P_M)^0 \\ &= (E_i)^0 + (P_1^1 - P_1^0)a_{i1} + \dots + (P_M^1 - P_M^0)a_{iM} \end{aligned} \quad (6)$$

<5> 따라서 목적함수인 식 (4)와 제약조건식 (2)는 다음과 같이 된다.

$$\min_{F^1} S = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N [(E_i)^0 + (P_1^1 - P_1^0)a_{i1} + \dots + (P_M^1 - P_M^0)a_{iM}]^2 \quad (7)$$

$$(F^1)^l \leq F^1 \leq (F^1)^u \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로 구성되는 최적화 문제에 대하여 2차 계획법(Quadratic Programming)에 의하여 최적해, 즉 새로운 推定反應係數벡터 F^1 을 구한다.

<6> 이와같이 추정된 F^1 을 사용하여 QUAL2E 모형에 의한 계산을 수행하고, 그 계산 결과로부터 각 자료군에 대하여 각 수질항목의 상대오차 (E_i)¹을 계산한다. 이들의 제곱합이 어느 정도 이하로 작아지거나, 이전 반복계산 때에 비하여 거의 개선되지 않으면 係數推定을 종료한다. 그렇지 않은 경우에는 <3> - <5>의 과정을 반복한다.

4.2 사용자료와 물수지분석

係數推定을 위한 유량 및 수질자료로서 1990년의 4-11월의 관측자료를 사용하였다. 정확한 係數推定을 위해서는 수계 전체에 대한 상세한 관측자료가 있는 것이 바람직하나 유량과 수질에 관한 가용자료가 한정되어 있기 때문에 미관측 지역에 대한 자료는 관측지역의 자료로부터 추정하여 구성하도록 하였다.

모형의 적용을 위한 유량 입력자료로서 모형의 시점(headwater)인 충주댐 및 화천댐에서의 방류량과 더불어 댐 하류부 지천들에서의 유입유량이 필요하다. 그러나 이들에 대한 가용자료가 거의 없기 때문에 漢江水系 댐군의 1990년 4월부터 11월까지의 월별 유입량 및 방류량 자료(韓國電力公社, 1991)를 사용하여 각 지천에서의 유입유량을 추정하였다. 즉, 하류댐 유입량과 상류댐 방류량의 차를 상·하류 댐간의 지천 총유입량으로 하고, 이를 해당 지천들의 점유유역 면적비로 배분함으로써 각 지천으로부터의 유입유량을 구하였다.

係數推定을 위한 각 지천의 유입수질 및 본류의 수질자료로는 環境處(環境年監, 1991) 및 國立環境研究院(1990)의 측정자료를 사용하였다. 유입수질이 관측되지 않은 지천들에 대

해서는 이들 관측치들의 평균치를 유입수질로서 사용하였다. 유입지천에 대한 環境處 측정 자료로서 총질소와 총인의 농도 측정치만 가용한 반면, QUAL2E 모형의 입력자료로서 질소 및 인의 순환요소들인 유기질소, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 유기인, 용존인의 입력농도가 필요하다. 따라서 이들 순환요소에 대한 기존의 측정자료들로부터 총질소와 총인에 대한 각 요소들의 구성비를 추정하여, 그 비율에 따라 구성요소들의 입력농도를 부과하였다.

反應係數 추정을 위한 수질계산치와 관측수질과의 비교지점으로서 南漢江水系에 대해서는 다루레기 나루터 지점(소구간 95), 北漢江水系에 대해서는 양수교 지점(소구간 112)에서의 관측 수질자료를 각각 사용하였다. 측정 수질항목으로서 BOD, DO, 총질소, $\text{NH}_3\text{-N}$, 총인, 용존인, chl.a 등의 농도가 가용하다. 인순환 요소 중 유기인의 농도는 총인과 용존인의 농도차로서 구하였으며, 질소순환 요소들에 대해서는 유입지천에 대한 입력자료 산정시와 마찬가지로 총질소에 대한 구성비를 추정하여 구하였다. 또한 이들 지점에서의 chl.a의 관측농도는 각각 유입지천에 대한 농도값으로서 사용하였다.

4.3. 推定係數의 선정을 위한 敏感度 분석

反應係數의 추정에 앞서 추정 대상계수를 선정하기 위하여 각 反應係數에 대한 수질항목들의 敏感度를 분석하였다. 그 방법으로 우선 각 反應係數에 대하여 계수값의 범위를 설정하였다. QUAL2E User Manual 상에 그 범위가 명시되어 있는 계수들에 대해서는 그 값들을 사용하였으며, 그 밖의 계수들에 대하여는 건설기술연구원(1987)에서 조사한 외국 하천에 대한 계수값들을 참조하여 범위를 설정하였다. 조류의 생성률(μ)에 대해서는 최대생성률(μ_{\max})에 관한 敏感度를 조사하였으며, 생성률에 관련된 그 밖의 상수들은 QUAL2E의 Default 값 또는 User Manual 상에 제시된 범위의 중앙값을 사용하였다. 이와같이 범위가 주어진 각 계수들에 대하여 상한치가 하한치의 10 배 이상인 경우에는 상한치와 하한치의 기하평균치로, 그 이하인 경우에는 산술평균치로서 각 계수의 기준치를 정하였다.

특정 反應係數에 대한 敏感度를 결정하기 위한 방법으로 다른 계수들의 값을 모두 위에서 정한 기준치로 고정하고, 그 反應係數의 기준치, 상한치 및 하한치에 대한 QUAL2E 모형의 계산을 수행하였다. 反應係數의 상한치를 사용하여 계산된 어떤 수질항목의 농도값과 하한치에 대하여 계산된 값과의 차를 기준치에 대하여 계산된 그 수질항목의 농도값으로 정규화한(normalized) 값을 反應係數에 대한 그 수질항목의 敏感度로 정의하여, 각 反應係數에 대한 수질항목들의 敏感度를 조사하였다.

이상과 같은 敏感度 분석결과로부터 한 가지 이상의 수질항목이 비교적 민감한 反應係數로서 σ_1 , μ_{\max} , ρ , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , σ_5 , K_1 , K_3 및 K_4 를 추정 대상계수로 선정하였다. 이들 계수 중 σ_1 , μ_{\max} 및 ρ 는 chl.a의 농도에 주로 영향을 미치며 다른 수질항목들에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 질소순환 요소들은 β_1 , β_2 및 β_3 에, 인순환 요소들은 β_4 및 σ_5 에 민감하며, BOD 및 DO는 K_1 , K_3 및 K_4 에 주로 좌우됨을 알 수 있다. 또한 총질소(TN) 및 총인(TP)의 농도는, 특히 총질소의 경우 反應係數에 대한 敏感度가 매우 작은 것으로 나타났다.

4.4 反應係數의 추정 및 그 결과

가용 수질자료 및 敏感度 분석결과를 고려하여 수질벡터 \mathbf{C} 와 反應係數벡터 \mathbf{P} 를 다음과 같이 구성하였다: $\mathbf{C} = [C_1, C_2, \dots, C_N]^T = [\text{chl.a, Org. N, NH}_3\text{-N, NO}_3\text{-N, Org. P, Dis. P, BOD, DO}]^T$; $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T = [\sigma_1, \mu_{\max}, \rho, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \sigma_5, K_1, K_3, K_4]^T$. 즉, 수질항목의 수 $N = 8$, 反應係數의 수 $M = 11$ 이며, 사용자료는 1990년 4-11월간의 것들로서 자료군의 수 $K = 8$ 이다. \mathbf{P} 의 초기치 \mathbf{P}^0 , 하한치 (\mathbf{P}^-) 및 상한치 (\mathbf{P}^+)는 反應係數에 대한 敏感度 분석시 선정한 각 계수의 기준치, 하한치 및 상한치로서 구성하였다.

南漢江 및 北漢江水系에 대하여 4.2 절에서 기술한 바와 같은 유량 및 수질자료를 이용하여 계수의 추정을 수행하였다. 각 월자료에 대하여 反應係數벡터의 초기치 \mathbf{P}^0 를 사용하여 계산된 어떤 수질항목 C_i 에 관한 상대오차 (E_i)⁰가 1보다 큰 경우 그 수질항목의 관측자료는 이상자료로 간주하여 係數推定에서 제외하였다. 影響係數의 산정에서 각 反應係數의 증분 ΔP_j 는 계수값 P_j 의 10-100%로 취하였다. 2차 계획법에 의한 최적화 계산수행에 있어서는 Quasi-Newton 방법을 사용하였다. 각 반복계산 단계마다 계산된 상대오차 제곱합이 그 전 단계에서의 계산치와 비교하여 1% 이상 감소하지 않으면 係數推定을 종료하도록 하였다.

각 반복계산 단계에서 추정된 계수값과 상대오차의 제곱합은 표 3에 정리된 바와 같다. 反應係數의 값들 중 가장 하단의 값이 최종적으로 추정된 것으로서 모든 係數推定이 2-3회의 반복계산에 의하여 종료되었다. 표 3에서 알 수 있듯이 질소 순환요소들과 인 순환요소들에 대한 상대오차 제곱합이, 특히 질소 순환요소들의 경우, 수질항목의 수가(즉 상대오차 제곱합을 구성하는 항의 수가) 많음을 감안하더라도 chl.a 또는 BOD, DO의 경우에 비하

여 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이들 수질항목에 대한 관측치와 계산치의 비교결과, 거의 모든 수질항목에 대하여 水系의 하류지점에서 관측농도가 유입지천에서의 관측자료로부터 계산된 농도값보다 일반적으로 높게 나타났다. 이는 지천을 통하지 않고 수계로 유입되는 非點汚染源의 영향 때문으로서, 유입지천을 통하여 수계로 유입되는 오염부하량과 수계 하류단에서의 부하량에 대한 비교에 의하여 이를 확인하였다.

5. 流達率의 산정

장래수질의 모의를 위한 입력자료인 지천의 장래 유입수질을 결정하기 위해서는 장래 유출 오염부하량의 추정과 더불어 오염부하량의 하천으로의 流達率 산정이 필요하다. 流達率은 流達負荷量과 流出負荷量의 비로서 정의할 수 있으며 따라서 이들 부하량에 대한 자료가 함께 있을 경우 산정이 가능하다. 流達率은 유역면적, 유하길이, 지형 등의 유역특성에도 관계가 있으나(韓國建設技術研究院, 1990) 流達率을 결정하는 가장 중요한 변수는 유량이다. 하천 오염물질의 농도가 유량의 증가에 따라 반비례적으로 감소하지 않는 것은 그에 따른 流達負荷量의 증가 때문이다. 즉 유달율은 유량이 커질수록 증가하는게 되는데, 본 연구에서는 BOD, 총질소 및 총인에 대하여 이러한 증가의 함수관계를 1990년 3월부터 11월까지의 유량, 수질 및 오염부하량 자료로부터 도출하였다.

BOD 流達率의 산정방법으로서 우선 상술한 바와 같은 유량 및 수질자료(BOD)를 사용하여 월별 각 지천 流達負荷量을 지천유량과 BOD 농도의 곱으로서 구하고 이들을 충주댐 상류 구간, 충주댐하류 구간 및 北漢江 구간으로 구분하여 각각의 구간에 대한 월별 총 BOD 流達負荷量을 구하였다. 이와 같이 구한 流達負荷量과 각 구간에 대한 1990년 BOD 流出負荷量의 비로서 매일의 流達率을 산정하였다.

총질소와 총인의 流達負荷量 산정에 있어서 충주댐 상류에 대해서는 BOD의 流達負荷量 산정과 동일한 방법을 사용하였다. 즉 충주댐 방류량에 충주댐에서 관측된 총질소 및 총인의 농도를 곱하여 각각에 대한 流達負荷量을 산정하였다. 충주댐 하류와 北漢江에 대해서는 非點汚染源의 流達負荷量을 유입지천을 통한 流達負荷量에 포함하도록 하기 위하여 수계 하류단에서의 측정농도와 유입유량을 사용하여 流達負荷量을 산정하고 이로부터 매일의 流達率을 산정하였다.

이와같이 산정된 월별 BOD, 총질소 및 총인 流達率(Y)의 유량(Q)에 대한 回歸分析에 의하여 다음과 같은 형태의 회귀식을 도출하였다.

$$Y = pQ^r$$

각 수질항목에 대한 구간별 회귀상수 p, r 및 流達率과 유량간의 상관계수는 표 4와 같다.

6. 장래수질의 모의

본 연구에서는 장래 오염부하량의 증감에 따른 수질변동을 모의함이 주요 목적으로서 우기와 건기가 분명한 漢江流域의 기상현황을 감안하여 계절별로 수질을 모의하였다. 계절의 구분은 유량변동을 주로 고려하여 3, 4, 5월을 봄철로, 6, 7, 8, 9월을 여름철로, 10, 11월을 가을철로 구분하였다. 수질모의 대상 시점은 1996년과 2001년으로 하였으며 하수처리 정도 즉 하수 처리용량이 현재와 같다고 볼 경우, 현재 계획중인 하수 처리시설이 모두 갖추어질 경우 및 50 %만 갖추어질 경우의 流出負荷量에 따른 수질변화를 모의하였다.

6.1 유량 및 수질 입력자료

장래 수문기상 조건과 댐운영 등이 현재와 같을 것이라고 가정하여 장래유량 입력자료로서 비교적 최근이며 충주댐 완공후인 1986-1990년 간의 漢江水系 각 댐의 월별 유입량 및 방류량 자료(韓國電力公社, 1991)를 계절별로 평균한 후 4 장에서 기술한 바와 같은 물수지분석에 의하여 각 지천에서의 유입유량을 구하였다. 또한 이들 유량값으로부터 각 수질항목에 대한 回歸式(표 4 참조)을 사용하여 계절별 流達率 값들을 구하였다.

이와같이 산정된 流達率과 장래 유출부하량의 곱으로서 BOD, 총질소 및 총인의 流達負荷量을 각각 산정하였으며, 이들 유달부하량과 유량의 비로서 각 구간별로 BOD, 총질소 및 총인의 유입지천 평균농도를 구하여 장래수질의 모의에 사용하였다. 댐방류수 및 지천의 DO 유입농도 및 하천구간의 수온 입력자료로는 1990년 월별 관측자료(環境處, 1991)의 계절별 평균치를 사용하였다.

6.2 장래수질의 모의결과 및 분석

장래 계절별 수질 모의결과, 하수 未處理時에는 장래(1996년 및 2001년) 수질이 현황

(1990년)보다 악화되나 50 % 이상의 하수 處理時에는 향상되는 경향을 나타내고 있다. 또한 北漢江의 八堂湖 유입수가 南漢江 유입수에 비하여 수질이 양호한 것으로 나타났다. 南漢江 유역의 장래 오염원 증가도가 北漢江 유역에 비하여 크기 때문에 하수 처리시설의 擴充이 없다면 南北漢江 유입수의 수질격차는 BOD의 경우 1996년에 0.42 - 0.56 mg/l, 2001년에 0.61 - 0.77 mg/l로, 총 질소의 경우 1996년에 0.52 - 1.16 mg/l, 2001년에 0.57 - 1.23 mg/l로, DO의 경우 1996년에는 0.14 - 0.31 mg/l, 2001년에는 0.18 - 0.38 mg/l로 더욱 커질 것으로 예상된다. 그러나 현재 계획중인 하수 처리장들이 예정대로 건설된다면 BOD는 1996년 0.22 - 0.31 mg/l, 2001년 0.29 - 0.37 mg/l로, 총 질소는 1996년 0.28 - 0.84 mg/l, 2001년 0.33 - 0.88 mg/l로, DO는 1996년 0.08 - 0.24 mg/l, 2001년 0.10 - 0.26 mg/l로 그 격차는 현저히 감소하게 된다. 따라서 北漢江 유입수를 상수원으로 취수함으로써 南漢江 유입수나 八堂댐 부근에서의 취수에 반하여 얻을 수 있는 수질에 있어서의 상대적인 우위는 계획된 하수처리 시설들이 갖추어질수록 감소하게 된다.

7. 결론

南·北漢江 수계에 대한 QUAL2E 모형의 적용을 위하여 南漢江 9개 구간 및 北漢江 10개 구간에 대하여 평균수심과 유량 및 평균유속과 유량의 관계를 결정하는 유량계수의 값들을 산정하였다. 影響係數法에 의한 반응계수의 최적추정 방법은 계수들이 최적치에 빨리 수렴하도록 하는 유용한 방법임이 입증되었다. 모든 추정계수들이 3번 이내의 반복추정으로 최적치에 수렴하였다. 지천을 통하여 본류로 유입되는 오염부하량과 수계 하류단에서의 오염부하량을 비교한 결과, 질소와 인의 비점오염부하량이 상당한 것으로 나타났다. 월별 유량과 流達率 자료를 이용한 회귀분석에 의하여 BOD, 총 질소 및 총 인의 流達率을 유량의 함수로서 구하였으며, 유량과 流達率의 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 장래수질의 모의결과 北漢江의 八堂湖 유입수가 南漢江 유입수에 비하여 수질이 양호한 것으로 나타났다. 南漢江 유역의 장래 오염원 증가도가 北漢江 유역에 비하여 크기 때문에 하수 처리시설의 확충이 없다면 南·北漢江 유입수의 수질격차는 더욱 커질 것이나 현재 계획중인 하수 처리장들이 예정대로 건설된다면 그 격차는 현저히 감소하게 된다.

감사의 글

본 연구는 한국종합기술개발공사의 재정적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Becker, L. and Yeh, W.W-G., "Identification of parameters in unsteady open channel flow", WRR, Vol. 8, AGU, 1972, pp. 956-965.
2. Brown, L.C. and Barnwell, T.O., The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, EPA/600/3-87/007, U.S. Envir. Protection Agency, Envir. Res. Lab., Athens, GA, 1987.
3. Smith D.J., Water Quality for River-Reservoir Systems, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 1978.
4. 國立環境研究院, 八堂 上水源 保護 綜合對策에 관한 研究(3次年度), 1990.
5. 金成淳, 李梁圭, 高康榮, "汚染된 河川의 水質豫測을 위한 數值模型에 관한 研究", 韓國上下水道學會誌, 제 4권, 제 1호, 1990, pp. 50-62.
6. 심순보, 이광호, 유병로, "河川水質豫測 Model(I)", 韓國水文學會誌, 제 17권, 제 1호, 1984, pp. 31-36.
7. 安泰弘, QUAL2E 模型을 利用한 漢江本流 水質의 豫測評價에 관한 研究, 서울大學校 環境大學院 碩士學位論文, 1988.
8. 李吉成 등, 首都圈 廣域上水道 5 段階 妥當性調査 및 基本計劃: 八堂湖 水質調査 및 評價, 서울大學校 土木工學科 水工學研究室, 1993.
9. 이성기, 유태중, 강인숙, "영산호 수질예측에 관한 연구", 韓國上下水道學會誌, 제 6권, 제 1호, pp. 15-24.
10. 崔興植, 李吉成, "QUAL II 模型의 錦江水系에의 適用", 韓國上下水道學會誌, 제 1권, 제 2호, 1987, pp. 20-33.
11. 韓國建設技術研究院, PC用 河川水質管理 모델의 開發(I), 建技研 87-EE-113, 1987.
12. 韓國建設技術研究院, 漢江 河川維持流量 調査研究, 韓國水資源公社, 1990.

13. 韓國電力公社, 水力發電所 運用資料集(1971 - 1990 實積), 發電處, 水力發電部, 1991.
 14. 環境處, 環境年鑑, 1991.

표 1 Manning 조도계수 및 평균 하상경사

대구간		조도계수	하상경사 (10 ⁻³)
남 한 강	S - 1	0.0301	0.555
	S - 2	0.0302	0.539
	S - 3	0.0309	0.576
	S - 4	0.0306	0.375
	S - 5	0.0313	0.183
	S - 6	0.0312	0.502
	S - 7	0.0320	0.406
	S - 8	0.0295	0.434
	S - 9	0.0289	0.299
북 한 강	N - 1	0.0350	0.847
	N - 2	0.0350	0.869
	N - 3	0.0360	0.655
	N - 4	0.0350	0.683
	N - 5	0.0290	0.583
	N - 6	0.0270	0.579
	N - 7	0.0250	0.087
	N - 8	0.0250	0.159
	N - 9	0.0230	0.798
	N - 10	0.0270	0.386

표 2 퇴귀분석에 의한 유량계수 산정결과

대구간		a	b	α	β
남 한 강	S - 1	0.263	0.267	0.193	0.404
	S - 2	0.203	0.298	0.135	0.447
	S - 3	0.215	0.286	0.146	0.429
	S - 4	0.173	0.302	0.143	0.454
	S - 5	0.148	0.274	0.201	0.411
	S - 6	0.248	0.261	0.203	0.392
	S - 7	0.210	0.245	0.193	0.368
	S - 8	0.182	0.289	0.131	0.434
	S - 9	0.230	0.253	0.239	0.360
북 한 강	N - 1	0.223	0.302	0.140	0.454
	N - 2	0.212	0.318	0.124	0.479
	N - 3	0.234	0.261	0.191	0.385
	N - 4	0.315	0.197	0.274	0.295
	N - 5	0.190	0.320	0.109	0.480
	N - 6	0.256	0.265	0.139	0.428
	N - 7	0.229	0.196	0.478	0.295
	N - 8	0.166	0.306	0.188	0.460
	N - 9	0.394	0.283	0.181	0.425
	N - 10	0.208	0.278	0.162	0.417

표 3 반복계산 단계별 추정계수값 및 오차제곱합

(남한강)

	σ_1 m/day	μ_{max} 1/day	ρ 1/day	β_1 1/day	β_2 1/day	β_3 1/day	β_4 1/day	σ_5 1/day	K_1 1/day	K_3 1/day	K_4 mg/m ² -day
0	0.52	2.00	0.16	0.316	0.632	0.089	0.084	0.010	0.261	0.000	0.700
1	0.15	1.34	0.05	0.432	1.967	0.020	0.010	0.001	0.423	0.000	0.101
2	0.15	1.00	0.05	0.407	1.982	0.020	0.010	0.001	0.460	0.002	0.080
3	0.15	1.00	0.05						0.419	0.000	0.079

	$\sum E_1^2$	$\sum (E_2^2 + E_3^2 + E_4^2)$	$\sum (E_5^2 + E_6^2)$	$\sum (E_7^2 + E_8^2)$
0	0.35	9.05	2.30	0.94
1	0.058	8.48	1.98	0.72
2	0.026	8.48	1.98	0.71
3	0.026			0.71

(북한강)

	σ_1 m/day	μ_{max} 1/day	ρ 1/day	β_1 1/day	β_2 1/day	β_3 1/day	β_4 1/day	σ_5 1/day	K_1 1/day	K_3 1/day	K_4 mg/m ² -day
0	0.52	2.00	0.16	0.316	0.632	0.089	0.084	0.010	0.261	0.000	0.700
1	0.15	1.83	0.05	0.999	0.200	0.205	0.010	0.097	0.578	0.001	0.072
2	0.15	1.25	0.05	1.000	0.200	0.205	0.010	0.001	0.576	0.060	0.217
3	0.15	1.25	0.05						0.571	0.078	0.126

	$\sum E_1^2$	$\sum (E_2^2 + E_3^2 + E_4^2)$	$\sum (E_5^2 + E_6^2)$	$\sum (E_7^2 + E_8^2)$
0	0.35	8.12	3.48	1.19
1	0.047	7.63	3.18	0.47
2	0.015	7.63	3.16	0.46
3	0.015			0.46

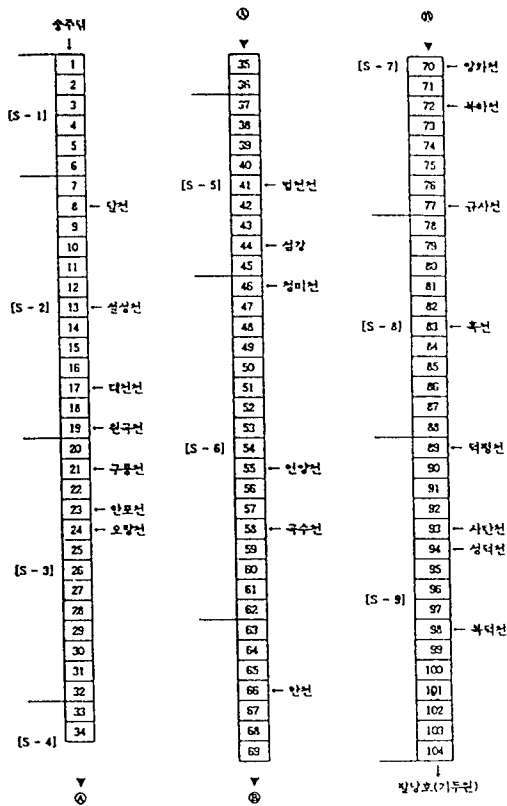


그림 1 QUAL2E의 남산강수계 적용모식도

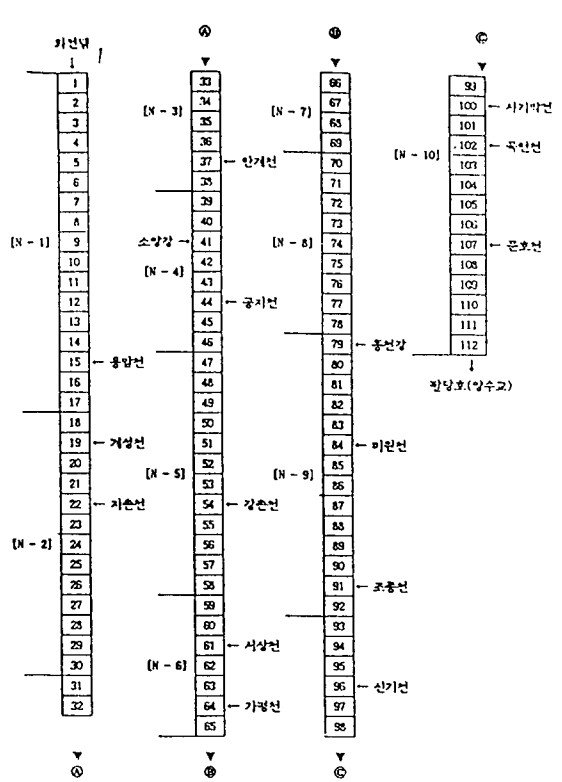


그림 2 QUAL2E의 북한강수계 적용모식도

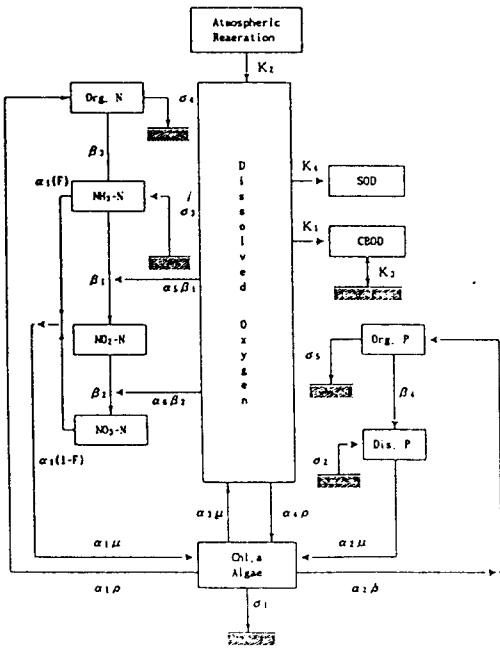


그림 3 QUAL2E 모형의 반응모식도 (Brown and Barwell, 1987)

표 4 회귀분석에 의한 유달을 산정결과

항목	구간	p	r	상관계수
BOD	충주댐 상류	0.00443	0.900	0.975
	충주댐 하류	0.00386	0.927	0.964
	북한강	0.00537	0.886	0.990
총 질소	충주댐 상류	0.00403	0.909	0.903
	충주댐 하류	0.00298	0.826	0.888
	북한강	0.00338	1.128	0.985
총 인	충주댐 상류	0.00164	1.099	0.690
	충주댐 하류	0.00131	1.069	0.885
	북한강	0.00343	0.958	0.936