

정상 및 비정상상태 하천수질모형의 비교 Comparison of Steady and Unsteady Water Quality Model

고 익 환* / 노 준 우** / 김 영 도***

Ko, Ick Hwan / Noh, Joonwoo / Kim, Young Do

Abstract

Two representative river water quality models have been compared in this paper. The steady water quality model, QUAL2E, and the unsteady model, CE-QUAL-RIV1, have been chosen for comparative simulations. Under same reaction coefficients and boundary conditions, the water quality of the Geum river below the Daechung dam has been simulated using two different models, and the water quality equations are compared each other. Since basic model algorithm is very close, the input data required for model run is very similar. Upon the simulation under steady condition, the results of two models show very good agreement especially for BOD, DO, and NH₃-N, while the results of specific constituent such as dissolved P is quite different. As a result, dominant water quality parameters to compute each corresponding water quality variables are summarized and tabalized through the sensitivity analysis.

keywords : QUAL2E, CE-QUAL-RIV1, water quality model, BOD, dissolved P

요 지

본 논문에서는 두 가지 대표적인 하천수질모형을 비교·분석하였다. 정상상태 모형으로는 QUAL2E, 비정상상태 모형으로는 CE-QUAL-RIV1을 선택하여 동일한 반응계수 및 경계조건 하에서 두 모형의 계산결과를 서로 비교해 보았다. 각 모형에 대하여 수질변동을 계산하기 위해 적용된 방정식을 서로 비교하였으며, 두 가지 수질모형을 이용하여 대청댐 이하 금강분류의 수질을 모의하였다. 두 모형은 기본 알고리즘이 매우 유사하므로, 모형구축에 필요한 입력자료도 매우 비슷하였다. 정상상태로 모의한 경우에 대하여 두 모형의 결과값은 BOD와 DO, 및 NH₃-N의 경우에 대하여서는 매우 일치도가 높았다. 그러나 용존인과 같은 특정한 수질인자 항목은 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 모의결과를 바탕으로 두 모형의 민감도 분석을 실시하였으며, 각 수질항목에 대해 지배적으로 작용하는 매개변수를 도표화하여 정리하였다.

핵심용어 : QUAL2E, CE-QUAL-RIV1, 수질모형, BOD, 용존인

* 한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소 소장
Director, Hydro-systems Engineering Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO, Daejeon 305-730, Korea
(e-mail: ihko@kowaco.or.kr)

** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원
Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO, Daejeon 305-730, Korea
(e-mail: jnoh@kowaco.or.kr)

*** 인제대학교 환경공학부 전임강사
Lecturer, School of Environmental Science and Engineering, Inje University, Gimhae, Gyeongna 621-749, Korea
(e-mail: ydkim@inje.ac.kr)

1. 서 론

하천수질모의에 사용되는 모형들은 크게 정상상태 및 비정상상태 모형으로 구분할 수 있다. 전자로 미국 EPA에서 개발된 대표적인 하천수질모형인 QUAL2E 모형을 들 수 있고, 후자로는 미공병단에서 개발한 CE-QUAL-RIV1(이하 RIV1) 모형이 존재한다. 정상상태 모형인 QUAL2E 모형은 기본구조가 매우 안정적이고 사용하기 쉽기 때문에, 현재까지 하천의 증장기적인 수질모의에 매우 널리 사용되고 있다(서동일 등, 2004a; 서동일 등, 2004b). RIV1 모형은 상류단 방류량변동에 의한 비정상상태 수질모의를 위해 최적화되어 있으며, 최상류단 유량변동뿐만 아니라 지천의 유량 및 수질인자에 대한 시간적 및 공간적 변동양상을 동시에 고려해 모의할 수 있는 기능이 있다. RIV1 모형은 오염물질의 유출사고에 적절히 대응하여 상황에 적합한 댐운영을 지원하는 의사결정의 도구로 사용될 수 있으며, 경계조건을 부여하는 방식에 따라 정상상태 수질모의도 가능하므로 그 활용도가 매우 높은 모형이라 할 수 있다.

QUAL2E 모형에 적용된 기본알고리즘은 1차원 이송·확산방정식을 풀이하고 각 수질인자에 상응하는 반응률, 생성, 소멸항을 적절히 조합하여 최종농도를 산정하는 방식으로서 시간에 대한 농도변화가 없을 때까지 반복계산하여 특정 범위안에서 수렴하는 값들을 찾아냄으로써 정상상태 수질을 모의한다. 이와 유사한 모형으로는 보다 다양한 조건을 모의하기 위하여 Windows 운영체제의 엑셀기반으로 작성된 QUAL2K가 Chapra와 Pelletier (2003)에 의해 개발되었으며, 서동일과 이은형(2003)은 월별, 순별 증장기적인 하천수질 예측을 위하여 모형의 입력자료 및 모의항목을 단순화한 CAP 모형을 개발한 바 있다. 한편 RIV1 모형은 독립적인 두 가지 모듈, 즉 수리모듈 및 수질모듈로 구성되어 있으며, 먼저 수리현상을 모의하고, 이를 기반으로 이송·확산 방정식을 풀이함으로써 수질인자를 산정하는 방식을 채

택하고 있다. 여기서 처리되는 값은 비정상상태 이송·확산방정식의 생성 및 소멸항과 적절히 조합되어 다양한 수질변수를 풀이하게 된다. RIV1 모형을 기반으로 그래픽 처리를 크게 개선한 KORIV1 모형이 정세웅(2004)에 의해 개발되어 댐방류량에 대한 의사결정지원의 목적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 두 가지 대표적인 하천수질모형에 대하여 각각의 대표적인 수질항목에 대한 지배방정식을 분석함으로써 공통된 수질인자에 대한 매개변수를 서로 비교·정리하였다. 동일한 조건에 대하여 각 모형에 적합한 경계조건 및 초기조건을 부여하고, 정리된 매개변수를 사용하여 얻어진 결과값을 비교하였다. 또한 각각의 모형을 이용하여 모의된 다양한 수질변수의 민감도 분석을 통하여 두 모형의 공통점과 차이점을 분석하였다.

2. 모형의 특징

2.1 입력조건

수질모의를 위한 반응식을 각 모형별로 살펴보면 QUAL2E 모형은 기본적으로 15개의 수질항목을 모의할 수 있으며, RIV1 모형에서는 12개의 수질항목을 다루고 있다. 물질반응을 해석하는 기작은 두 가지 모형이 서로 유사한 반응식을 채택하였으며, 각각 표 1과 같은 항목에 대한 입력조건을 구성하여 모의하게 된다.

비정상상태 모형인 RIV1 모형의 수리모듈에서는 부정류를 해석하기 위하여 Preissmann 4점법 유한차분법으로 St. Venant 방정식을 수치모의한다. 수질모듈에서는 이송항을 확산항과 분리하여 처리하는 Holly-Preissmann 기법을 적용하여 모형의 안정화에 기여하였다. QUAL2E 모형은 독립적인 수리해석 모듈이 없으므로 부정류해석을 위한 외부 프로그램을 이용해서 수심 및 유속과 같은 수리학적 매개변수를 산정하여 지수함수의 형태로 입력해 줌으로써 물질이송해석에 필요한 조건을 제공한다.

표 1. 모의항목 및 입력조건 비교

모의 항목	QUAL2E	CE-QUAL-RIV1
1	Temperature	Temperature
2	DO	DO
3	CBOD	CBOD
4	Organic N	Organic N
5	NH ₃ -N	NH ₃ -N
6	NO ₂ -N	
7	NO ₃ -N	NO ₃ -N (+NO ₂ -N)
8	Organic P	Organic P
9	Dissolved P	PO ₄ -P
10	Chlorophyll a (Algae)	Algae
11	Coliforms	Coliforms
12	Arbitrary non conservative	Reduced Mn, Reduced Iron
13	Conservative I, II, III	

2.2 BOD 및 DO의 반응식 비교

수질항목을 모의함에 있어서 두 모형이 가지는 차이점을 분석하기 위하여 각각의 수질항목에 대한 반응식을 서로 비교하였다. 먼저 QUAL2E 모형에서의 CBOD에 대한 반응식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{dL}{dt} = -(K_1 + K_3)L \quad (1)$$

여기서, L 은 CBOD 농도, K_1 은 호기성산화에 의한 CBOD 분해율, K_3 는 침전에 의한 CBOD 감소율이 된다. RIV1 모형에서는 이와 같은 호기성산화와 침전 이외에도 식 (2)와 같이 질산염감소와 혐기성산화에 의한 CBOD 분해율, 조류와 미생물의 사멸에 의한 영향도 고려한다.

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} = & - \left(K_1 + KDN + \frac{CBODSR}{H} \right) L \\ & + 1.59 \left(\frac{FCBOD \times O + 0.5}{O + 0.5} \right) (ALGADK + MDEATH) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, K_1 은 호기성산화에 의한 CBOD 분해율, KDN 은 질산염감소 및 혐기성산화에 의한 CBOD 분해율, $CBODSR$ 은 CBOD의 침전율, H 는 수심, $FCBOD$ 은 조류 및 미생물 사멸이 CBOD에 영향을 미치는 비율이고, O 는 DO 농도, $ALGADK$ 와 $MDEATH$ 는 각각 조류와 미생물의 감소율을 나타낸다. 수치로 나타낸 매개변수들은 모형에서는 특정함수로 입력되며 사용자가 원하는 임의의 값으로 수정할 수 있다. RIV1 모형에서는 식 (3)을 이용하여 K_1 을 온도에 대하여 보정한다.

$$K_1 = AK_1 (1.047^{T_s - 20}) \left(\frac{O}{O + 0.5} \right) \quad (3)$$

여기서, AK_1 은 온도보정이전의 호기성산화에 의한 CBOD 분해율을 나타내고, T_s 는 주변수 온도이다.

QUAL2E 모형에서는 DO 농도변화를 구하기 위하여 산소의 재포기율, BOD 분해율, 조류의 광합성과 호흡 작용, 질소균의 반응, 퇴적물산소요구량 등을 고려한다. QUAL2E 모형에 사용된 DO에 대한 반응식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dO}{dt} = & K_2(O_s - O) - K_1L - \alpha_5\beta_1N_1 \\ & - \alpha_6\beta_2N_2 + (\alpha_3\mu - \alpha_4\rho)A - K_4/H \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, K_2 는 재포기율, O_s 는 DO의 포화농도, α_5 와 α_6 는 각각 암모니아성 질소와 아질산성 질소의 산화에 의한 소비율, β_1 과 β_2 는 각각 암모니아성 질소와 아질산성 질소의 산화율, N_1 은 암모니아성 질소의 농도, N_2 는 아질산성 질소의 농도, α_3 는 조류의 광합성에 의한 산소의 생성률, μ 는 조류의 성장률, α_4 는 조류의 호흡에 의한 소비율, ρ 는 조류의 호흡율, A 는 조류농도, K_4 는 퇴적물산소요구량이다. RIV1 모형의 경우 식 (5)와 같이 용존 철 및 망간에 의한 산소소모량도 고려한다.

$$\begin{aligned} \frac{dO}{dt} = & K_2(O_s - O) - (K_1 \times L) - (4.57 \times KN \times N_1) \\ & + 0.5565 \left(\frac{N_3}{N_3 + N_1} \right) (ALGRO + MGRATE) \\ & - 1.59(1 - FCBOD)(ALGADK + MDEATH) \\ & - (0.14 \times KFEDK \times Fe) - (0.15 \times KMNDK \times Mn) \\ & - KSOD \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, N_3 는 질산성 질소의 농도, $ALGRO$ 와 $MGRATE$ 는 각각 조류와 미생물의 성장률, $KFEDK$ 와 $KMNDK$ 는 철과 망간의 산화계수로서 기본값은 각각 0.0과 0.5로 주어진다. 또한 Fe 와 Mn 은 각각 감소된 철과 망간의 농도를 뜻하며, $KSOD$ 는 퇴적물산소요구량을 의미한다.

2.3 질소 및 인의 반응식 비교

QUAL2E 모형에서 사용된 유기질소에 대한 반응식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{dN_4}{dt} = -(\beta_3 + \sigma_4)N_4 + \alpha_1\rho A \quad (6)$$

여기서, N_4 는 유기질소의 농도, β_3 는 유기질소의 반응율, σ_4 는 침전율, α_1 는 조류의 질소성분비이다. RIV1 모형에서도 식 (7)에서와 같이 QUAL2E 모형과 비슷한 형태의 반응식을 이용한다.

$$\frac{dN_4}{dt} = - \left(K1N + KDN + \frac{KNSET}{H} \right) N_4 \quad (7)$$

$$+ [0.075(ALGADK + MDEATH)]$$

여기서, $K1N$ 은 유기질소의 반응율, KDN 은 질산염 감소와 혐기성산화에 의한 감소율, $KNSET$ 은 침전을 에 해당한다. RIV1 모형에서는 $K1N$ 을 식 (8)을 이용하여 온도에 대해 보정하게 된다.

$$K1N = ACK \left[1.047^{(T_s - 20)} \right] \left(\frac{O}{0.5 + O} \right) \quad (8)$$

여기서, ACK 는 온도보정이전의 유기질소의 반응율이다.

유기질소의 수화반응으로 생성되는 암모니아성질소의 반응식은 QUAL2E 모형의 경우 식 (9)와 같은 반응식을 사용하여 계산한다.

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 + \frac{\sigma_3}{H} - F_1 \alpha_1 \mu A \quad (9)$$

여기서, β_1 은 암모니아성질소의 생물학적 산화율, σ_3 는 암모니아성질소에 대한 수저생성비율, F_1 은 암모니아성 질소로부터 취하는 조류질소의 비율이다. RIV1 모형의 암모니아성 질소의 농도변화율에 관한 반응식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{dN_1}{dt} = (K1N + KDN)N_4 - (KN + KNX)N_1$$

$$+ 0.075 * ALGADK$$

$$- \left(0.075 * \frac{N_1}{N_1 + N_3} \right) * (ALGRO + MGRATE) \quad (10)$$

여기서, KN 은 암모니아성질소의 반응률, KNX 는 하상침전물에 의한 흡수율, 그리고 N_3 는 질산성질소의 농도이다. RIV1 모형에서는 식 (11)을 이용하여 KN 을 온도에 대해서 보정한다.

$$KN = AKN \left(1.1^{T_s - 20} \right) \left(\frac{O}{O + 0.5} \right) \quad (11)$$

QUAL2E의 아질산성질소와 질산성질소의 반응식은 식 (12)~(13)과 같다.

$$\frac{dN_2}{dt} = \beta_1 N_1 - \beta_2 N_2 \quad (12)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2 N_2 - (1 - F_1) \alpha_1 \mu A \quad (13)$$

여기서, β_2 는 아질산성질소의 산화율이다. 질산성 질소의 경우 조류의 영향에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다. RIV1의 경우 아질산 및 질산성질소는 QUAL2E와 달리 별도로 구분해서 처리하지 않고 질산성질소만을 식 (14)로 처리한다.

$$\frac{dN_3}{dt} = - (0.35 \times KDN \times L) + (KN \times N_1)$$

$$- 0.075(ALGRO + MGRATE) \left(\frac{N_3}{N_1 + N_3} \right)$$

$$- (KDESED \times N_3) \quad (14)$$

여기서, $KDESED$ 는 퇴적물의 탈질산화 비율이다.

유기인과 용존인의 경우 QUAL2E에서 각 반응식을 살펴보면 식 (15)~(16)과 같다.

$$\frac{dP_1}{dt} = - (\beta_4 + \sigma_5) P_1 + \alpha_2 \rho A \quad (15)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4 P_1 + \sigma_2 / H - \alpha_2 \mu A \quad (16)$$

여기서, P_1 와 P_2 는 각각 유기인과 용존인 농도, β_4 는 유기인의 반응율, σ_5 는 침전을, α_2 는 조류의 인 성분비, σ_2 는 용존인의 하상으로부터의 전이율을 나타낸다. 이와 유사한 방법으로 RIV1에서는 식 (17)~(18)을 이용하여 유기인과 용존인을 해석한다.

$$\frac{dP_1}{dt} = - (KPDK + KPSET) P_1$$

$$+ 0.01 * (MDEATH + ALGDK) \quad (17)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = KPDK \times P_1 - KPO4DK * P_2$$

$$- 0.01 * (ALGRO + MGRATE) \quad (18)$$

여기서, *KPDK* 및 *KPSET*는 각각 유기인의 반응율과 침전율을 의미하며, *KPO4DK*는 흡착에 의한 1차 반응률을 나타낸다.

3. 모형의 적용

3.1 대상하도의 수질변동경향

수질변동을 살펴보기 위하여 대표적인 수질지표인 BOD값에 대한 변동추이를 분석하였다. 대청댐부터 하구언까지 130.47km에 이르는 대청댐이하 금강본류를 대상으로 환경부에서 제공하는 월별 BOD값들을 평균하여 연도별로 나타내었다(그림 1 참조).

그림 1에서 나타낸 바와 같이 대청댐이후의 수질은 현도까지 양호한 농도를 유지하나, 갑천이 유입되면서 급격히 악화되고 다시 미호천이 유입되어 수질의 악화가 고조되어 하류단까지 지속되는 양상을 나타낸다. 또한 공주를 거쳐 취수장이 위치한 부여지점에서 수질이 약간 개선되는 양상을 보인다. 그러나 하구둑으로 가면 서 논산천의 유입으로 다시 BOD 농도가 상승하는 경향을 보이게 된다. 연도별로 살펴보면 2003년의 수질은

2001년과 2002년의 수질과 비교하여 많이 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 2004년에는 전체적으로 수질이 악화된 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 수행한 수질모의를 위하여 2002년 10월에 유량과 수질을 동시에 측정 한 자료를 사용하였으며(한국수자원공사 2004), 각 지류에 대한 유량 및 수질자료는 표 2에 제시하였다.

표 2에서 알 수 있듯이 상류단에서는 갑천의 유입 BOD 농도가 하류단에서는 논산천의 유입 BOD 농도가 그 밖의 지류에 비하여 상당히 높은 것을 알 수 있다. 미호천의 경우, 유량이 갑천보다 크지만 BOD 농도는 갑천 및 논산천과 비교하여 상대적으로 양호한 편이다. 본 연구에서는 지방 1급하천인 갑천, 미호천, 유구천, 지천, 금천, 석성천, 논산천 등의 7개의 지류만을 입력 자료로 구성하여 두 모형간의 수질모의결과를 비교·분석하였다.

3.2 QUAL2E 모형을 이용한 수질모의

수리학적 매개변수를 산정하기 위하여 전체하도를 302개의 구간(node)으로 나누고 HEC-RAS 모형을 이용하여 부동류해석을 실시한 후, 각 지류의 영향을 고

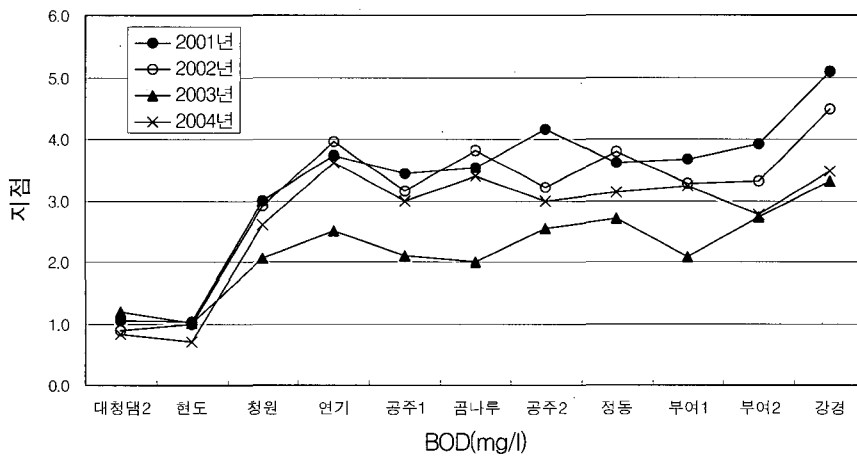


그림 1. 대청댐 하류구간의 수질변동사항

표 2. 유량 및 수질 측정결과

항목	대청댐	갑천	미호천	대교천	정안천	유구천	지천	금천	석성천	논산천	길산천
Q	32.10	13.67	14.47	0.66	1.36	3.17	4.48	1.65	1.46	6.76	1.146
Temp	19.2	18.50	17.10	17.57	16.20	16.40	16.70	16.70	16.80	17.86	17.86
DO	7.2	6.88	7.61	9.97	8.89	9.97	9.40	7.46	7.50	9.75	9.75
BOD	0.98	6.05	3.72	1.10	0.88	0.66	0.69	1.96	2.10	5.15	1.30
Org-N	4.782	4.137	1.307	0.573	0.138	1.446	0.164	0.032	0.151	0.882	0.325
NH ₃ -N	0.3	2.20	0.60	0.377	0.380	0.150	0.190	0.950	1.570	2.388	0.213
NO ₂ -N	0.023	0.043	0.020	0.033	0.061	0.017	0.038	0.077	0.161	0.069	0.019
NO ₃ -N	1.229	6.667	4.477	0.655	1.904	1.521	1.712	1.664	2.680	2.434	0.371
Org-P	0.064	0.647	0.234	0.036	0.060	0.105	0.059	0.047	0.117	0.216	0.061
Dis-P	0.071	0.240	0.112	0.036	0.087	0.096	0.080	0.021	0.084	0.093	0.061

려하여 상류단 유량증가에 따른 회귀분석을 실시하였다. 그리하여 유량-유속, 유량-수심의 관계를 산정하여, QUAL2E 모형에 필요한 수리학적 매개변수를 구하였다. 모의를 위하여 고려된 지류의 유량은 실측자료를 사용하였으며, 최상류단의 유량조건은 대청댐의 10월 평균 방류량자료를 산정하여 적용하였다. 하류단의 경계조건은 하구독관리연보를 참고하여 적용하였으며, 이에 따르면 하절기와 동절기로 나누어 El. 1 m 또는 El. 2 m로 운영되고 있음을 확인하였다.

QUAL2E 모의를 위한 대청댐이하 금강하류의 모식도는 그림 2와 같으며 하도로 유입되는 지류는 모두 점오염원으로 가정하여 처리하였다. 전체 130.47 km의 구간을 1 km의 격자를 사용하여 모두 131개의 격자로 구성하였으며 하도특성을 반영, 16개의 구간(reach)으로 구분하여 산정된 수리학적 매개변수를 각 구간에 대하여 입력하여 모형을 구성하였다. 금강분류 하도를 따라서 유입되는 지방 1급이상의 하천은 점오염원으로 처리하였

고, 미소하천과 취수장에 대한 유량조건은 무시하였다.

3.3 RIV1 모형을 이용한 수질모의

비정상상태 수질모형의 경우, 하도를 구성하는 구간(node)을 56개로 구분하여 정의하고 각 구간을 지정할 때 주요 수위표 및 취수장등을 기준으로 하상고 및 횡단면등을 처리하였다. 하도의 구축을 위하여 지류의 단면을 별도의 구간(reach)으로 정의하여 각 지류당 2개의 구간(node)를 추가 총 70개의 구간(node)으로 주요지천 및 본류를 구성하였다(그림 3 참조). 정상상태 모형과 모의조건을 동일화하기 위해서 유량 및 수질조건을 10월 1일부터 31일까지 전 모의기간에 대해서 일정한 값을 가지는 형태로 입력하였다. 그림 3과 같이 7개의 지류가 고려되었으며, 각 모형의 모의조건을 일치시키기 위하여 유량증분이나 취수량과 같은 조건은 고려하지 않았다. 또한 수리모들의 수행에 필요한 단면자료는 모형의 안정화를 위하여 사다리꼴로 단순화하여 입력하였다.

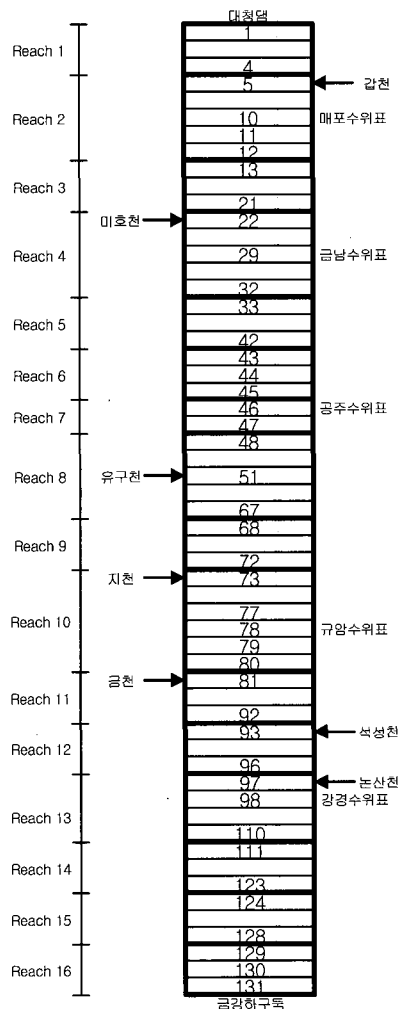


그림 2. QUAL2E 모식도

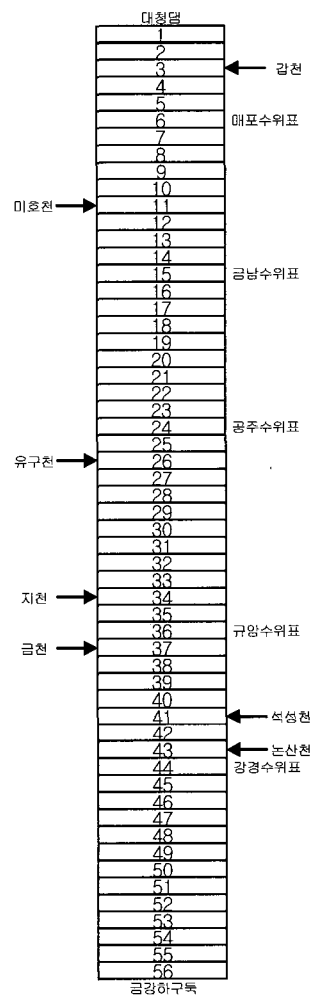


그림 3. RIV1 모식도

최상류단 유량은 모의기간에 대해서 일정한 값을 가지도록 하였으며 지류에 대해서도 실측된 유량값이 일정하게 유입되는 조건으로 가정하였다. 수리모델의 하류단 경계조건은 상류단 및 지류에서 유입되는 유량을 모두 합하여 하류단 경계조건으로 부여하였다. RIV1 모형의 특성상 수리분석의 안정화가 선행되어야 하며, 두 모형간의 수질모의결과를 비교하기 위하여 각 모형에 필요한 매개변수를 QUAL2E 모형과 동일하게 입력해 주었다. 먼저 QUAL2E 모형의 경우 모형의 보정에 주로 사용되는 주요 매개변수로는 BOD 반응을 K_1 , 침강을 K_3 , 및 퇴적물산소요구량 K_4 를 들 수 있다. RIV1 모

형에서 이들 매개변수에 상응하는 매개변수로는 AK1, CBODSR, SOD에 해당되며, 각각의 모형에 대한 입력값들을 항목별로 정리하여 표 3에 나타내었다.

4. 모의결과 비교

4.1 주요 수질인자비교

모형의 결과를 비교 분석하기 위해서 QUAL2E 모형의 결과와 RIV1 모형의 결과를 함께 표시하였고, 수질 변동특성과 모의결과의 경향을 파악하기 위해서 실측치를 모의결과와 함께 그림 4에 제시하였다. 결론적으로

표 3. QUAL2E 모형과 RIV1 모형의 매개변수 비교

모형	매개변수							
QUAL2E	K_1	K_3	K_4/H	β_3	σ_4	β_1	β_4	σ_5
RIV1	AK1	CBODSR/H	KSOD	ACK	KNSET/H	AKN	KPKD	KPSET
입력값	0.02	0.0	0.0	0.02	0.05	0.10	0.05	0.01

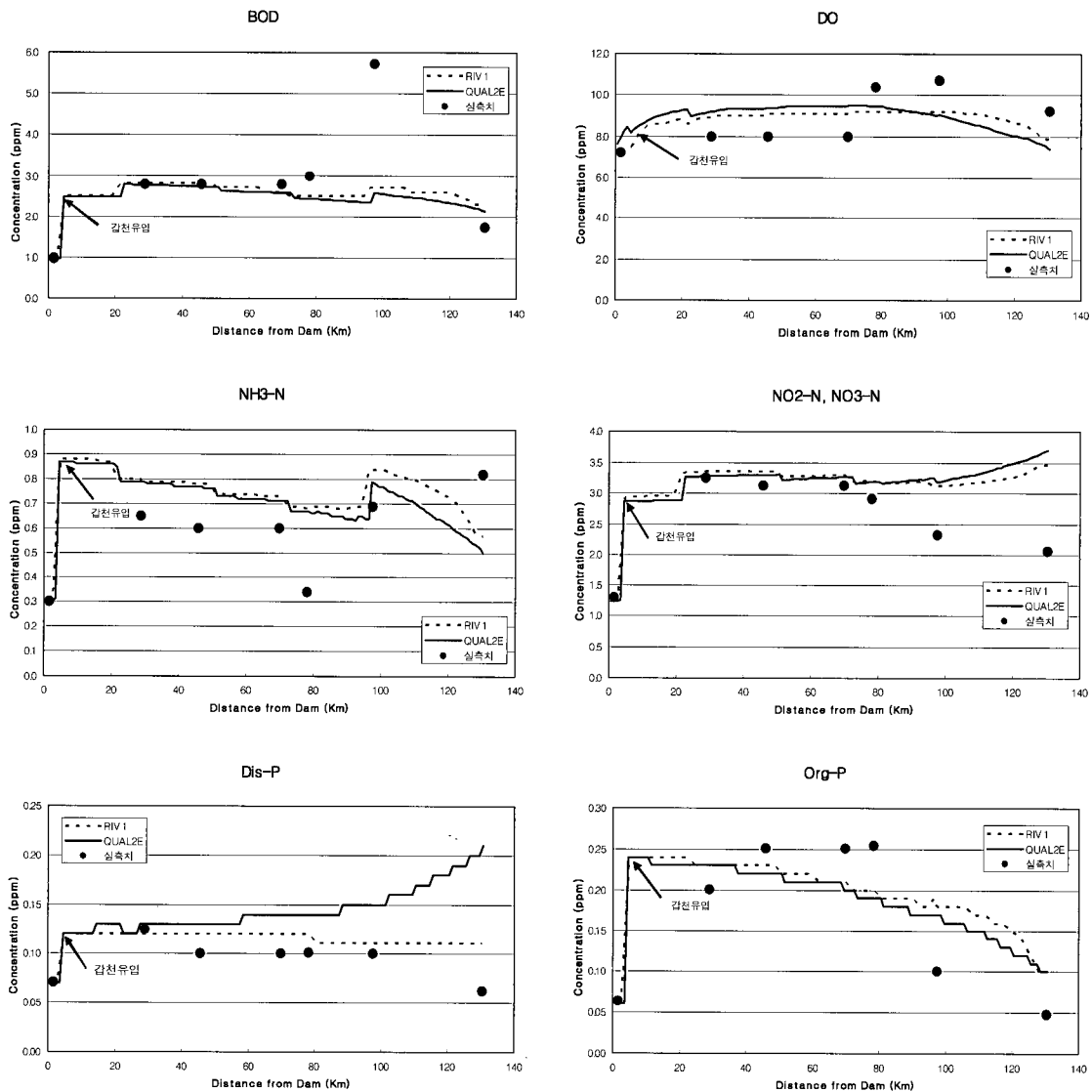


그림 4. QUAL2E 및 RIV1 모형의 결과비교

정상 및 비정상상태 두 모형의 BOD와 DO 값을 비롯하여 전 수질항목에 대한 결과값이 매우 잘 일치하였다. 그러나 특정 N 및 P군에 대해서는 다소 차이를 보였으며 RIV1 모형에서는 정체구역인 하구언에서 시간이 경과하면서 미약한 농도변동이 소폭 진행됨을 알 수 있었으나 이러한 현상은 무시할 수 있는 범위에서 발생하였다.

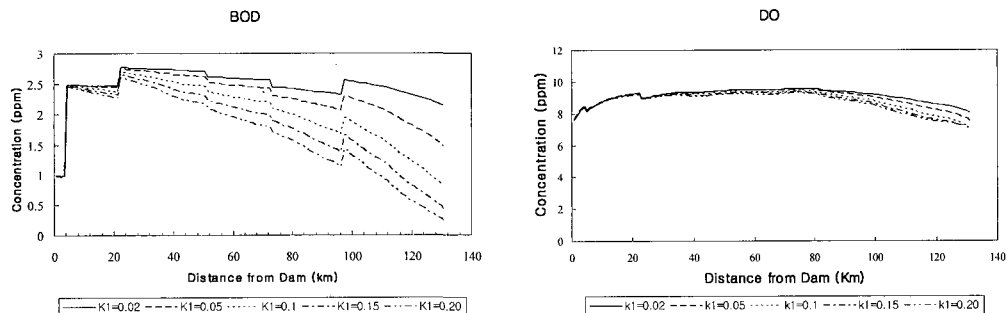
먼저 BOD와 DO의 농도분포로 확인한 모형의 일치도는 매우 높았으며 모의결과는 실측치와도 잘 일치하고 있다. 식 (1)과 (2)를 비교해 보면 RIV1 모형의 경우 조류와 미생물의 사멸이 BOD 계산에 참여하고 있다는 점을 알 수 있다. BOD산정에 지배적인 두가지 반응인자, 감소율 K_1 과 침전을 K_3 는 표 3에 나와 있고 RIV1에서 고려된 KDN 은 0으로 가정하였다. 용존산소(DO)의 경우 식 (4)와 식 (5)를 비교해보면 주로 고려된 항목으로 BOD 반응물, 질산 및 아질산성 질소와 함께 조류의 영향 등을 들 수 있다. 여기서 QUAL2E의 경우 아질산성 질소의 영향을 별도로 고려하는데 RIV1은 질산성 질소만을 고려한 것과 용존철과 망간의 산소 소모량도 고려하였음을 알 수 있다. 암모니아성 질소의 경우 식(9)와 식(10)을 비교해 보면 매우 비슷한 반응식이 사용되었음을 알 수 있고 QUAL2E에서 통합해서 고려한 반응계수를 RIV1의 경우 혐기성반응율 및 하상흡수율로 세분화해서 고려하였음을 알 수 있다. 질산성 질소의 반응식 식(13)과 식(14)를 비교해보면 QUAL2E의 경우 아질산성 질소와 조류의 관계로 이루어져 있으나 RIV1의 경우 BOD농도, 암모니아성 질소, 그리고 퇴적물의 탈질화 비율등이 고려되어 매개변수의 입력에 따라 농도차이가 클 것으로 보인다. 용존인의 경우 두모형간 차이가 가장 크게 나타났으며 각 모형의 반응식 (16), (18)에 다소 차이가 있음을 발견할 수 있다. 즉, QUAL2E 모형의 경우 유기인의 농도와 하상으로부터의 전이율을 수심으로 나누어 구성되어 있으나 RIV1의 경우 유기인과 함께 용존인의 초기값도 계산에 포함된

것을 알 수 있다. 마지막으로 유기인의 경우 반응율과 침전율을 조류의 영향과 함께 고려하여 두 모형이 각각 비슷한 반응식을 채택하여 구성되었으므로 모의결과도 서로 잘 일치함을 보였다.

수리학적 측면에서는 QUAL2E의 경우 유량에 관한 지수함수로 하도의 특성을 단순화하여 수리적 특성을 자세히 고려하지 못하는 약점이 있는 것으로 판단되었으나 RIV1 모형과의 비교를 통하여 수리학적 흐름특성의 반영이 비교적 합리적으로 이루어지고 있다는 점도 알 수 있었다. 두 가지 모형은 각각 모의하고자 하는 조건에 따라 장·단점이 있고 비정상 수질모의가 가능한 RIV1 모형의 경우 QUAL2E 모형을 대치할 만한 기능이 충분하다는 논리도 세울 수 있었지만 모형의 안정화, 입력변수의 단순화, 그리고 사용상의 편의성을 고려해 볼 때 QUAL2E 모형도 충분히 장점을 가지는 모형임을 알 수 있었다. 그러므로 모의조건에 적합한 상황 즉, 크게 순별또는 월별 수질예측과 같은 중장기 모의 혹은 수질사고와 같은 단기모의로 구분하여 각 모형의 특성에 알맞게 모형을 구분하여 적용하는 것이 가장 바람직하다는 결론을 내릴 수 있었다.

4.2 주요수질인자에 대한 민감도 분석

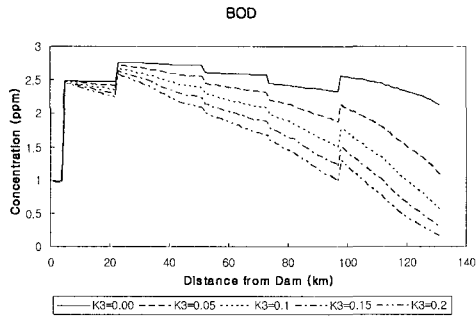
표 2에 주어진 분석결과를 토대로 BOD반응율 및 침전율을 변화시켜 BOD 및 DO에 대한 농도변화를 조사하여 민감도 분석을 실시하였다. QUAL2E 모형에서 BOD 반응물 K_1 과 침전을 K_3 를 증가시키면 하류단으로 갈수록 농도가 감소되어 최하류단 BOD 농도값이 K_1 이 0.02일때 2.14 mg/l, 0.2일때 0.24 mg/l까지 감소되어 반응율과 비례하여 거의 10% 수준으로 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 한편 K_3 에 대한 변동폭도 이와 비슷한 감소율을 보여 K_3 가 0.2일 때 0.14 mg/l까지 농도감소가 진행됨을 파악하였다. 이들 모의결과는 그림 5와 6에 잘 나와있으며 이들에 기인한 DO의 농도변화는 거의 없음을 확인할 수 있었다.



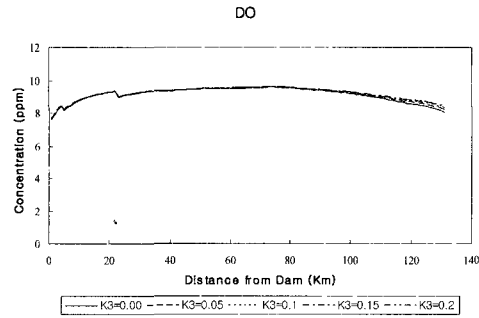
(a) BOD 농도변화

(b) DO 농도변화

그림 5. QUAL2E 모형에서의 K_1 변화에 따른 민감도 분석



(a) BOD 농도변화

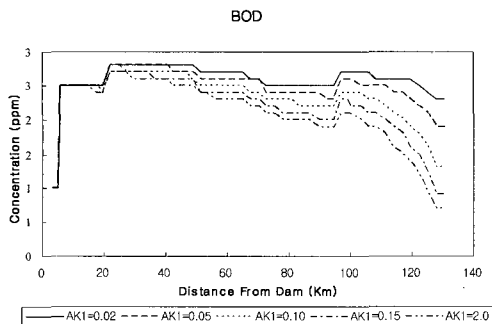


(b) DO 농도변화

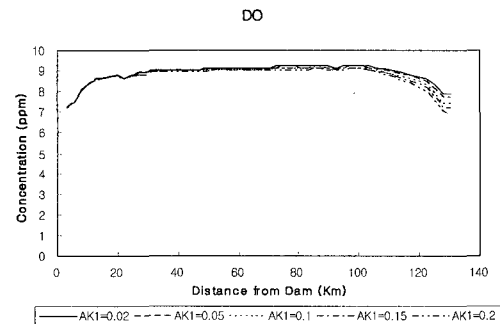
그림 6. QUAL2E 모형에서의 K_3 변화에 따른 민감도 분석

그림 7~8은 RIV1 모형의 민감도 분석에 대하여 나타낸 것이다. AK1이 0.02일 때 최하류단농도는 2.8 mg/l, 그리고 AK1이 0.2일때의 최하류단농도는 0.7 mg/l로 계산되어 25%정도의 감소율을 보인다. 한편 BOD 침전율이 0.2일때의 최하류단 BOD농도는 QUAL2E 모형이 0.14 인데 반하여 RIV1 모형의 경우 0.5 mg/l로 계산됨을 확인하였다. 그림 5~8로부터 알 수 있듯이 전체적인 패턴에서 두 모형 매개변수의 변동에 따라 비슷한 감소율을 보이며 농도변화가 진행됨을 알 수 있었고 BOD 반응율이나 침전율변화에 기인한 DO 농도변화는 결과적으로 매우 미미한 것으로 나타났다.

이를 토대로 BOD 반응율 및 침전율에 대한 BOD 변동폭은 QUAL2E 모형이 RIV1 모형보다 다소 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 특히 QUAL2E 모형으로 모의한 수질변동이 다소 부드럽게 나타난 반면 RIV1 모형의 수질변동양상은 다소 직선적인 농도변동을 보이는데 이는 모의시 설정된 두 모형간의 노드거리에 따른 차이로 보인다. 민감도 분석을 통하여 최하류단이 하구둑이라는 정체수역에 해당하는 것을 전제로 이러한 차이는 각 수질인자에 대한 반응률과 모의구간의 길이에 비례하여 두 모형으로부터 계산된 모의값들간의 차이가 커질 것으로 예상할 수 있었다.

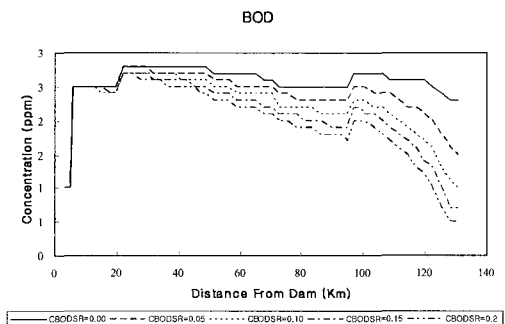


(a) BOD 농도변화

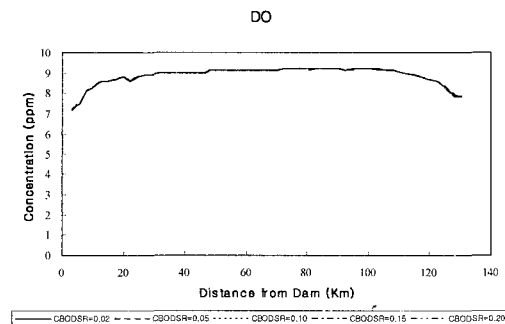


(b) DO 농도변화

그림 7. RIV1 모형에서의 AK1 변화에 따른 민감도 분석



(a) BOD 농도변화



(b) DO 농도변화

그림 8. RIV1 모형에서의 CBODSR 변화에 따른 민감도 분석

5. 결 론

대청댐 하류의 금강본류에 대해서 정상상태 및 비정상상태 수질모형을 적용하여 수질변동을 모의하였다. 입력자료는 유량과 수질을 동시측정한 실측자료를 이용하여 구성하였고 두 모형의 비교를 동일유량 및 수질조건하에서 실시하였다. 입력자료의 구성은 두가지 모형이 서로 공유하는 입력자료가 많기 때문에 비정상상태 수질모형구축에 필요한 자료는 하도단면이 주어진다 가정하여 QUAL2E 입력자료로 충분히 구성이 가능하였고 두 가지 모형을 같은 정상상태로 구성하였을 때, 그 결과값과 변동양상은 전 수질항목에 걸쳐서 거의 일치할 정도로 상당히 비슷하였다. 그러나 용존인의 경우 두 모형간의 결과값이 큰 차이를 보이고 있었고 이러한 현상은 두 모형의 반응식을 비교함으로써 확인가능 하였다. 두 모형의 수질반응식을 서로 비교하여 주요수질 변수에 대한 매개변수를 각 모형별로 표 3과 같이 정리할 수 있었다. 표 3에서 제시된 매개변수를 기초로 민감도 분석을 실시한 결과 각 수질항목의 변동율이 서로 잘 일치하여 표에서 제시된 값들이 타당하다는 것을 뒷받침해주고 있다.

RIV1 모형의 경우 수리모의가 수질모의에 선행되어서 모의되어야 하며 비정상상태 수리모형은 상하류단 경계 조건, 초기조건, 지류유입, 등에 상당히 민감한 반응을 보였다. 그 밖에도 계산단면의 하상고, 하폭, 및 유입유량등에도 다소 민감한 것으로 드러났다. QUAL2E의 경우 수리해석이 구간(reach)별 평균값에 의해 산정된 대표값을 회귀분석을 통하여 구하고 이들 값들을 입력해 주도록 되어 있어 상당히 단순화된 약점이 있으나 RIV1의 수질모의로부터 얻어지는 최종계산값들은 상당히 비슷하여 단순화한 수리해석에 기인하는 오차가 하도의 전체적인 수질패턴에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 드러났다. 각 모형의 수질반응식을 비교해 보면 RIV1의 경우 BOD 계산에 조류의 사멸과 생성에 대한 영향을 고려하고 DO 계산에 용존철, 및 망간에 대한 입력자료도 요구하고 있어서 QUAL2E보다 개선된 반응식으로 구성되었음을 알 수 있었다.

모형별로 장단점을 분석해 보면 QUAL2E의 경우 장점으로는 모형의 안정성이 매우 높다는 것과 구간(reach)별로 수질계수의 반응률을 상이하게 적용할 수 있어서 실측치와의 검보정을 보다 용이하게 할 수 있다는 점을 들 수 있다. 단점으로는 모형의 근본적 특성상 정상상태에 최적화되어 유량변동이나 수질변동에 따르는 동적인 수질해석이 불가능하다는 것을 지적할 수 있겠다. RIV1의 경우 전술한 QUAL2E의 단점을 극복하

기 위해 개발되었으나 수리모형과 수질모형이 연동되어 있으므로 모의를 위하여 입력되는 자료가 훨씬 방대하며 이들 자료의 처리를 위한 자료입력 체계가 QUAL2E 모형에 비하여 상대적으로 번거롭다는 것이 단점으로 작용한다. 그 외에도 수리모형의 안정성은 수질모의를 위한 안정성확보와 직접적으로 연관되어 모형의 사용 및 적용을 다소 어렵게 하고 있다. 정상 및 비정상상태 수질모형의 용도는 전자가 월별 및 순별 장기수질예측에 매우 활용도가 높다고 하면 후자는 갑작스런 수질사고와 같은 단기수질모의 즉, 댐방류 플러싱효과를 분석하는 용도에 매우 최적화된 모형이라 할 수 있다. 두 가지 모형은 각각 장단점을 가지고 있으므로 특정모형에 대한 우수성을 거론하기보다는 상호보완의 용도에 알맞게 활용하고 모의하고자하는 고유의 목적을 고려하여 선택, 적용하는 것이 바람직하다 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 그리고 현장실험에 협조해 주신 한국수자원공사 관계자분들과 연구수행에 많은 자문을 주신 충남대학교 서동일교수님, 충북대학교 정세웅교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 서동일, 이은형 (2003). "불연속적으로 흐르는 소하천을 위한 CAP 수질 모델의 개발." **상하수도학회지**, 17(3), pp. 372-377.
- 서동일, 이종현, 이은형, 고익환 (2004a). "CAP을 이용한 금강하류의 수질 모델링 및 오차 원인 분석", **대한환경공학회지**, 26(8), pp. 941-949.
- 서동일, 이종현, 이은형, 고익환 (2004b). "QUAL2E를 이용한 금강하류의 수질 모델링 및 오차 원인 분석", **대한환경공학회지**, 26(8), pp. 933-940.
- 정세웅 (2004). "저수지 플러싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모형의 적용." **한국수자원학회 논문집**, 37(10), pp. 857-868.
- 한국수자원공사 (2004). **실시간 물관리 운영시스템 구축기술개발: 비정상상태 하천수질 예측모형구축. 21세기 프론티어 연구개발사업보고서 1-6-1.**
- Linfield, B. and Barnwell, T. (1987). *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*, USEPA/600/3-87/007. USEPA, Env.

Res. Lab., Athens, GA
Environmental Laboratory, U.S. Army Corps of
Engineers, WES. (1995). *CE-QUAL-RIV1: A
Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water
Quality Model for Streams User's Manual*.
USACE, WES, Vicksburg, MS

Chapra S.C. and Pelletier G. (2003). *QUAL2K: A
Modeling Framework for Simulating River and
Stream Water Quality Documentation and Users
Manual*. USEPA, Env. Res. Lab., Athens, GA

(논문번호:05-09/접수:2005.1.13/심사완료:2005.05.26)