

대하천에서의 오염물질 이송·확산예측을 위한 기존 수질예측모형의 비교분석
- 낙동강 본류를 중심으로 -

(A Comparative Study of Mathematical Water Quality Models for the Prediction of
Pollutants Transport and Dispersion in a Large River)

최현일*, 김정환**, 김중훈***, 윤용남***, 김영한****, 안홍천****
CHOI Hyun Il, KIM Jeong Hwan, KIM Joong Hoon, YOON Yong Nam, KIM Young Han, AHN Hong Cheon

1. 서론

자연상태의 하천수질을 모델링기법으로 파악하고 오염의 특성을 규명한다는 것은 어려운 일이며, 더욱이 점원오염상태를 기본으로 이송·확산에 의해 수질을 예측한다는 것은 더욱 어려운 일이다. 하지만, 수자원 부족량은 한정되어 있는 반면 날로 증가하는 용수의 수요와 이에 따른 오염원의 점진적인 증가로 인하여 수질오염이 큰 문제점으로 대두되고 있는 현실점에서 수질오염도의 파악 및 수질모형을 사용한 수질예측은 양질의 수자원 확보 및 수질관리 대책에 필요한 제반 사항을 결정하는데 있어 필수적인 일이다. 본 연구에서는 기존의 수질예측모형들 중 QUAL2E모형, WASP모형 및 수리해석을 위한 HEC-2모형을 이용하여 평상시 갈수기에 있어서 하천에 유입되는 일반 오염물질로 인한 수질변화를 예측하고, 기존 모형의 수리해석부분과 수질예측부분을 분리하여 각각에 대하여 비교검토하며, 각 예측모형의 분석을 통해 기존 각 모형의 장단점을 파악하여 국내상황 특히, 하폭이 넓고 수심이 대체로 얕은 낙동강 유역에 적합한 모형개발에 대한 방향을 제시하고자 한다.

2. 대상수역의 현황

2.1 대상수역의 선정

대상수역은 낙동강 본류를 중심으로 선정하되 수자원공사에서 관리하는 구미, 본포, 원동 취수장을 포함하도록 하고, 조석의 영향이 없으며 유량측정이 가능한 수위표 지점과 정기적으로 수질측정이 실시되는 수질측정망을 포함하고 있는 낙동수위표~월촌수위표 구간(유로연장 약 220Km)과 이 본류 구간내의 지류중 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강 일부(약 62Km)로 결정하였다. 대상수역의 유역도는 그림-1에 나타나 있다.

2.2 유역의 평수기 유출계산

수역내 수위표의 기존 수위-유량관계 곡선식은 홍수기 위주로 작성되어 있어 평상시 갈수기 유량산정에는 무리가 있으므로, 평수기 및 갈수기 자료를 위주로 수위-유량관계 곡선식을 재작성하였다.

* 고려대학교 토목환경공학과 대학원 석사과정

** 고려대학교 토목환경공학과 대학원 박사과정

*** 고려대학교 토목환경공학과 교수

****한국수자원공사 수자원연구소 연구원

1) 수위-유량관계 곡선식으로부터의 유출계산을 위한 수위표의 선정

대상수역내의 수위표중 수위-유량관계 곡선식을 재작성할 수 있는 자료(수위 및 유량)가 없거나 기존의 수위-유량관계 곡선식이 50~70년대의 자료로 작성된 수위표는 제외하고, 본류구간의 일선교, 구미, 왜관, 고령교, 적포교, 진동, 삼랑진 및 지류의 선산(감천), 성서(금호강), 개진(회천), 정암(남강), 밀양2(밀양강) 등 12개 수위표를 유출계산을 위한 수위표로 선정하였다.

2) 유출계산을 위한 수위표의 수위-유량관계 곡선식

표-1의 개발식은 수위표별로 측정된 수위-유량(유속)자료를 평수기 및 갈수기 자료 중심으로 회귀분석과정을 통해 산정된 식으로, 자료가 미비하거나 회귀분석결과 상관관계가 작은 수위표 및 다른 수위표와 비교하여 기존의 수위-유량관계 곡선식이 잘 맞는다고 판단되는 수위표에서는 기존식을 사용하였다.

3. 검토 대상 모형의 고찰

3.1 QUAL2E 모형

QUAL2E모형은 TWDB(Texas Water Development Board)에서 Masch등(1971)이 개발한 QUAL1모형을 기본으로 하여 미국 EPA에서 Roesner등(1981)이 수질항목을 추가시켜 발전시킨 QUAL2모형을 Barnwell등(1985)이 PC에서 사용할 수 있도록 한 것으로, 기본방정식은 1차원 이송·확산 물질이동방정식(1-dimensional advection-dispersion mass transport equation)으로 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x \bar{U} C)}{A_x \partial x} + \frac{dC}{dt} \pm \frac{S}{V} \quad (1)$$

3.2 WASP 모형

미국 EPA의 Great Lake Program의 일부로 Di Toro등에 의해 처음 개발된 후, 수차례의 적용을 통한 결과 분석을 바탕으로 수정과 보완을 거쳐 온 WASP(Water Quality Analysis Program)모형은 크게 유체의 거동을 모의하는 DYNHYD부분과 수질성분의 거동과 상호작용을 모의하는 WASP부분으로 나누어진다. DYNHYD모형은 수질예측모형의 수행을 위한 수리학적 입력자료인 수위, 유속, 유량 등을 제공하는 모형이며 WASP부분은 다시 부영양화, BOD, DO의 변화 등 보편적인 수질오염을 분석하는 EUTRO모형과 유기화합물, 중금속, 퇴적물 등에 의한 독성오염을 분석하는 TOXI모형으로 구성되어 있다. 대부분의 수질모형과 같이 WASP모형의 기본식은 연속성과 물질수지법칙이 이용되는 물질수지 방정식으로 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial(U_x A_x C)}{A_x \partial x} + \frac{\partial(E_x A_x \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} + S_L + S_B + S_K \quad (2)$$

3.3 HEC-2 모형

HEC-2모형은 1970년대 미국 HEC(Hydrologic Engineering Center)에서 개발되어 그 성능과 기능이 최근까지 계속 보강되고 있는 수면곡선 계산을 위한 프로그램으로서, 자연하천이나 인공하천에서의 흐름이 1차원 정상류(steady flow) 상태의 점변류(gradually varied flow)일 경우, 표준축차법(standard step method)에 의한 1차원 에너지 방정식의 해석에 의해 수면곡선을 계산하게 된다. 표준축차법에 의한 1차원 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$W S_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = W S_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3)$$

표-1 수위-유량 관계 곡선식

지점 (code)	수위-유량 관계 곡선식		분류 자료 개수	상관 계수 (R ²)	이용 자료 비고	영점 표고 (E.L., m)	
	$h : m$ $H-h+1 : m$	$Q : m^3/sec$					
일선교 (025420)	$0.58 < h < 0.58$	$Q = 152.96(h-0.0000)^{2.0000}$	8	0.968	89-93	개발식	30.720
	$0.58 < h < 1.1$	$Q = 184.04(h-1.1)^{2.0000}$	14	0.888			
구미 (024850)	$0.1 < h < 0.48$	$Q = 116.547(h-0.0000)^{2.0000}$	5	0.996	88, 89, 90, 93	개발식	26.417
	$0.48 < h < 1.19$	$Q = 145.885(h-0.0000)^{2.0000}$	8	0.941			
폐관 (024700)	$0.7 < h < 8.0$	$Q = 39.1802(h+0.44)^{1.0000}$	-	-	89-93	기준식	18.991
고령교 (023950)	$0.86 < h < 2.15$	$Q = 83.8533(h-0.0000)^{2.0000}$	13	0.964	92, 93	개발식	10.747
적포교 (022750)	$0.45 < h < 9.05$	$Q = 42.7474(h+0.62)^{1.0000}$	-	-	86, 87, 89, 90	기준식	5.383
전동 (020980)	$0.67 < h < 1.8$	$Q = 85.6489(h-0.0000)^{2.0000}$	8	0.987	89, 90, 92, 93	개발식	1.733
상왕전 (020490)	-	$Q = 0.93 * 176.2339(h-0.0000)^{2.0000}$	-	-	87	기준식	-0.557
선산 (023050)	$0.89 < h < 1.15$	$Q = 0.647356(h-0.0000)^{2.0000}$	3	0.998	88	개발식	32.069
	$1.15 < h < 1.7$	$Q = 1.42244(h-0.0000)^{2.0000}$	3	0.999			
성서 (024020)	$0.5 < h < 0.72$	$Q = 136.878(h-0.0000)^{2.0000}$	5	0.977	88, 89	개발식	14.756
	$0.72 < h < 1.05$	$Q = 44.1(h-0.0000)^{2.0000}$	4	0.966			
개전 (023640)	$0.35 < h < 3.1$	$Q = 66.2547(h-0.26)^{1.0000}$	-	-	88	기준식	15.346
경암 (021150)	$0.85 < h < 7.0$	$Q = 72.0365(h-0.74)^{1.0000}$	-	-	86, 88, 89, 90	기준식	5.965
밀양2 (020600)	$0.95 < h < 5.0$	$Q = 18.6292(h-0.48)^{1.0000}$	-	-	88	기준식	0.498

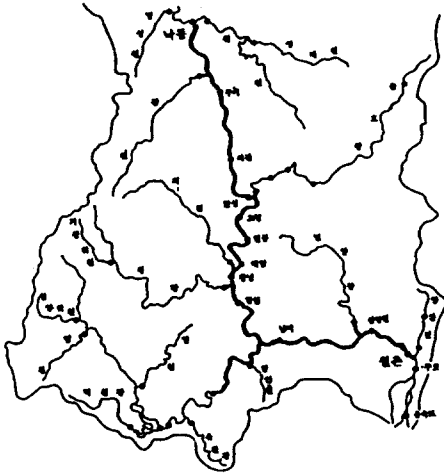


그림-1 대상수역 유역도

4. 모형의 적용 및 결과

4.1 모형의 산정유량 및 예측수질항목의 결정

평상시 갈수기에 해당하는 기간 중 대상수역 부근 18개 우량관측소의 일우량자료를 비교분석하여 선행강우가 없는 기간을 적용대상 날짜로 선정하였다. 선정된 날짜중 1991년 11월의 유량 및 수질자료를 이용하여 모형의 반응계수를 추정(calibration)하였고, 1992년 1월의 유량 및 수질자료를 이용하여 모형의 검증(verification)을 수행하였다. 1991년 11월과 1992년 1월의 주요 지점별 산정평균유량은 표-2와 같으며, 표-3에서 제시된 8개 항목에서 수질측정망의 수질자료중 가용한 자료는 DO, BOD, SS, T-N(총질소), T-P(총인)에 국한되므로, 측정자료가 전무한 조류는 모의대상에서 제외하였으며, 질소와 인 순환요소들은 SS의 농도를 고려하여 총질소와 총인의 농도를 각각 일정율로 분배하였다.

표-2 모의대상 날짜의 산정평균유량

구 간	날 짜	
	1991년 11월 (m ³ /sec)	1992년 1월 (m ³ /sec)
낙동수위표-감천유입전	80	72
감천	5	8
감천유입후-감포강유입전	85	80
감포강	21	20
감포강유입후-폐천유입전	106	100
폐천	0.1	0.1
폐천유입후-황강유입전	106	100
황강	0.1	0.1
황강유입후-남강유입전	106	100
남강	11	19
남강유입후-밀양강유입전	117	119
밀양강	3	6
밀양강유입후-월촌수위표	120	125

표-3 두 모형의 모의대상 수질항목 비교

모 형	모의대상 수질항목
QUAL2E	DO, BOD, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, Organic-N, Organic-P, Dissolved-P, CHL _a -Algae, Coliform, Temperature, 3개의 보온성물질, 1개의 비보온성 물질 등 15개 항목
WASP	DO, BOD, NH ₄ -N, NO ₂ -N, Organic-N, Organic-P, PO ₄ -P(Dissolved-P), Phytoplankton(Algae) 등 8개 항목 및 AS, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn 등 8개의 중금속

4.2 모형의 적용

QUAL2E모형의 적용을 위한 하천구간의 구분은 수리학적 특성이 유사한 구간별로 49개의 reach를 구성하였고, WASP모형의 적용을 위한 하천구간의 구분은 수리해석을 위한 DYNHYD모형에서는 수리학적 특성이 유사한 구간별로 54개의 junction 및 53개의 channel을 구성하였으며, 수질 예측을 위한 EUTRO모형에서는 이에 상응하는 54개의 segment를 구성하였다. 수리부분의 비교 평가를 위한 적용대상인 HEC-2모형에서는 대상수역 하천구간의 주요 교각 및 수위표를 포함한 약 500m간격의 종단측점(구간에 따라 140~700m)을 따라 측량된 491개의 횡단면 입력자료와 구간별 조도계수를 사용하여 수리해석을 하였다.

4.2.1 수리해석부분의 결과

표-4 1991년 11월의 수위표별 산정수심
(단위 : m)

지점	유량 (m ³ /sec)	QUAL2E	WASP	HEC-2*	실측치**
낙동	80	0.683	0.835	2.83	2.95
일선교		0.492	0.481	1.00	1.37
구미	85	0.914	0.835	1.20	3.07
계관		0.834	0.854	2.33	2.44
고령교	106	1.651	1.520	4.90	5.07
현동		0.960	1.040	0.73	-
척도교		1.099	1.020	1.93	1.86
마수원		0.863	0.843	0.54	0.58
거룡강	117	1.286	1.010	-	-
전동		1.346	1.190	10.86	11.18
임해진	117	1.954	1.190	5.33	5.33
수산		1.379	1.070	2.25	2.24
삼당진	120	1.413	1.270	3.67	4.14
월촌		2.085	1.430	8.62	9.36

표-5 1992년 1월의 수위표별 산정수심
(단위 : m)

지점	유량 (m ³ /sec)	QUAL2E	WASP	HEC-2*	실측치**
낙동	72	0.829	0.774	2.77	2.79
일선교		0.462	0.440	0.97	1.53
구미	80	0.881	0.803	1.18	3.06
계관		0.804	0.823	2.33	2.45
고령교	100	1.595	1.480	4.88	5.09
현동		0.927	1.000	0.72	-
척도교		1.061	0.989	1.91	1.65
마수원		0.833	0.813	0.52	0.55
거룡강	119	1.243	0.992	-	-
전동		1.399	1.200	10.84	11.49
임해진	119	1.973	1.200	5.33	5.33
수산		1.393	1.080	2.26	2.24
삼당진	125	1.447	1.300	3.69	4.09
월촌		2.134	1.470	8.63	9.02

* 수위표 단면별로 HEC-2모형으로부터 계산된 평균수리심임.

** 수위표 단면별로 실측수위자료로부터 계산된 평균수리심임.

표-6 1991년 11월의 수위표별 산정유속
(단위 : m/sec)

지점	유량 (m ³ /sec)	QUAL2E	WASP	HEC-2*	실측치**
낙동	80	0.579	0.586	0.13	0.13
일선교		0.398	0.467	0.52	0.36
구미	85	0.590	0.483	0.27	0.09
계관		0.492	0.467	0.12	0.10
고령교	106	0.606	0.569	0.15	0.14
현동		0.433	0.354	0.63	-
척도교		0.474	0.398	0.25	0.26
마수원		0.406	0.431	0.57	0.85
거룡강	117	0.307	0.501	-	-
전동		0.391	0.379	0.07	0.07
임해진	117	0.469	0.379	0.08	0.08
수산		0.373	0.314	0.14	0.14
삼당진	120	0.386	0.298	0.08	0.07
월촌		0.477	0.419	0.06	0.05

표-7 1992년 1월의 수위표별 산정유속
(단위 : m/sec)

지점	유량 (m ³ /sec)	QUAL2E	WASP	HEC-2*	실측치**
낙동	72	0.557	0.562	0.12	0.12
일선교		0.382	0.447	0.49	0.28
구미	80	0.577	0.473	0.26	0.09
계관		0.481	0.456	0.11	0.10
고령교	100	0.593	0.556	0.14	0.13
현동		0.423	0.347	0.62	-
척도교		0.463	0.389	0.24	0.28
마수원		0.397	0.422	0.56	0.76
거룡강	119	0.496	0.483	-	-
전동		0.394	0.381	0.07	0.07
임해진	119	0.471	0.381	0.08	0.08
수산		0.376	0.315	0.14	0.15
삼당진	125	0.392	0.302	0.08	0.07
월촌		0.484	0.426	0.06	0.05

* 수위표 단면별로 계산된 평균유속임.

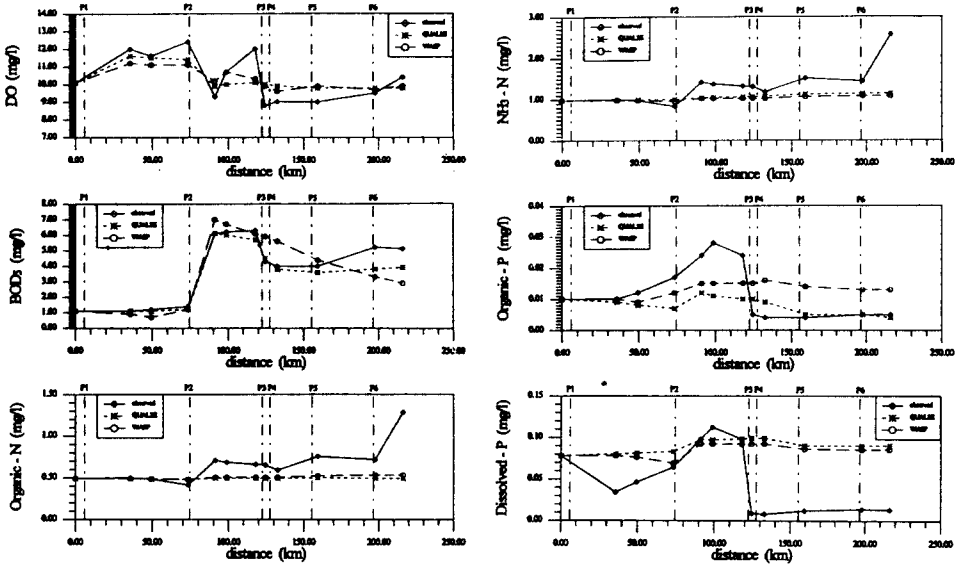
4.2.2 모형의 검증(반응계수의 추정)

표-8 QUAL2E모형의 추정 반응계수값

반응 계수	추정 결과			문헌상의 범위 ¹⁾	문헌상의 범위 ²⁾
	상류부	중류부	하류부		
K_1 (day ⁻¹)	0.16	0.34	0.27	0.02-3.4	0.10-0.40
K_2 (day ⁻¹)	0.68-4.14 (공식으로 산정)			0.0-100	-
K_3 (day ⁻¹)	-0.13	-0.13	-0.28	-0.36-0.36	-
K_4 (mg/m ³ /day)	0.05	0.28	0.18	-	-
B_1 (day ⁻¹)	0.02	0.02	0.02	0.02-0.4	-
σ_1 (mg/m ³ /day)	0.05	0.20	0.20	-	-
α_1 (day ⁻¹)	0.001	0.001	0.001	0.001-0.1	-
β_1 (day ⁻¹)	0.38	0.32	0.38	0.01-0.7	-
σ_2 (mg/m ³ /day)	0.00	0.00	0.00	-	-
α_2 (day ⁻¹)	0.10	0.03	0.03	0.001-0.1	-

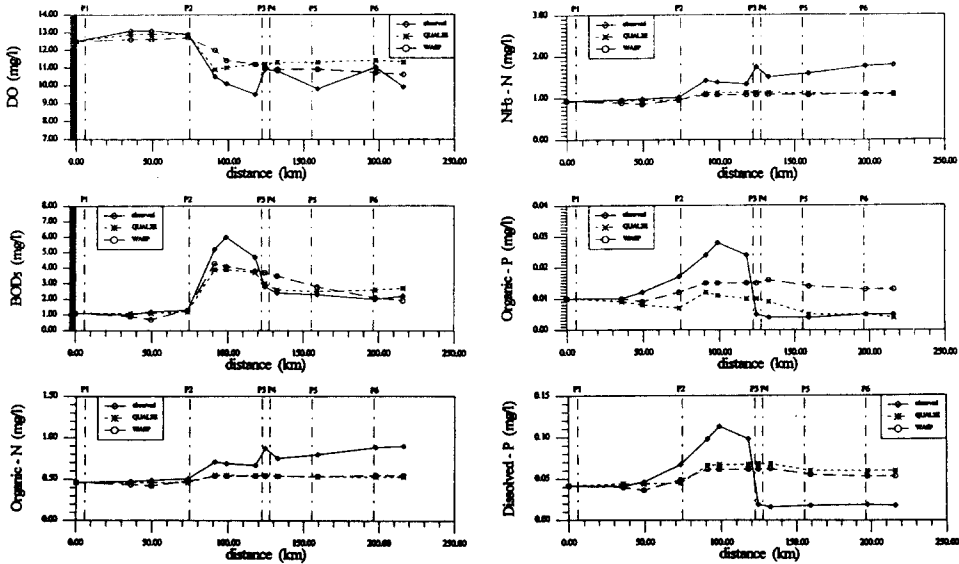
표-9 WASP모형의 추정 반응계수값

반응 계수	추정 결과	문헌상의 범위 ¹⁾
k_d (day ⁻¹)	모형내에서 산정	-
k_0 (day ⁻¹)	0.31	0.1-0.5 (dc3R) 0.5-3.0 (dc3R)
A_{11} (day ⁻¹)	0.13	0.1-0.5
SOD (mg/m ³ /day)	1.0	-
k_{r1} (day ⁻¹)	0.015	-
k_{r2} (day ⁻¹)	0.27	-



P1(감천유입부), P2(금호강유입부), P3(회천유입부), P4(황강유입부), P5(남강유입부), P6(밀양강유입부)
 그림-2 반응계수 추정에 의한 수질측점 위치별 농도변화(1991. 11)

4.2.3 모형의 검증(수질항목의 모의계산)



P1(감천유입부), P2(금호강유입부), P3(회천유입부), P4(황강유입부), P5(남강유입부), P6(밀양강유입부)
 그림-3 모형의 검증결과에 의한 수질측점 위치별 농도변화(1992. 1)

5. 결 론

1. WASP모형은 QUAL2E모형과 같이 1차원 모형이나 정상상태 및 동적상태의 모의도 가능하며, 하천흐름 방향뿐만 아니라 횡방향 및 수심방향으로도 대상구간을 나누어 segment를 구성하여 오염물질 이송·확산을 모의할 수 있으므로, 흐름방향에 비해 폭이 넓고 수심이 깊은 호수, 또는 많은 댐이 있어 하천과 호수가 연속적으로 이어진 구간에 유량과 수질이 짧은 시간 사이에 급변할 경우의 적용에 적절한 모형이다.
2. 3개 모형의 수리해석결과를 비교하면, 실제 하천 단면이 좌표형식으로 입력된 HEC-2모형의 결과가 실측치에 근접하였고, 하천구간별로 제형단면 또는 구형단면으로 형상화된 대표단면이 입력된 QUAL2E모형과 WASP모형에서는 두 모형 사이의 결과는 유사하였으나, 대표단면이 사용된 관계로 직접 비교대상으로는 다소 무리가 있지만, 실측치와는 차이가 있었다.
3. 수질예측부분의 결과를 비교해 보면, 2개의 수질예측모형에서 모두 DO와 BOD의 경우는 모의 결과가 실측치에 비교적 부합하였으나 질소 및 인 순환요소들은 실측치와 차이를 보였으며, 이는 조류를 모의대상에서 제외시킨 결과로 생각된다. 전체적인 수질항목의 모의 결과를 볼 때, 구간별로 반응계수를 변화시킬 수 있는 QUAL2E모형의 결과가 WASP모형의 결과보다 다소 실측치에 근접함을 보였다.

6. 참 고 문 헌

1. 서울대학교 보건대학원 국민보건연구소(1993.11), “수역 수질관리를 위한 수질예측모형과 의사결정 지원시스템 개발에 관한 연구(제1차년도 연구보고서)”, 환경처, 과학 기술처.
2. 전경수, 이길성(1993.7), “QUAL2E 모형에 의한 한강수계 수질모델링”, 한국수문학회, 제35회 수공학 연구 발표회 논문집, pp.125-132.
3. 조홍연, 이길성, 한광석(1993.7), “WASP4모형의 매개변수 추정 및 검증 -팔당호를 중심으로-”, 한국수문학회, 제35회 수공학 연구 발표회 논문집, pp.491-500.
4. Ambrose, R.B., Jr., Wool, T.A., Connolly, J.P., and Schanz R.W.(1988.1), “WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model - Model Theory, Users Manual, and Programmer's Guide”, EPA, EPA/600/3-87/039.
5. Brown, L.C., and Barnwell, T.O., Jr.(1987.5), “The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual”, EPA, EPA/600/3-87/007.
6. Hydrologic Engineering Center(1990.9), “HEC-2 Water Surface Profiles, User's Manual”, U.S. Army Corps of Engineers.