

## 안양천에서 QUAL2E와 QUAL2K 모델의 적용 및 평가

정성수 · 김경섭<sup>†,\*</sup>

안성시청 환경과 · \*한경대학교 환경공학과

(2007년 11월 15일 접수, 2008년 4월 24일 채택)

### Evaluation and Application of QUAL2E and QUAL2K Models in Anyang Stream

Sung Soo Jung · Kyung Sub Kim<sup>†,\*</sup>

Environmental Section, City Of Anseong · \*Department of Environmental Engineering, Hankyong National University

**ABSTRACT :** QUAL2K enhanced QUAL2E and applied in real fields efficiently incorporates denitrification process, sediment-water interaction process, bottom algae and detritus. Also, the CBOD of QUAL2K is divided into two real parts, one is slow CBOD(sCBOD) and another is fast CBOD(fCBOD). The simulation results of QUAL2E and QUAL2K models in Anyang Stream were compared and analyzed in water quality constituents of DO, BOD, Org-N, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, Org-P, Dis-P and Chl-*a* respectively. The similar results were shown in Org-N, NH<sub>3</sub>-N, Org-P and Chl-*a* both QUAL2K and QUAL2E models. But the different results were revealed in DO, BOD, Dis-P and NO<sub>3</sub>-N by the influence of new incorporating processes. DO was shown relatively low values in the effect of bottom algae. BOD which is influenced by particulate organic matter was revealed high values. NO<sub>3</sub>-N was closed to the real values by the two processes of denitrification and sediment-water interaction. To evaluate the running results of QUAL2K and QUAL2E models, a simple statistical analysis was conducted. According to the statistical analysis, QUAL2K represented less relative error and coefficient of variation than QUAL2E in almost all of constituents. It was found that QUAL2K, which simulates the water quality more realistically, can be applied to control and manage the water problems of river or river-run reservoir effectively.

**Key Words :** QUAL2K, Genetic Algorithm, Optimization, Sediment-water Interactions, Bottom Algae

**요약 :** QUAL2K는 QUAL2E 모델의 단점을 개선하고 편의성을 향상시킨 모델로 입자성 유기물, 부착조류, 탈질화 및 퇴적층-수체 상호작용 등을 추가·반영하였으며, CBOD는 느린 CBOD와 빠른 CBOD 두 가지로 구분하여 현실화 하였다. QUAL2E와 QUAL2K 모델을 안양천에 적용하여 DO, BOD, Org-N, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, Org-P, Dis-P 및 Chl-*a* 등 8개 수질항목을 모의하여 결과를 비교·분석하였다. Org-N, NH<sub>3</sub>-N, Org-P 및 Chl-*a*는 두 모델에서 비슷한 결과가 나타났으나, DO, BOD, NO<sub>3</sub>-N 및 Dis-P는 다른 결과가 나타났다. 이는 QUAL2K에 추가된 부착조류, 탈질화, 퇴적층-수체의 상호작용 및 입자성 유기물의 영향에 기인한 것으로 판단된다. DO는 부착조류의 영향으로 낮게 나타났고, BOD는 입자성 유기물의 영향으로 높게 나타났다. NO<sub>3</sub>-N은 퇴적층-수체의 상호작용과 탈질화의 영향으로 실측치에 더 가깝게 나타났다. 모의 결과를 단순통계인자를 이용하여 평가하였으며, 대부분 수질항목에서 상대오차와 분산계수가 QUAL2E보다 QUAL2K에서 작게 나타났다. 자연현상을 좀더 실제에 가깝게 모의할 수 있는 QUAL2K 모델은 하천 및 하천화한 호소 수질관리에 적절히 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어 :** QUAL2K, 유전자 알고리즘, 최적화, 퇴적층-수체 상호작용, 부착조류

### 1. 서론

환경은 자체 정화능력이 있어 어느 정도 외부 환경압력에 견딜 수 있으나 환경압력이 자정능력을 초과하면 환경 파괴 현상이 발생한다. 이의 하나인 수계의 오염문제는 농업용수 및 공업용수 등의 수자원이용을 부적절하게 하여 수확량 및 생산성의 감소를 초래하고 있으며, 또한 음용수로서의 가치를 상실하여 음용수 수질기준을 만족하기 위한 수처리 비용의 과다를 유발하고 있다. 따라서 수계의 오염정도를 파악하고 원인인자를 규명하는 것은 적절한 수질보전대책 및 관리방안 수립을 위하여 필수적이다. 외부

의 오염원 유입에 의하여 야기되는 수계의 수질변화는 계량화가 가능한 수학적 모델을 이용하여 파악할 수 있다. 수질은 유입 오염부하량의 크기에 따라 결정되며 수계내 오염물질은 이 물질의 화학 및 생물학적 특성에 의하여, 또한 수계의 물리적인 특성에 의하여 변화한다. 오염발생원으로부터 비롯되는 부하량은 수질모델을 통하여 농도로 파악되며, 이는 수이용에 필요한 수질기준과 비교·검토하게 된다. 목표로 하는 수질기준을 초과할 경우 다양한 방법을 모색하여 수질관리대책을 수립할 필요가 있다. 상용화 된 모델은 이와 같은 현상을 규명하고 대책을 수립하는데 적절히 이용되고 있다.<sup>1)</sup>

수질모델은 근래 컴퓨터 기술의 발달로 정밀성이 제고되고 있으며, 복잡한 계산도 자료처리속도의 향상으로 자연현상을 더욱 세밀하게 재현할 수 있게 되었다. 그러나 이

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: kskim@hknu.ac.kr

Tel: 031-670-5174

Fax: 031-670-5097

러한 접근방법은 자연현상을 단순화, 수식화 하는 단계에서부터 실제와 거리가 있으며, 이를 활용한 결과는 불확실성을 내포하고 있다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 수질모델은 정확성과 유용성을 갖춘 모델로 점차 개선되고 다양해져 수질관리 분야에서 꼭 필요한 도구로 자리매김하고 있다.<sup>1-3)</sup> 본 논문에서는 미국 환경청(U.S. EPA)에서 1985년 QUALⅡ의 단점을 보완하고 PC에 이용가능하도록 개발한 모델 QUAL2E 모델<sup>4)</sup>과 2003년 QUAL2E의 단점을 보완하고 Microsoft Windows 환경에서 Excel VBA (Visual Basic for Application)를 이용하여 사용자가 보다 쉽게 사용할 수 있도록 프로그래밍 되어진 QUAL2K 모델<sup>5)</sup>을 도시하천의 하나인 안양천에 적용하여 모의결과를 비교·분석하였다.<sup>3,6)</sup>

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. QUAL2K 소개

QUAL2K는 QUAL2E의 단점을 보완하여 한 단계 발전시킨 모델로서 하천의 수직 및 수평으로 완전혼합을 가정하며, 정상상태 부등류 흐름으로 해석하고, 열 수지와 수온의 비정상상태 모의가 가능한 점 등이 QUAL2E와 같으나, 계산요소가 그 특성에 맞게 각각 다른 길이로 모의 할 수 있으며 오염원이나 취수원이 같은 계산요소에 다중으로 고려할 수 있는 점이 QUAL2E와 다르다. QUAL2K 모델만의 특징은 VBA를 이용하여 프로그래밍 하였으며, Microsoft Windows 환경에서 사용할 수 있도록 Excel을 Graphic User Interface(GUI)로 활용하여 사용자가 보다 이용하기 쉽게 하였다. 또한 QUAL2K는 유기물질을 나타내는 CBOD를 천천히 산화하는 sCBOD( $c_s$ )와 빠르게 산화하는 fCBOD( $c_f$ )의 두 가지 형태로 구분하여 현실화 하였으며, 자생 BOD

와 관련 있는 입자성 유기물(detritus: $m_0$ )도 모의 가능하다. 더불어 이 모델에서는 무산소 상태에서 반응이 일어나는 탈질화반응이 첨가되었으며, 퇴적층과 수체간의 용존산소 및 영양염류의 물질흐름량을 파악할 수 있는 기작을 구현하였다.<sup>7)</sup> 이 기작에는 입자성 유기물의 침강, 퇴적층 내 반응 및 수체 내 용존 상태 농도 등이 관여한다. 조류( $a_b$ )가 모의 가능하며, 조류, 입자성 유기물 및 무기성 고형물 등을 이용하여 빛의 감소를 파악한다. 하천의 pH는 알카리도와 총 무기탄소로 파악하며, 수온, 빛 및 침강에 의해 영향을 받는 병원균도 모의 가능하다. QUAL2E와 QUAL2K 모델의 모의항목 및 물질흐름을 나타내면 Fig. 1과 같다.

### 2.2. 대상 하천

안양천은 의왕시 백운산에서 발원하여 왕곡천, 오전천, 당정천, 산본천, 학의천, 수암천, 삼성천, 삼봉천 및 목감천과 합류한 후 광명시, 금천구, 구로구를 거쳐 영등포구에서 도림천과 합류하여 한강으로 유입하는 대표적인 도시하천 중의 하나이다. 안양천의 전체 유역면적은 288  $\text{km}^2$ 이며 본 연구대상으로 삼고 있는 안양천 발원지로부터 목감천 합류 직후까지의 유역면적은 202.77  $\text{km}^2$ 이고, 수질모의 구간인 안양천 상류 고천2교 지점부터 목감천 합류직후 고척교 지점까지의 유로연장은 23.4 km이다(Fig. 2).<sup>8)</sup>

### 2.3. 모델 적용

#### 2.3.1. 수질 및 유량 자료

안양천 본류의 수질 및 수리 특성을 파악하기 위하여 본류 7개소, 지류 8개소 등 총 15개소를 조사지점을 선정하였으며, 자료 중 2차 측정 자료(2002. 9. 30~2002. 10. 1)를 사용하였다.<sup>8)</sup> 수질분석항목은 총 14개로 일반 수질항목

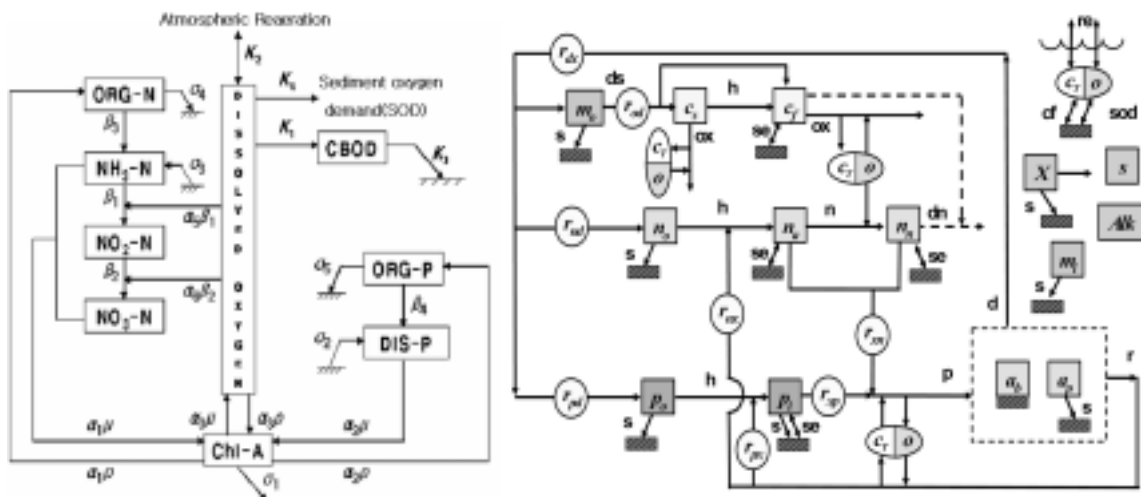
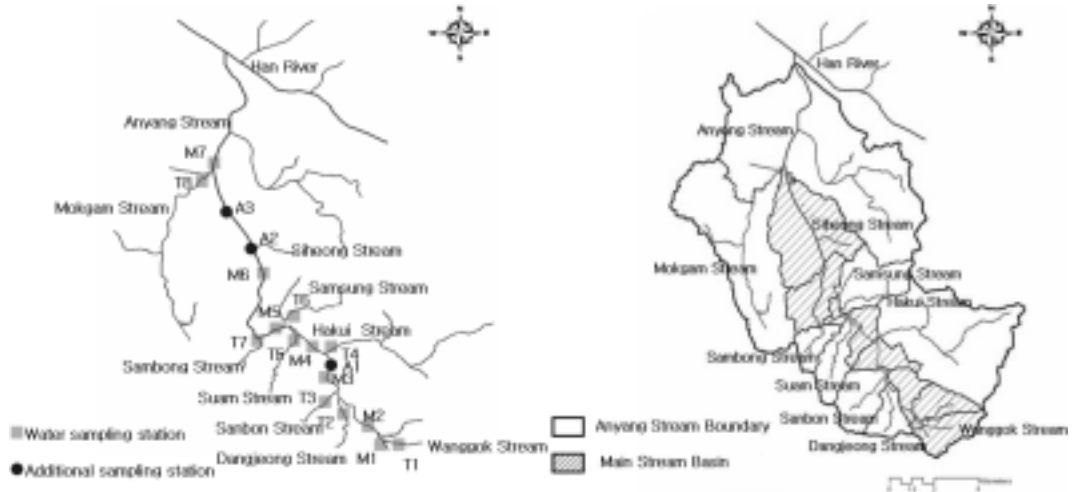


Fig. 1. QUAL2E and QUAL2K Models kinetics and mass transfer processes. Kinetic processes are dissolution(ds), hydrolysis(h), oxidation(ox), nitrification(n), denitrification(dn), photosynthesis(p), death(d), and respiration demand(r), Mass transfer processes are reaeration(re), settling(s), sediment oxygen demand(sod), and sediment inorganic carbon flux(cf). Note that the subscript x for the stoichiometric conversions stands for chlorophyll a(a) and dry weight (d) for photoplankton and bottom algae, respectively.



Note: Main Stream(M), Tributary(T), Additional Sampling Station(A)

Main Stream(M) : Gochun 2 Bridge(M1), Eja Bridge(M2), Dongyang Bridge(M3), Visan Bridge(M4), Anyang Bridge(M5), Kia Bridge (M6), Gochuck Bridge(M7), Tributary(T) : Wanggok Stream(T1), Dangjeong Stream(T2), Sanbon Stream(T3), Hakui Stream(T4), Suam Stream(T5), Samsung Stream(T6), Sambong Stream(T7), Mokgam Stream(T8), Additional Sampling Station(A) : Myunghak Bridge(A1), Siheung Stream Junction(A2), Chulsan Bridge(A3)

Fig. 2. Water sampling stations and watershed delineation in Anyang Stream.

8개(DO, BOD, COD, SS, 온도, pH, 전기전도도, Chl-a), 영양염류항목 6개(NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, TN, PO<sub>4</sub>-P, TP)이며 분석방법은 수질오염공정시험법에 준하여 실시하였다. 2002년도 수질 자료는 QUAL2E 모델을 수행하기 위하여 측정된 관계로 QUAL2K 모델을 모의하기에는 수질항목이 부족하다. 따라서 2005년도 봄(4월 6일)에 각 구간별 2차 조사에 포함된 11지점에서 부착조류를 측정하였으며, 2차 조사에 포함되지 않은 3지점을 추가로 선정하여 부착조류를 측정하였다(Fig. 2). 부착조류는 평평한 돌이나 나무토막에 부착된 조류를 증류수로 씻어 채취한 후 흡광광도법을 이용하여 Chl-a를 측정된 것으로, 2차 조사와 시간적인 차이가 존재하지만 안양천의 수질상태가 과거 몇 년간 급격한 변화를 보이고 있지 않아 2차 조사 자료와 함께 안양천 수질모의에 적절히 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

2.3.2. 반응계수 추정

QUAL2K Ver.5.1에서는 PIKAIA<sup>9)</sup> 유전자 알고리즘<sup>10,11)</sup>을 이용하여 매개변수를 보다 쉽게 추정할 수 있는 기능이 추가되었다(Automatic Calibration : AUTO Cal.). 유전자 알고리즘은 잠재해를 표현한 매개변수 개체들로 이루어진 모집단으로부터 출발한다. 모집단은 매 세대마다 일정수의 개체를 유지하고 매 세대에서 각 개체의 적합도를 평가하여 다음 세대에 생존할 개체들을 확률적으로 선택한다. 선택된 개체들 중 일부는 임의로 짝을 짓고 교배하여 자손을 생성한다. 이 과정에서 부모의 유전자가 자손에게 상속되고, 돌연변이가 일어날 수 있다. 자손은 부모로부터 우수한 유전형질을 상속받으므로 다음 세대의 잠재해들은 평균적으로 전 세대보다 실제에 더 적합되어 있다. 이러한 진화과정은 종료조건이 만족될 때까지 반복한다.

2.3.3. 모의 수행

안양천 유역의 총 모의구간은 왕곡천 본류 합류지점인 고척2교에서 고척교까지 23.4 km로 QUAL2E 모델에서는 유입지점, 오염원 및 수로 특성을 고려하여 수리학적 특성이 비슷한 11개로 구분하였으며 계산요소는 0.2 km로 설정하였다. QUAL2K 모델에서는 QUAL2E 모델의 11개 구간을 더욱 세분화하여 30개 구간으로 나누었으며, 두 모델간 동일한 수리학적 상태를 구현하기 위하여 QUAL2E 구간에 해당하는 QUAL2K 구간에서는 같은 수리특성자료를 사용하였다. QUAL2K 30개 각 구간의 계산요소는 본류로 유입되는 지류, 하수처리장 및 오염부하가 표현되도록 각각 다르게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모의결과 비교 · 분석

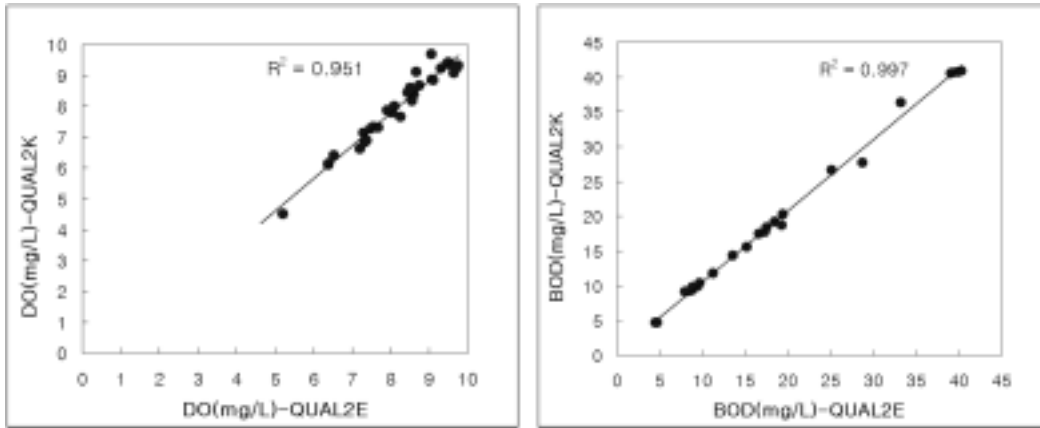
먼저 같은 반응계수를 사용하여 QUAL2E와 QUAL2K 모델의 결과를 비교하였으며, 결과가 서로 얼마나 차이가 나는지 알아보았다. 그러나 QUAL2E와 QUAL2K 모델 반응계수는 일치하는 것과 추가된 것이 있으므로 QUAL2E와 다른 QUAL2K 모델 반응계수는 기본값이나 고려하지 않는 것으로 하였다.

QUAL2E 모델의 보정은 최적화 기법을 사용하였다. K<sub>1</sub>은 1차 처리수로 가정하여 0.2 d<sup>-1</sup>의 값을 사용하였으며, K<sub>2</sub>는 우리나라 하천에서 Langbien & Durum 식이 재현성이 가장 뛰어나 이를 사용하였지만 QUAL2K에서는 이 식이 선택사항으로 되어 있지 않아 이와 유사한 Churchill 식을 사용하였다. QUAL2E와 QUAL2K 모델에 적용된 매개변수 보정값은 Table 1과 같으며<sup>6,8,12)</sup> QUAL2K와 관련한 자세한 사항은 정성수<sup>3)</sup>에 나와 있다.

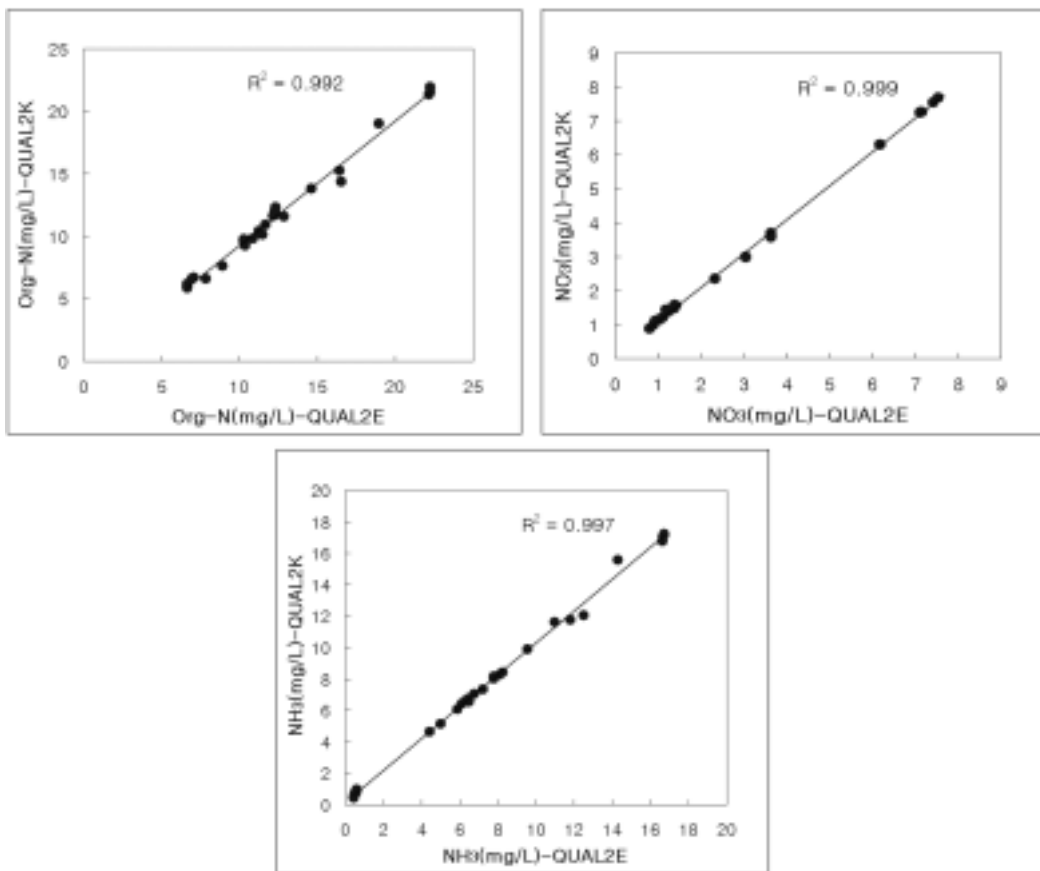
**Table 1.** Values of reaction rates used in QUAL2E and QUAL2K models in Anyang Stream

Q2E parameter	$K_1(d^{-1})$		$K_2(d^{-1})$	$K_3(d^{-1})$	$K_4(g/m^2 \cdot d)$	$\beta_3(d^{-1})$	$\beta_1(d^{-1})$	$\beta_2(d^{-1})$	$\beta_4(d^{-1})$	$\sigma_5(m/d)$
value	0.20		Langbien & Durum	0.05	0.0 (3reaches:5.0)	0.25	0.10	0.25	0.01	0.001
Q2K parameter	$k_{des}(d^{-1})$	$k_{dc}(d^{-1})$	Reaeration Model ( $d^{-1}$ )	$v_{dt}(m/d)$	Prescribed SOD ( $g/m^2 \cdot d$ )	$k_{hn}(d^{-1})$	$k_{na}(d^{-1})$	-	$k_{hp}(d^{-1})$	$v_{op}(m/d)$
value	0.01	0.19	Churchill	0.05	0.0 (3reaches:5.0)	0.25	0.1	-	0.01	0.001

Note; QUAL2E: CBOD Decay( $K_1$ ), Reaeration( $K_2$ ), BOD Settling( $K_3$ ), SOD Uptake( $K_4$ ), Ammonia Decay( $\beta_1$ ), Nitrite Decay( $\beta_2$ ), Org-N Decay( $\beta_3$ ), Org-P Decay( $\beta_4$ ), Org-P settling rate( $\sigma_5$ ); QUAL2K: slow CBOD Oxidation rate( $k_{des}$ ), fast CBOD Oxidation rate( $k_{dc}$ ), Detritus settling velocity( $v_{dt}$ ), Org-N Hydrolysis( $k_{hn}$ ), Nitrification( $k_{na}$ ), Org-P Hydrolysis( $k_{hp}$ ), Org-P settling velocity( $v_{op}$ )



**Fig. 3.** Simulation results of QUAL2E and QUAL2K with the same reaction rates(DO, BOD).



**Fig. 4.** Simulation results of QUAL2E and QUAL2K with the same reaction rates(Org-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N).

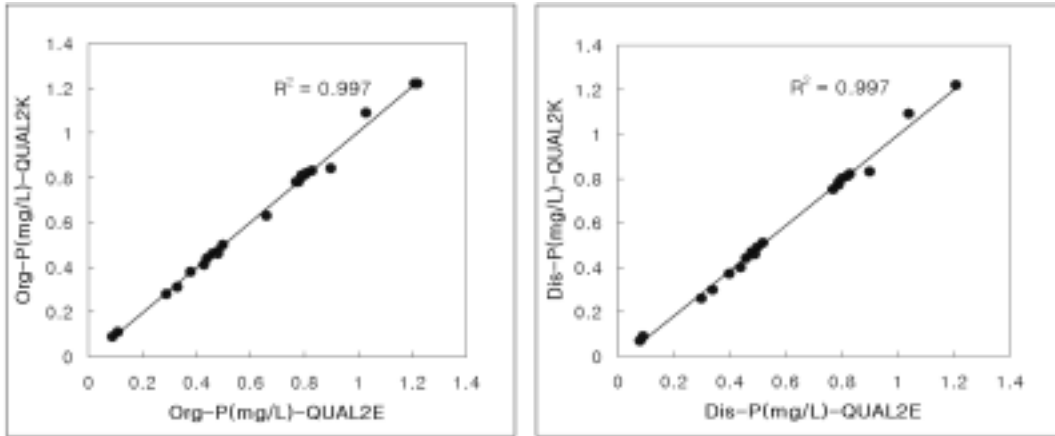


Fig. 5. Simulation results of QUAL2E and QUAL2K with the same reaction rates(Org-P, Dis-P).

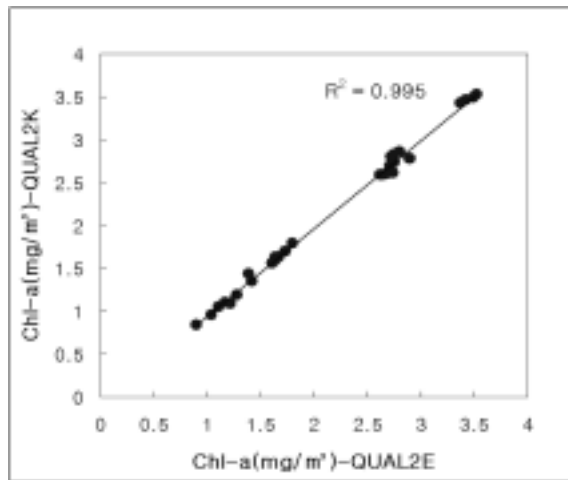


Fig. 6. Simulation results of QUAL2E and QUAL2K with the same reaction rates(Chl-a).

부착조류와 탈질화 과정을 제외한 같은 반응계수를 사용한 QUAL2K와 QUAL2E 모델의 모의결과가 Fig. 3, 4, 5 및 6에 나타나 있다. 그림에 보이듯이 QUAL2E와 QUAL2K

모델의 결과 값은 결정계수가 1에 가까워 거의 일치하는 것으로 나타났다. 예상하듯이 QUAL2E와 QUAL2K는 유사한 반응계수를 사용하면 유사한 결과 값을 얻는 것을 알 수 있다.

Table 2. AUTO Cal. results of QUAL2K

parameter	$k_{hc}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{dcs}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{dc}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{hn}$ ( $d^{-1}$ )	$v_{on}$ (m/d)	$k_{na}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{dn}$ ( $d^{-1}$ )	$v_{di}$ (m/d)	$k_{hp}$ ( $d^{-1}$ )	$v_{op}$ (m/d)
value	1.92	0.3	0.5	0.07	0.05	0.04	2	0.277	0.01	0.001

parameter	$v_{ip}$ (m/d)	$k_{gp}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{rp}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{dp}$ ( $d^{-1}$ )	$v_a$ (m/d)	$C_{gb}$ ( $mgA/m^2/d$ )	$k_{rb}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{db}$ ( $d^{-1}$ )	$k_{dt}$ ( $d^{-1}$ )	$v_{dt}$ (m/d)
value	0.22	3	0.01	0.01	0.05	127.3	0.40	0.49	4.9	0.2

Note: slow CBOD Hydrolysis rate( $k_{hc}$ ), sCBOD Oxidation rate( $k_{dcs}$ ), fCBOD Oxidation rate( $k_{dc}$ ), Organic N Hydrolysis( $k_{hn}$ ), Organic N settling velocity( $v_{on}$ ), Nitrification( $k_{na}$ ), Denitrification( $k_{dn}$ ), Sediment denitrification transfer coefficient( $v_{di}$ ), Organic P Hydrolysis( $k_{hp}$ ), Organic P settling velocity( $v_{op}$ ), Inorganic P settling velocity( $v_{ip}$ ), Phytoplankton Max growth rate( $k_{gp}$ ), Phytoplankton respiration rate( $k_{rp}$ ), Phytoplankton death rate ( $k_{dp}$ ), Phytoplankton settling velocity( $v_a$ ), Bottom algae Max growth rate ( $C_{gb}$ ), Bottom algae respiration rate( $k_{rb}$ ), Bottom algae death rate( $k_{db}$ ), Detritus dissolution rate( $k_{dt}$ ) Detritus settling velocity( $v_{dt}$ )

부착조류와 탈질화 과정을 포함한 QUAL2K의 전체 매개변수는 반응계수를 자동적으로 추정하는 AUTO Cal.을 사용하여 추정하였으며, 결과가 Table 2에 수록되어 있다. AUTO Cal.에서는 모집단 = 100, 진화세대 = 100, 교배확률( $P_c$ )=0.85, 초기돌연변이 확률(initial  $P_m$ )=0.005, 최소 돌연변이 확률(min  $P_m$ ) = 0.0005, 최대 돌연변이 확률(max  $P_m$ ) = 0.25, 적합도 = 0.89921을 취하였으며 자세한 사항은 정성수<sup>3)</sup>에 나와 있다. 이 매개변수를 사용한 QUAL2K 결과와 최적화 기법을 사용한 QUAL2E 결과를 비교하였으며, Fig. 7, 8, 9 및 10에 나타나 있다.

QUAL2K의 DO는 상류에서 전반적으로 낮게 나타났고, 두 모델은 하류에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다(Fig. 7). Org-N, NH<sub>3</sub>-N은 두 모델에서 거의 같은 결과를 보이며 실제 측정치와 적절히 일치하는 것을 볼 수 있다. NO<sub>3</sub>-N은 QUAL2E 보다 QUAL2K에서 하천구간 전반에 걸쳐 약간 낮은 모의결과 값을 나타내며 실측치에

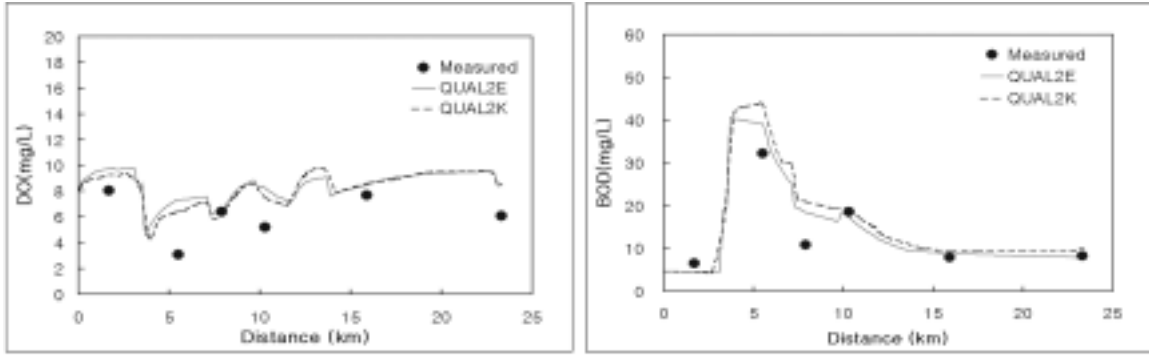


Fig. 7. AUTO Cal. results of QUAL2K and QUAL2E(DO, BOD).

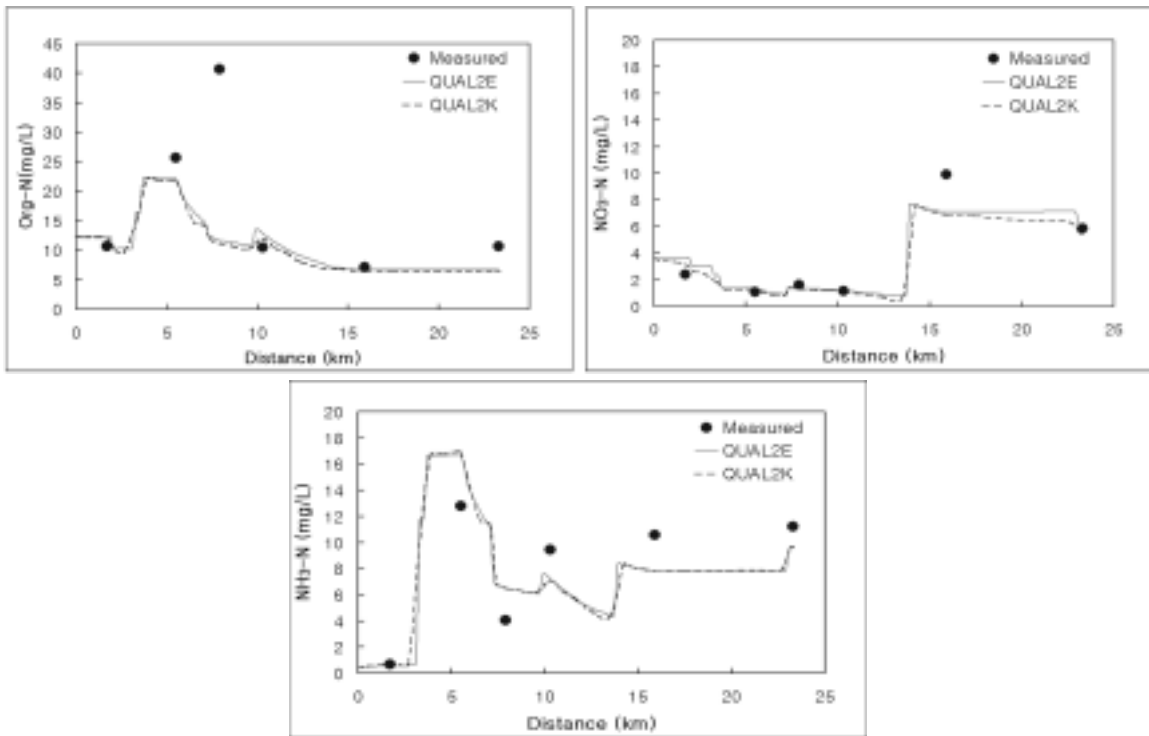


Fig. 8. AUTO Cal. results of QUAL2K and QUAL2E(Org-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N).

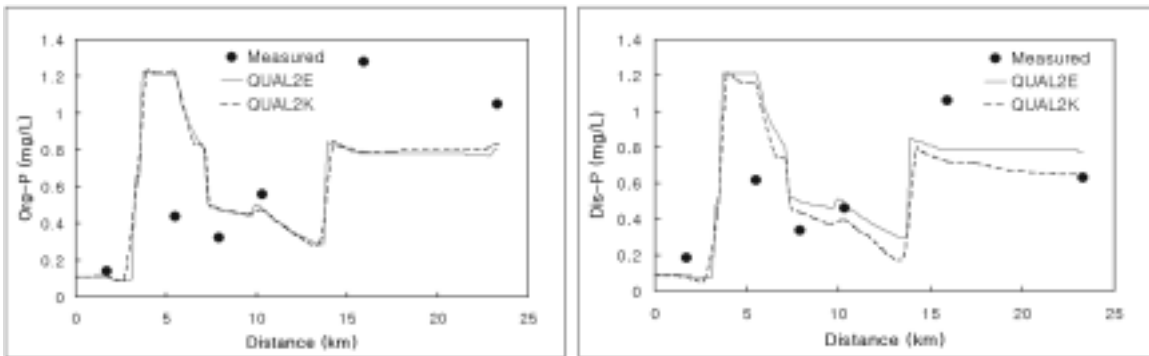


Fig. 9. AUTO Cal. results of QUAL2K and QUAL2E(Org-P, Dis-P).

더 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 8). Org-P는 두 모델 모두 같은 반응계수가 적용되어 비슷한 결과 값을 나타낸 반면, Dis-P는 QUAL2E보다 QUAL2K에서 하류로 갈수록 낮아지면서 실측치에 더 가까워지는 것을 알 수 있다(Fig.

9). Chl-a는 QUAL2E 및 QUAL2K의 호흡율( $k_p$ )이 각각 0.05 d<sup>-1</sup> 및 0.01 d<sup>-1</sup>로 차이가 있지만 비슷한 결과 값을 나타냈다. Bot Chl-a(Bottom Chl-a)는 하류로 갈수록 증가하다가 작아지는 것을 알 수 있다(Fig. 10).

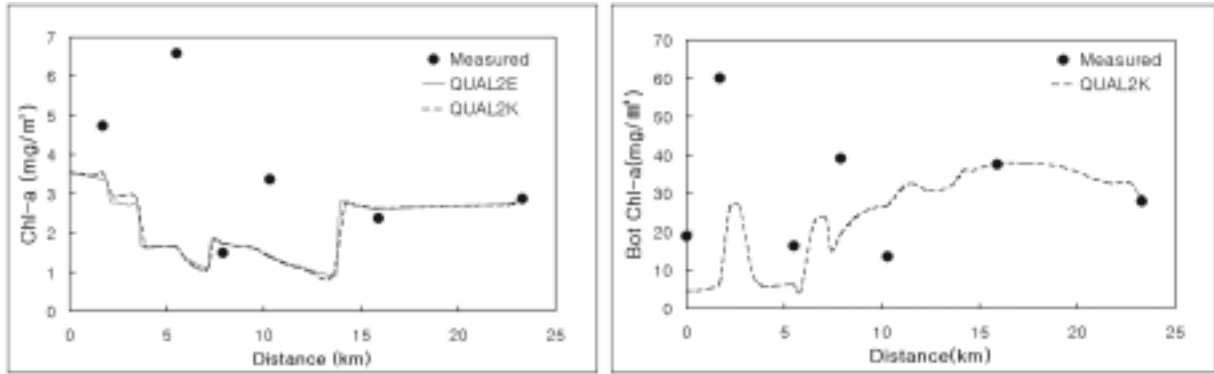


Fig. 10. AUTO Cal. results of QUAL2K and QUAL2E(Chl-a, Bot Chl-a).

3.2. 모의결과 비교 · 평가

매개변수 보정 후 QUAL2K와 QUAL2E 중 어느 모델의 모의결과가 실측 자료와 일치하는지 평가하기 위하여 Ambrose와 Roesch<sup>13)</sup>가 제시한 단순 통계 인자를 이용한 평가기법을 사용하였다. 절대평균오차( $\bar{E}$ , 식 (1))와 상대오차( $RE$ , 식 (2))로 모델의 정확도와 정오차를 판단하였으며, 표준오차( $SE$ , 식 (3))와 분산계수( $CV$ , 식 (4))를 이용하여 모델의 정밀도를 판단하였다. 결과가 Table 3에 나타나 있다.

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \tag{1}$$

$$RE = \frac{\bar{E}}{O} \tag{2}$$

$$SE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$CV = \frac{SE}{O} \tag{4}$$

여기서,  $O_i$  = 실측자료,  $P_i$  = 모델 예측값,  $\bar{O}$  = 실측자료 평균값,  $N$  = 자료 개수이다.

Table 3. Statistical Comparison of QUAL2K and QUAL2E

constituent	QUAL2K					QUAL2E				
	N	Calculated Error				N	Calculated Error			
		$\bar{E}$	RE	SE	CV		$\bar{E}$	RE	SE	CV
DO	6	1.74	0.29	1.32	0.22	6	2.06	0.34	1.43	0.24
BOD	6	4.63	0.33	2.15	0.15	6	3.20	0.23	1.79	0.13
Org-N	6	6.86	0.39	2.62	0.15	6	6.83	0.39	2.61	0.15
NH <sub>3</sub> -N	6	2.22	0.27	1.48	0.18	6	2.19	0.27	1.48	0.18
NO <sub>3</sub> -N	6	0.79	0.21	0.89	0.24	6	0.82	0.22	0.91	0.25
Org-P	6	0.29	0.46	0.54	0.85	6	0.30	0.47	0.55	0.86
Dis-P	6	0.20	0.36	0.44	0.80	6	0.21	0.39	0.46	0.84
Chl-a	6	1.45	0.41	1.20	0.34	6	1.47	0.41	1.21	0.34
Bot Chl-a	6	16.70	0.51	4.01	0.13	-	-	-	-	-

통계분석 결과 BOD를 제외한 모든 항목에서 상대오차가 QUAL2E는 22~47%, QUAL2K는 21~46% 범위로 QUAL2E보다 QUAL2K에서 다소 작거나 같게 나타났다. 또한 분산계수 역시 BOD를 제외한 모든 항목에서 QUAL2E보다 QUAL2K에서 작거나 같게 나타났다. 그러나 두 모델의 오차는 큰 차이가 없으며 오차는 다른 반응계수 보정 방법의 적용에 의해서, 또는 QUAL2K의 추가기능인 부착조류와 탈질화의 고려에 의해서 나타날 수 있어 어느 모델의 모의결과가 좋다고 단정할 수는 없다. 하지만 QUAL2K 모델은 QUAL2E 모델보다 다양한 수질항목과 반응기작을 고려하여 실제 자연현상에 더 가깝게 접근할 수 있고, 큰 차이는 아니지만 전반적으로 QUAL2K 모델 적용이 QUAL2E 모델 적용시보다 상대오차와 분산계수가 더 작게 나타나 QUAL2K의 모의 결과가 QUAL2E 보다 실제현상을 잘 나타낸다고 볼 수 있다.

4. 결론

안양천에 QUAL2E와 QUAL2K 모델을 적용해 보았으며 결과를 분석하였다. 이 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) DO는 QUAL2K가 QUAL2E 모델 결과 값보다 작으면서 실측치에 더 가까운 양상을 나타냈다. 이는 부착조류의 호흡 및 사멸과 함께 sCBOD 산화율( $k_{dcs}$ ) 및 fCBOD 산화율( $k_{dc}$ )이  $0.8 d^{-1}$ 로 기존에 모의했던 BOD 산화율( $K_1$ )  $0.2 d^{-1}$ 보다 커 이에 따르는 산소 소모의 영향에 의한 것으로 판단된다. 반응계수를 변화시키면서 DO가 낮아진 원인을 알아본 결과 부착조류의 사멸로 인해 증가한 SOD의 DO 소모에 기인한 것으로 파악되었다.

2) BOD는 새로 추가된 입자성 유기물과 부착조류의 영향으로 QUAL2K가 QUAL2E보다 결과 값이 높게 나타났고 실측치와도 차이를 보였다. 부착조류와 수질항목에는 서로 다른 시기에 측정된 한계가 존재하지만 부착조류의 영향 정도를 계량화할 수 있었다.

3) Org-N 및 NH<sub>3</sub>-N는 두 모델의 반응계수가 차이가 있음에도 비슷한 결과 값을 나타냈다. 그 이유는 Org-N 및

NH<sub>3</sub>-N이 해당 반응계수에 민감하지 않은 것으로 보인다. NO<sub>3</sub>-N은 QUAL2E보다 QUAL2K에서 하천 전반에 걸쳐 약간 낮게 모의되었는데 이것은 퇴적층과 수체간의 상호작용과 탈질화의 영향으로 판단된다. 반응계수를 변화시키면서 NO<sub>3</sub>-N 감소의 원인을 찾은 결과 탈질화의 영향보다는 퇴적층과 수체의 상호작용에 기인한 것으로 파악되었다.

4) Org-P는 두 모델이 같은 반응계수가 적용되어 비슷한 결과 값을 나타냈다. Dis-P는 QUAL2E보다 QUAL2K에서 하류로 갈수록 낮아지면서 실측치에 더 가까웠다. 이것은 기존 QUAL2E에서 고려하지 않은 무기성 물질의 흡착으로 인한 Dis-P의 침강율( $v_{ip}$ ) 0.22 m/d을 반영한 결과로 보인다.

5) Chl-*a*는 QUAL2E와 QUAL2K의 조류 호흡율( $k_{rp}$ )이 각각 0.05 d<sup>-1</sup>와 0.01 d<sup>-1</sup>로 차이가 있지만 비슷한 결과 값을 나타냈다. 그 이유는 QUAL2K에서는 0.01d<sup>-1</sup>사멸율( $k_{dp}$ )이 추가 고려되었으며 조류의 하천내 체류시간이 짧아 호흡율에 민감하지 않은 결과로 판단된다.

6) 단순 통계 인자를 사용한 두 모델의 결과 분석에서 BOD의 상대오차와 분산계수는 QUAL2E 보다 QUAL2K에서 높게 나타났으나, 나머지 9개 수질항목은 작거나 비슷한 값을 보였다. QUAL2K 모델은 QUAL2E 모델보다 실제 자연현상에 더 가깝게 접근하기 위하여 다양한 수질항목과 반응기작을 고려하였으며, 큰 차이는 아니지만 전반적으로 QUAL2K 모델 적용이 QUAL2E 모델 적용시보다 상대오차와 분산계수가 더 작게 나타나 QUAL2K의 모의 결과가 QUAL2E 보다 실제현상을 잘 구현한다고 판단할 수 있다.

결론적으로 QUAL2K는 QUAL2E를 개선한 모델로 입자성 유기물, 부착조류, 퇴적층과 수체간 상호작용 및 탈질화 반응기작 등을 반영하여 수질 변화 양상을 비교적 실제에 맞게 잘 모의할 수 있는 장점이 있다. 반면에 우리나라 하천에 맞게 보완해야 할 점(미국 시간대만 존재)이 있고, 현재 우리나라에서는 QUAL2K를 완전히 구현할 수 있는 실측된 수질자료가 부족하며, 유전자 알고리즘을 이용한 반응계수 자동보정 기능이 아직 베타테스트 단계로 불완전하고 실행시간이 오래 걸린다는 문제점이 있다.

## 참고 문헌

1. Chapra, S. C., Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill, New York(1997).
2. Martin, J. L. and McCutcheon, S. C., Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling, Lewis Publishers, Florida(1999).
3. 정성수, 안양천에서 QUAL2E와 QUAL2K 모델의 비교연구, 환경대학교, 석사학위 논문(2005).
4. Brown, L. C. and Barnwell Jr., T. O., The Enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual, EPA/600/3-87/007, USEPA (1987).
5. Chapra, S. C. and Pelletier, G. J., Documentation and Users Manual(QUAL2K), USEPA(2003).
6. 정성수, 김경섭, “안양천에서 QUAL2E와 QUAL2K 모델의 비교연구,” 대한환경공학회 추계학술연구발표회(2005).
7. Di Toro, D. M., Paquin, P. R., Subburamu, K., and Gruber, D. A., “Sediment Oxygen Demand Model: Methane and Ammonia Oxidation,” *J. Environ. Eng.*, **116**(5), 945~986(1991).
8. 경기도, 안양천 살리기 종합대책수립(2003).
9. Charbonneau, Paul and Knapp, Barry, A user's guide to PIKAIA 1.0, National Center for Atmospheric Research (1995).
10. 김성태, 채수권, 김건홍, “유전 알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정,” 대한환경공학회지, **19**(4), 507~514(1999).
11. 김용구, 진화알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정에 관한 연구, 동신대학교, 석사학위논문(2002)
12. 김경섭, 윤동구, 이기영 “최소자승법에 의한 QUAL2E 모델 반응계수 보정,” 한국수자원학회지, **37**(9), 719~727(2004).
13. Ambrose Jr., R. B. and Roesch, S. E., “Dynamic Estuary Model Performance,” *J. Environ. Eng.*, **108**(5), 51~71(1982).