



## SWAT-QUALKO2 연계 모형을 이용한 관개기 순별 관개수질 모의

### Simulation of 10-day Irrigation Water Quality Using SWAT-QUALKO2 Linkage Model

김지혜\* · 정한석\*<sup>†</sup> · 강문성\*\* · 송인홍\*\* · 박승우\*\*

Kim, Ji Hye · Jeong, Han Seok · Kang, Moon Seong · Song, In hong · Park, Seung Woo

#### ABSTRACT

The objectives of this study were to develop a linked watershed-waterbody modeling system and to assess the impacts of indirect wastewater reuse on irrigation water quality. The Osan stream watershed within Gyeonggi-do of South Korea was selected for this study. The linked modeling system was composed of the SWAT (Soil and water assessment tool) and QUALKO2 models. The SWAT model was calibrated and validated using the stream discharge and water quality data from 2010 to 2011. Runoff and non-point source pollutants from each subbasin and stream discharge from 1980 to 2009 were simulated by the SWAT model and applied to the QUALKO2 model. The QUALKO2 model was calibrated and validated under the conditions of low water and normal discharges, respectively. Finally, The 10-day irrigation water quality from April to September was simulated. The statistical measures of coefficient of determination ( $R^2$ ), reliability index (RI), and efficiency index (EI) were used to evaluate the system performance. The  $R^2$ , RI and EI values ranged from 0.5 to 1.0, 1.03 to 1.92, and -35.03 to 0.95, respectively. The 10-day irrigation water quality showed the concentrations of BOD and coliform exceeded the water quality guidelines for wastewater reuse. The linked modeling system can be a useful tool to estimate non-point source pollutant loads in watershed and to control the water quality of effluent from a wastewater treatment plant and irrigation water in the downstream waterbody.

**Keywords:** Indirect wastewater reuse; irrigation water quality; SWAT; QUALKO2

#### 1. 서 론

우리나라는 계절적 또는 지역적으로 수자원의 편중이 심하여 물의 이용에 어려움이 많다. 용수의 수요 역시 계속해서 증가하는 추세로, 2020년에는 생활·공업·농업용수의 수급에 있어 3.8~5.0 억  $m^3$ 의 물이 부족할 것으로 전망된다. (MLTM, 2011). 농업용수는 생활·공업·농업용수 수요량 중 62 %의 큰 비중을 차지하고 있으며 (MLTM, 2011), 가뭄의 발생 빈도 및 심도가 점차 증가하는 추세를 보이는 상황에서 (Lee et al., 2012) 농업용수의 부족으로 인한 문제는 점차 심화될 것으로 예상된다.

하수 재이용은 오염 부하량의 저감을 통한 하천 수질의 개선이 가능하고, 하수처리수의 연중 발생량이 일정하므로 물 수급의 지역적 불균형을 완화할 수 있다는 장점을 지니기 때문에 가장

현실적인 대체 수자원으로 주목되고 있다 (ME, 2009). 2010년을 기준으로 하수처리수의 재이용량은 743 백만  $m^3$ 에 달하며, 이 중 33 백만  $m^3$ 이 농업용수로 재이용되고 있다 (ME, 2011).

하수처리수의 농업용수 재이용은 기존의 수처리 공정에 재처리 공정을 추가하여 하수처리수를 관개용수로 이용하는 직접재이용과, 하천으로 유입된 하수처리장 방류수 또는 미처리 하수를 하류 구간에서 취수하여 이용하는 간접재이용으로 구분된다 (Park and Jang, 2009). 직접재이용의 경우, 관개용수의 수질은 하수처리장 방류수의 수질에만 영향을 받으며, 이에 대한 재처리 시스템과 재이용 수질 기준에 대한 연구는 장기간 진행된 바 있다 (Park, 2004, 2007, 2011). 반면에 간접재이용의 경우, 하수처리장 방류수가 하천에서 희석되기 때문에 하천의 유량이나 관개용수 취수지점의 위치에 따라서도 관개수질이 영향을 받게 된다. 특히, 하수처리장 방류수의 수질 기준은 농업용수 수질 기준 및 하수재이용 수질권고기준 (ME, 2009)을 초과하고 있는 실정이다. 따라서 하수처리수를 농업용수로 간접재이용할 경우, 하수처리수가 관개용수 수질에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 평가할 필요가 있다.

그동안 하수처리수의 재이용에 따른 농업용수 수질에 관한 연구는 지속적으로 이루어졌으나, 대부분의 연구가 시험 논 포장의

\* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학전공  
 \*\* 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원  
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4591  
 Fax: +82-2-873-8725  
 E-mail: seogi84@snu.ac.kr

2012년 10월 18일 투고  
 2012년 10월 31일 심사완료  
 2012년 11월 1일 게재확정

유입수와 배출수를 대상으로 하고 있다. 하수처리수를 농업용수로 재이용하는 논에 대해, Kang et al. (2004)은 수질 및 미생물의 특성을 평가하기 위하여 관개 유입수와 담수 수질을 분석하였고, Seong et al. (2011)은 포장 단위 모형을 이용하여 관개 수질 및 시비량의 변화에 따른 오염 부하량을 모의하였다. McAvoy et al. (2003)이 하천 수질 모형을 이용하여 미처리하수가 유입되는 하천에 대한 위해성 평가를 실시한 바 있으나, 하수처리장 방류수에 따른 취수지점에서의 수질을 분석한 연구 사례는 미비한 실정이다.

하천 수질의 추정에 주로 이용되는 QUAL2E 모형 (Enhanced stream water quality model)은 1985년에 미국 EPA (US Environmental Protection Agency)에서 개발된 1차원 정상 상태의 하천 수질 모형으로, 계산능력이 우수하고 사용이 간편하여 전 세계적으로 널리 적용되고 있다. 그러나 QUAL2E 모형은 조류의 생산 및 사멸에 따른 유기물의 증가를 고려하지 못하여 정체수역이 많은 우리나라 하천의 특성을 제대로 반영하지 못한다 (NIER, 2005). 국립환경과학원에서는 이러한 QUAL2E 모형의 한계점을 보완하여 QUALKO2 모형을 개발하였다 (NIER, 2007). QUALKO2 모형은 Yu et al. (2011)의 연구에서 밀양강 유역에 적용되었으며, 안성천과 임진강의 물환경관리계획 (HRBEO, 2009a, 2009b)에도 적용된 바 있다.

QUAL2E 모형은 주로 정상 상태에서 모의되기 때문에 비점 오염원이나 수문 사상과 같은 동적 요소를 반영하기 어려운 한계가 있으며 (Migliaccio et al., 2007), QUALKO2 모형 역시 동일한 한계를 지닌다. 이를 극복하고자 정상 상태의 하천 수질 모형과 유역 모형을 연계하는 시도가 이루어졌다. Migliaccio et al. (2007)과 Choi et al. (2010)이 각각 QUAL2E 모형과 QUALKO 모형을 복합토지이용에서의 비점오염 부하량 모의에 적합한 SWAT (Soil and water assessment tool)모형과 연계하여 하천 수질을 예측하는 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 소유역별 하천 유입 유량 및 비점오염 부하량을 해석하고, QUALKO2 모형과 연계하여 하수처리수가 유입되는 하천에서의 구간별 수질을 모의함으로써, 하수처리수의 간접재이용에 따른 관개수질을 분석하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상유역

하수처리수의 간접재이용에 따른 농업용수의 수질 영향을 모의하기 위하여 안성천 수계의 제 2 지류인 오산천을 대상유역으로 선정하였다. 오산천은 하수처리수의 농업용수 간접재이용이

Table 1 Characteristics of the study watershed

Characteristic	Unit	Value
Area	km <sup>2</sup>	92.03
Width	km	4.94
Elevation	EL. m	68.37
Slope	%	10.21
Stream length	km	16.49
Stream density	km/km <sup>2</sup>	0.52

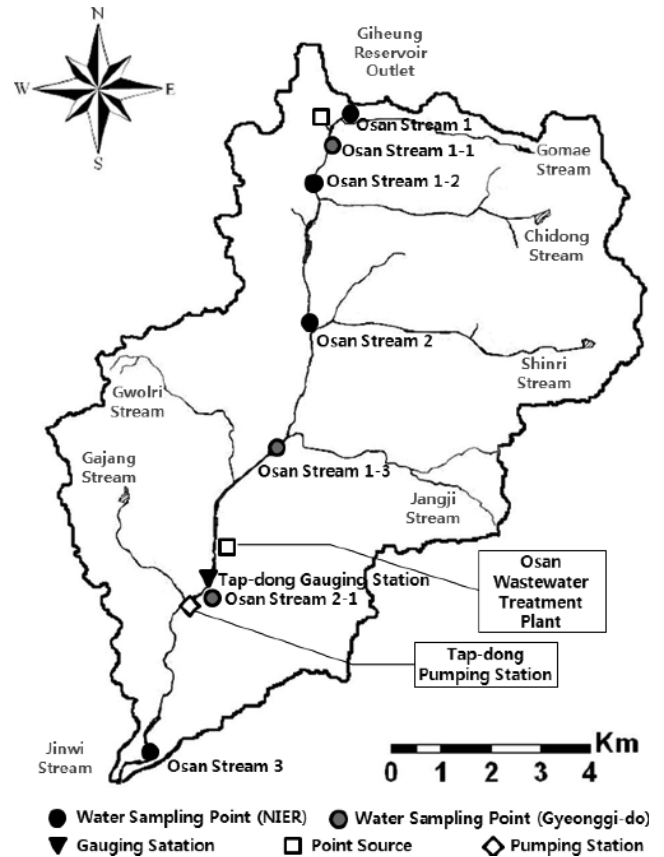


Fig. 1 Maps of hydrology and water quality monitoring network of the study watershed

이루어지는 곳으로, 오산시 환경수도사업소의 방류구로부터 약 1 km 하류의 탐동 양수장에서 관개용수가 취수되어 논으로 공급되고 있다.

본 연구에서는 기흥저수지 방류구로부터 진위천 합류지점에 이르는 16.49 km 구간에 대해 수질을 모의하였다. 대상 유역의 현황 및 특성은 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

### 2. SWAT-QUALKO2 연계 시스템 구축

Fig. 2는 SWAT-QUALKO2 연계 시스템의 모식도로서, 각 모

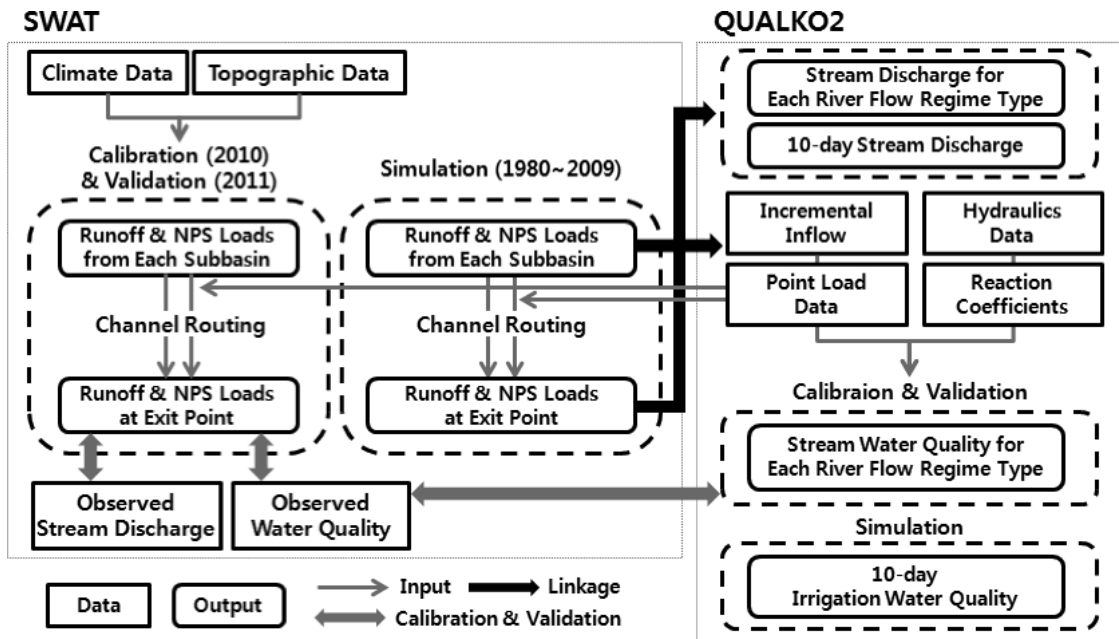


Fig. 2 Flow chart of SWAT-QUALKO2 model linkage

형의 검·보정 및 모의 과정과 두 모형 간의 연계 과정을 보여 주고 있다. SWAT 모형의 보정과 검정은 각각 2010년, 2011년의 유량 및 수질 자료를 통해 이루어졌다. 검·보정을 완료한 후 1980년부터 2009년까지 과거 30년에 대해 유량과 수질을 모의하였다. QUALKO2 모형의 경우, 2011년의 일별 유량 중 저수량 및 평수량 조건에 해당하는 날에 대해 각각 보정과 검정을 한 후, 4월 하순부터 9월 상순에 이르는 논 관개 기간에 대해 순별로 관개수질을 모의하였다.

모형의 연계는 크게 두 가지 부분으로 구성하였다 (Fig. 2). 첫째, QUALKO2 모형에서는 모든 입력 자료에 대해서 하나의 유량과 수질 값만 입력되기 때문에, 일정한 유량을 기준으로 하여 모의하였다. SWAT 모형을 이용하여 과거 30년 (1980년~2009년)의 하천 유량을 모의한 후, 이를 통해 저수량, 평수량, 순별 평균 유량 등을 산정하여 QUALKO2 모형의 기준 유량으로 사용하였다. 둘째, QUALKO2 모형의 입력 자료 중에서 증분 유입은 점오염원이나 지류 하천에서 고려되지 못한 추가적인 유입으로, 비점오염원 성격의 유입을 의미한다. QUALKO2 모형으로는 비점오염원을 정량화할 수 없기 때문에 SWAT 모형으로 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량 자료를 모의하여 QUALKO2 모형의 대구간별 증분 유입 자료로 입력하였다.

### 3. SWAT 모형의 자료 구축

#### 가. 기상자료

기상자료는 유역으로부터 약 10 km 떨어진 곳에 위치한 수원

기상관측소의 자료를 사용하였다. 1980년부터 2011년까지 일별 강우량, 최고기온, 최저기온, 일사량, 평균 풍속, 평균 상대습도 자료를 수집하였다.

#### 나. 지형자료

지형 자료는 수치표고모형 (digital elevation map, DEM), 토양도, 토지이용도 등을 사용하였다. DEM 자료는 국토해양부의 NGIS 1:5,000 수치지도로부터 등고선을 분리하여 30 m × 30 m 해상도로 구축하였다. 토양도는 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 사용하였고, 토지이용도는 환경부의 토지이용 중분류도를 사용하였다. Fig. 3은 대상 유역에 대해 구축한 DEM, 토양도, 토지이용도를 보여주고 있다.

#### 다. 수위 자료

수위 자료는 오산시 환경수도사업소의 방류구로부터 약 0.85 km 하류에 위치하는 탐동수위관측소의 자료를 이용하였다. 탐동수위관측소는 2009년 10월에 설치되었으며 국토해양부 한강홍수통제소에서 운영하고 있다. 유량 자료는 2010년부터 2011년까지 수위 자료에 각 년도 별로 제시된 수위-유량 관계식을 적용하여 산정하였다. 2010년의 유량 자료는 모형의 보정에, 2011년의 자료는 모형의 검정에 사용하였다.

#### 라. 수질 자료

모의 구간 내의 수질 관측 지점은 2012년 현재 총 7 개가 있다 (Fig. 1). 오산천 1, 오산천 1-2, 오산천 2, 오산천 3 등 4

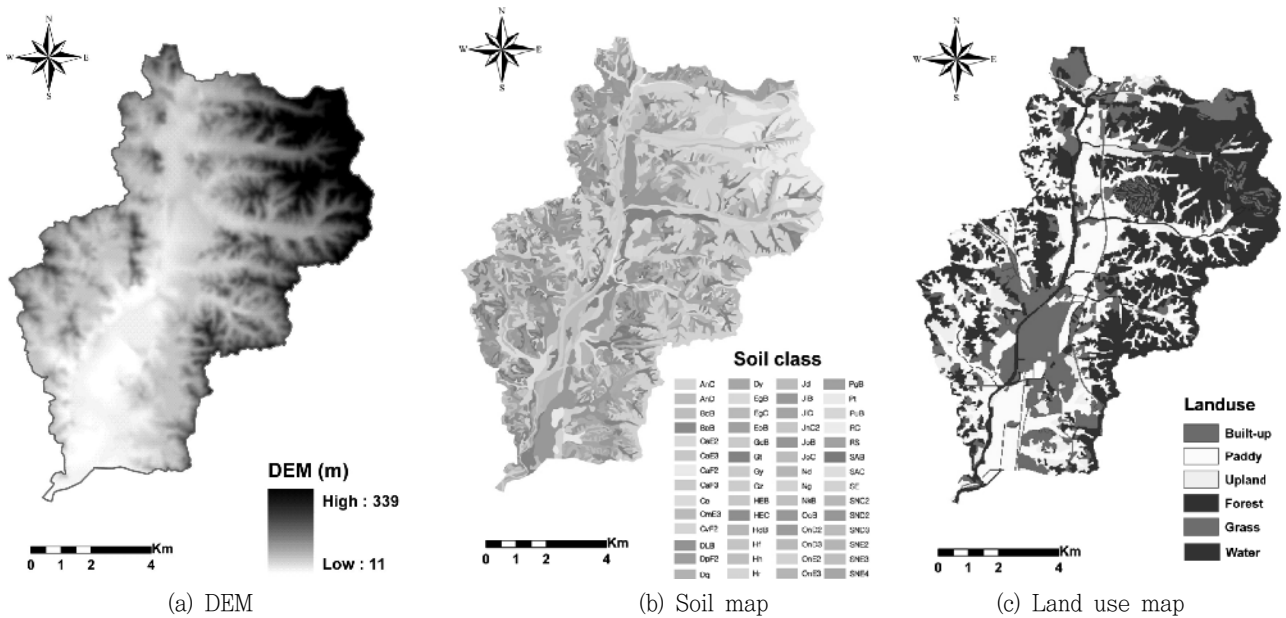


Fig. 3 DEM, soil and land use maps of the study watershed

개 지점은 국립환경과학원의 관측 지점이며, 오산천 1-1, 오산천 1-3, 오산천 2-1 등 3 개 지점은 경기도의 관측 지점으로 최근에 새로 추가되어 자료의 수가 거의 없다. SWAT 모형에는 오산천 2 지점의 2010년부터 2011년까지 수질 자료를 사용하였다. 2010년의 자료는 보정에, 2011년의 자료는 검정에 사용하였다.

#### 4. QUALKO2 모형의 자료 구축

##### 가. 하천 구간의 분할

QUALKO2 모형에서 하천은 반응계수와 수리학적 특성이 일정한 대구간 (reach)과 모형의 계산 단위인 소구간 (element)으로 구분된다. 본 연구에서는 기흥저수지 방류구에서 진위천 합류점에 이르는 오산천의 16.49 km 구간을 5 개 대구간과 83 개 소구간으로 구분하였다. 대구간은 오산천수질개선종합대책 (Gyeonggi Institute of Health & Environment, 2008), 안성천 하천정비기본계획 (MOCT, 2002), 안성천 중권역 물환경관리계획 (HRBEO, 2009a) 등의 보고서를 참고하여 구분하였다. 소구간은 하천 구간에 따른 수질 변화를 상세하게 파악하기 위하여 200 m 간격으로 분할하였다.

##### 나. 증분유입

SWAT 모형으로 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량을 모의한 뒤, 이를 하천의 5개 대구간에 대한 증분유입 자료로 입력하였다. 모형의 검·보정을 위해 SWAT 모형의 2011년 유량 모의 결과 중에서 취수지점을 기준으로 저수량 및 평수량에 해당하는

날을 오차 범위 1 % 내에서 선정한 후, 해당일의 유출량 및 비점오염 부하량 값을 평균하여 증분유입 자료를 구축하였다. 순별 관개수질의 모의에는 1980년부터 2009년까지 30년 동안의 유출량 및 비점오염 부하량 자료를 4월 하순부터 9월 상순까지 총 14 개 순별로 평균하여 자료를 구축하였다 (Fig. 4).

##### 다. 점오염원

점오염원은 오산시 환경수도사업소의 일별 방류 유량 및 수질 자료를 이용하였다. 검·보정 시에는 증분유입과 동일하게 2011년 중 저수량 및 평수량 해당하는 날의 자료를 평균하였다. 순별 모의 시에는 방류수의 자료 기간이 30년 (1980년~2009년)에 미치지 못하며, 하수처리 용량이 2009년 말에 현재 수준에 이르렀으므로 2010년~2011년 자료를 14 개 순별로 평균하여 자료를 구축하였다 (Fig. 5).

##### 라. 수질 자료

수질 자료는 오산천 1, 오산천 1-2, 오산천 2, 오산천 3 등 4 개 지점의 2011년도 자료를 사용하였다. 수질 자료는 한 달에 한 번씩 측정되므로 저수량 및 평수량 조건에 대한 값을 결정하는 데에 어려움이 있다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 유량 모의 결과를 통해 2011년의 수질 측정일에 해당하는 유량을 확인하고, 그 중 저수량 및 평수량 조건으로 분류할 수 있는 날을 오차 범위 3 % 내에서 선정하였다. 선정한 날의 수질 자료를 각각 평균하여 저수량 및 평수량 조건에서의 수질 자료를 구축하였다 (Table 2). 보정 시에는 4 개 수질 측정 모두 저수량 조건에 해

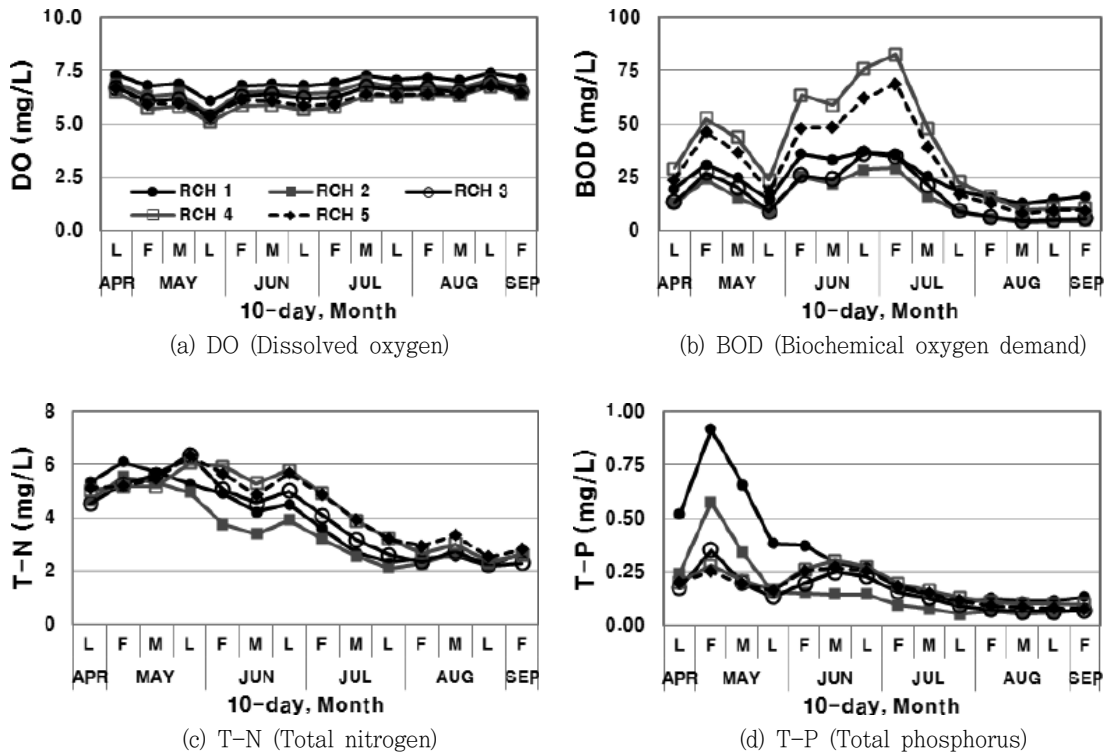


Fig. 4 10-day water quality of incremental inflow

\*RCH denotes reach. F, M, and L denote first, mid, and last ten days, respectively.

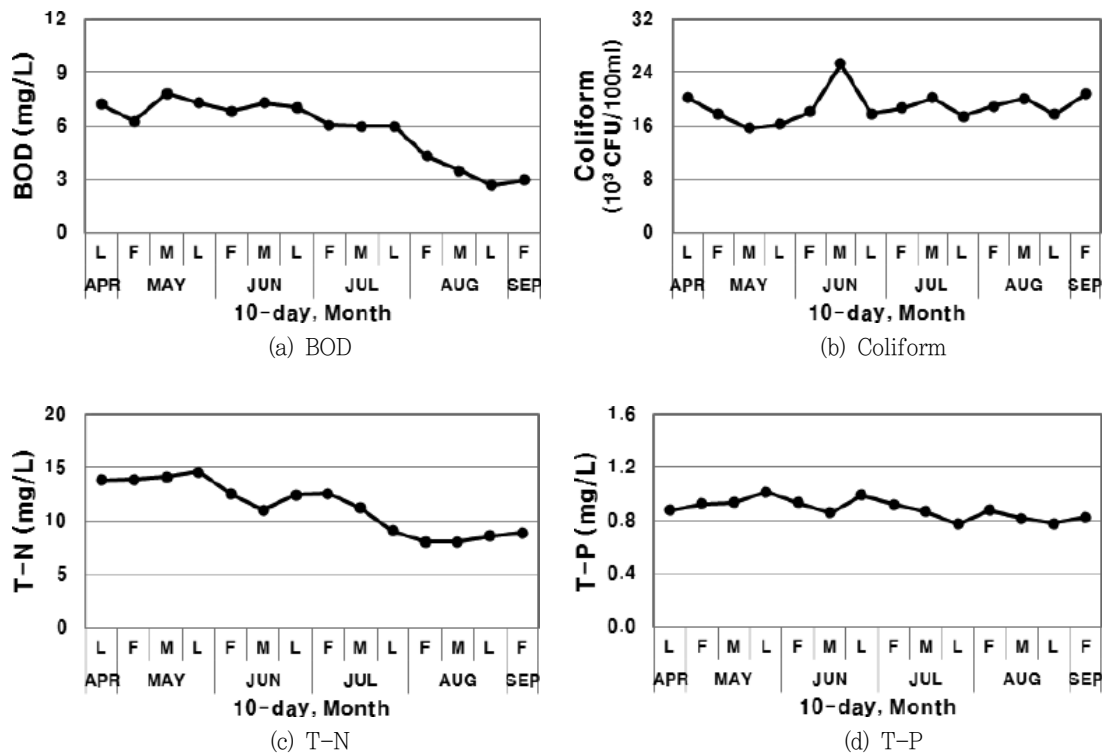


Fig. 5 10-day point source pollutant load

당하는 자료가 있었으나, 검정 시에는 오산천 1 지점에 평수량 조건의 자료가 없는 관계로 3 개의 점만을 이용하였다.

### 5. 모형의 검·보정

SWAT 모형의 검·보정에는 2010년과 2011년의 유량 및 수질 자료를 이용하였고, QUALKO2 모형에는 2011년 중 저수량

**Table 2 Average water quality during the project period**

Water sampling point		DO	BOD	Coliform	T-N	T-P
		mg/L	mg/L	CFU/100ml	mg/L	mg/L
Calibration (Low water discharge)	1	10.60	3.60	297	4.13	0.08
	1-2	11.20	3.42	6,825	6.94	0.19
	2	10.90	3.17	6,413	5.78	0.14
	3	9.57	8.22	43,207	8.84	0.57
Validation (Normal discharge)	1-2	10.67	4.10	17,333	5.42	0.14
	2	10.77	3.77	12,900	4.59	0.11
	3	11.13	7.20	8,067	8.19	0.50

**Table 3 Acceptable ranges and input values of the SWAT model parameters**

Parameter	Unit	Range	Input value
CN2	-	0~98	-
SOL_ORGN	mg(N)/kg(soil)	-	1250
SOL_NO3	mg(P)/kg(soil)	-	70
ERORGN	-	0~5	0
NPERCO		0.01~1.0	0.2
SOL_ORGP	mg(N)/kg(soil)	-	130
SOL_LABP	mg(P)/kg(soil)	-	10
ERORGP	-	0~5	0
PPERCO	10m <sup>3</sup> /mg	10~17.5	10
PHOSKD	m <sup>3</sup> /mg	100~200	175

**Table 4 Acceptable ranges and input values of the QUALKO2 model parameters**

Parameter	Unit	Range	Input value	
K <sub>1</sub>	Carbonaceous deoxygeneration rate constant	1/day	0.02~3.40	0.02~0.20
K <sub>3</sub>	Rate of loss of BOD due to settling	1/day	-0.36~0.36	-0.25~0.00
K <sub>5</sub>	Coliform die-off rate	1/day	0.05~4.0	0.05
β <sub>1</sub>	Rate constant for the biological oxidation of NH <sub>3</sub> to NO <sub>2</sub>	1/day	0.1~1.0	0.1
β <sub>2</sub>	Rate constant for the biological oxidation of NO <sub>2</sub> to NO <sub>3</sub>	1/day	0.2~2.0	1.0
β <sub>3</sub>	Rate constant for the hydrolysis of org-N of NH <sub>3</sub>	1/day	0.02~0.40	0.05
β <sub>4</sub>	Rate constant for the decay of org-P to dis-P	1/day	0.01~0.70	0.25
σ <sub>2</sub>	Benthos source rate for dis-P	mg(P)/ft <sup>2</sup> day	variable	0
σ <sub>3</sub>	Benthos source rate for NH <sub>3</sub>	mg(O)/ft <sup>2</sup> day	variable	0
σ <sub>4</sub>	Org-N settling rate	1/day	0.001~0.100	0.010
σ <sub>5</sub>	Org-P settling rate	1/day	0.001~0.100	0.010

및 평수량 조건에 해당하는 날의 수질 자료를 이용하였다.

검·보정은 매개변수를 변화시켜가면서 도표의 일치정도나 목적함수의 값이 만족할 만한 결과를 얻을 때까지 모형을 반복 실행하는 단순시행착오법 (Kang, 2002)으로 수행하였다. 각 모형의 주요 매개변수의 보정 범위와 최종 입력 값을 Table 3과 4에 나타내었다.

모형의 검·보정을 평가하는 통계적 변량으로는 결정계수 (coefficient of determination, R<sup>2</sup>), 신뢰성 지수 (reliability index, RI), 효율지수 (efficiency index, EI)를 이용하였다. R<sup>2</sup>는 모형의 추정 오차를 평가하는 지수로, 0.0~1.0의 범위를 가지며 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한다 (Kang, 2002). RI는 모형의 신뢰성을 평가하는 지수로, 1.0에 가까울수록 모의치와 실측치가 일치함을 나타낸다 (Leggett and Williams, 1981). EI는 모형의 효율을 평가하는 지수로 모의치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 0.0과 1.0 사이이면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있고, 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다 (Nash and Sutcliffe, 1970).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. SWAT 모형의 검·보정

Table 5는 SWAT 모형의 검·보정에 대한 통계적인 변량을 나타낸다. T-N의 경우, R<sup>2</sup> 값이 0.60보다 낮게 산정되어 모의치와 실측치의 상관관계가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. T-N을 제외한 다른 항목의 R<sup>2</sup> 값은 0.63~0.98의 범위를 보였으며, 전체적으로 RI 값은 1.03~1.23의 범위를, EI 값은 0.40~0.92의 범위를 보였다.

2. 기준 유량의 산정

SWAT 모형으로 1980년부터 2009년까지 취수지점의 유량을 모의한 후 유황을 분석하였다. 각 유황조건별 유량을 산정한 결

Table 5 Performance parameters of the SWAT model calibration and validation for runoff, sediment yield, T-N, and T-P

Statistical measure		Runoff	Sediment Yield	T-N	T-P
Calibration	R <sup>2</sup>	0.74	0.96	0.51	0.68
	RI	1.05	1.19	1.05	1.04
	EI	0.69	0.92	0.40	0.62
Validation	R <sup>2</sup>	0.63	0.98	0.58	0.71
	RI	1.05	1.23	1.05	1.03
	EI	0.54	0.87	0.45	0.55

Table 6 Stream discharges for each river flow regime type

River flow regime type	Drought discharge	Low water discharge	Normal discharge	Ninety-five day discharge
Duration (days)	355	275	185	95
Stream discharge (m <sup>3</sup> /s)	1.848	1.986	2.213	2.828

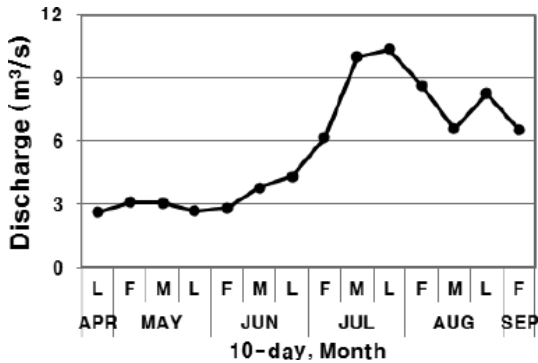


Fig. 6 10-day average stream discharge

과, 취수지점에서의 저수량은 1.986 m<sup>3</sup>/s, 평수량은 2.213 m<sup>3</sup>/s으로 나타났다 (Table 6).

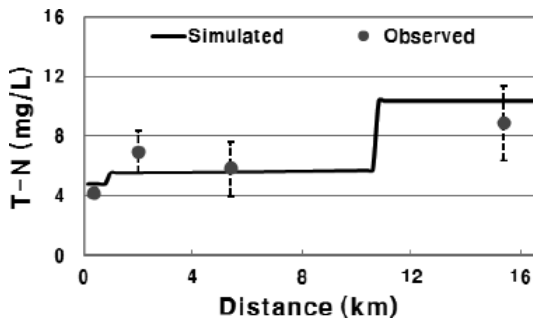
순별 평균 유량은 1980년부터 2009년까지 취수지점에서의 유량을 순별로 평균하여 산정하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 7월~9월의 유량이 4월~6월 유량에 비해 2~3 배 가량 크며 7월 하순의 유량이 가장 큰 값을 나타낸다.

3. QUALKO2 모형의 검·보정

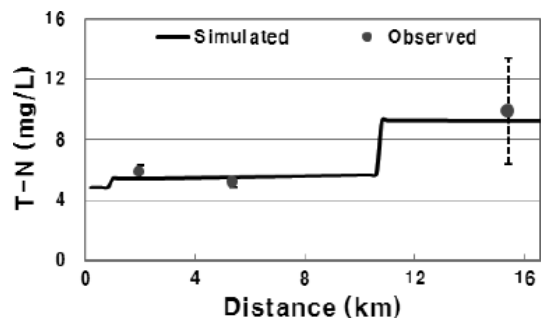
QUALKO2 모형의 검·보정은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 3~4 개 지점의 수질 자료를 이용하여 단순시행착오법으로 이루어졌으며, Table 7은 이에 대한 통계적인 변량을 보여주고 있다. T-N, T-P의 경우 R<sup>2</sup>는 0.77~0.99, RI는 1.03~1.16, EI는 0.60~0.95의 범위로 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 반면에 DO의 검·보정 및 BOD, 대장균의 검정에 대한 EI 값은 -35.03~-1.25 범위의 음의 값으로 나타나 모의치가 실측치를 잘 반영하지 못하는 것으로 분석되었다. 특히, DO와 BOD의 검정 결과는 R<sup>2</sup>가 0.84~1.00, RI가 1.13~1.20의 범위로 모의가 잘 이루어진 것으로 나타나 EI에 의한 분석과는 상반된 결과를 나타낸다. 이는 제한된 수질자료를 이용하여 도출된 결과로 사료된다.

Table 7 Performance parameters of the QUALKO2 model calibration and validation for DO, BOD, T-N, T-P, and coliform

Statistical measure		DO	BOD	T-N	T-P	Coliform
Calibration	R <sup>2</sup>	0.50	0.99	0.77	0.97	0.97
	RI	1.07	1.10	1.07	1.14	1.19
	EI	-4.84	0.60	0.60	0.88	0.90
Validation	R <sup>2</sup>	0.84	1.00	0.98	0.99	0.73
	RI	1.13	1.20	1.03	1.16	1.92
	EI	-35.03	-1.25	0.95	0.92	-3.39



(a) Calibration



(b) Validation

Fig. 7 Comparison of observed and simulated T-N for the QUALKO2 model calibration (a) and validation (b)

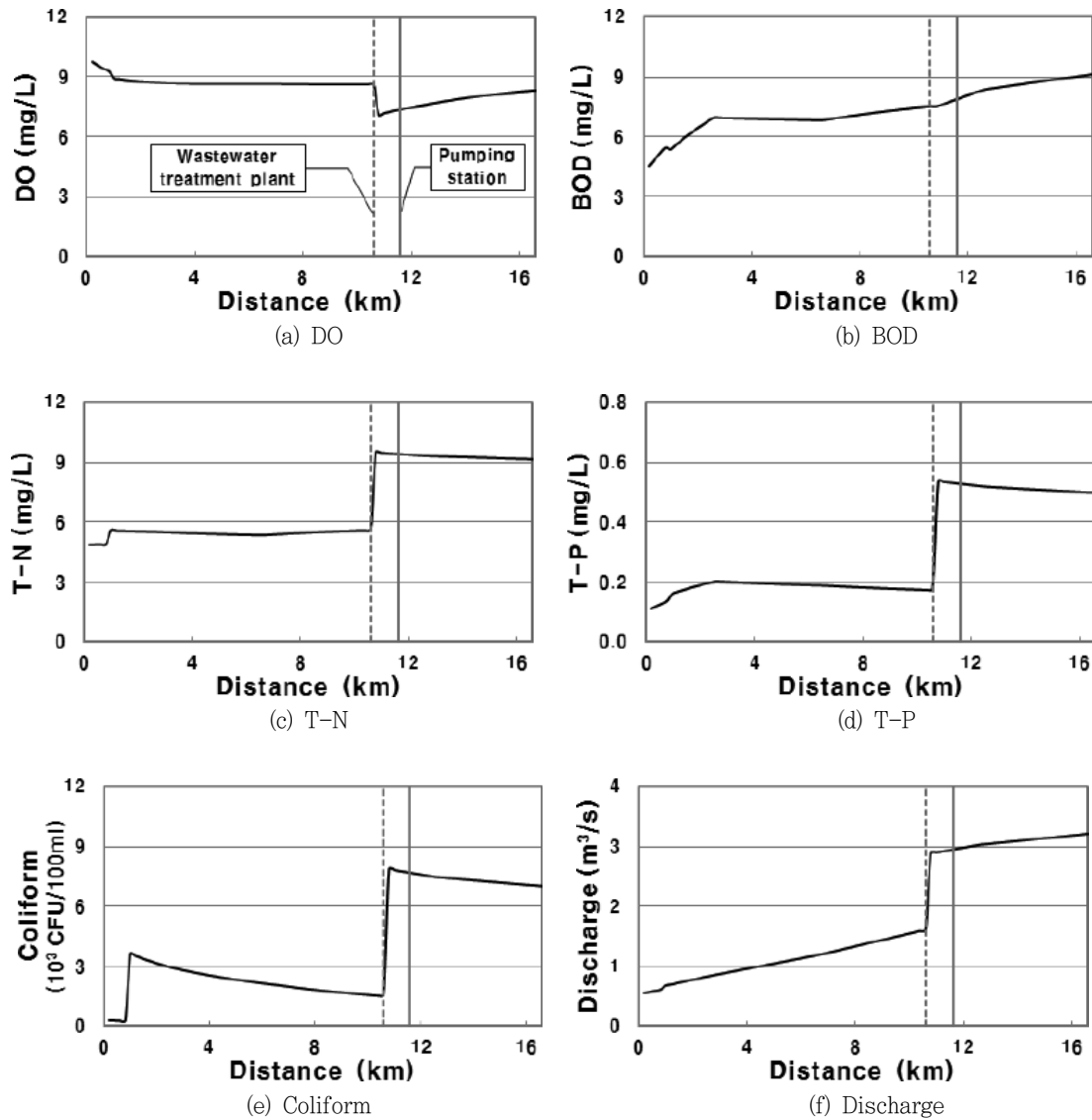


Fig. 8 Changes in pollutants load on the downstream waterbody during the last ten days of May

#### 4. 순별 관개수질의 모의

Fig. 8은 5월 하순의 하천 구간별 수질을 모의한 결과를 나타낸다. 거리가 약 11 km가 되는 지점에서 하수처리장 방류수로 인해 T-N, T-P, 대장균 등의 농도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 하수처리장 방류구로부터 최하류부까지 농도의 감소 폭이 미미한 것으로 보아, 관개용수 취수지점의 수질이 하수처리장 방류 수질에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Fig. 9는 관개용수 취수지점의 수질을 순별로 도시한 것이다. DO는 거의 변화를 보이지 않으나, BOD, T-N, T-P, 대장균의 농도는 순에 따라 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 전반적으로 4월~7월 상순에 BOD, T-N, T-P, 대장균의 농도가 높고 8

월로 접어들면서 감소하고 있으며, 이는 7월~9월에 하천 유량이 크게 증가하면서 농도가 감소하였기 때문으로 추정된다.

농업용수의 수질 기준은 하천 및 호소에 대한 4등급 수질 기준을 따르며 (Enforcement decree of the framework act on environmental policy, 2012), 이를 Fig. 9의 관개수질 모의 결과와 비교하였다. DO는 항상 2 mg/L 이상을 유지하므로 하천에 대한 4등급 기준을 만족하는 반면, BOD의 경우 4월~7월의 기간에 8 mg/L를 초과하여 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. T-N과 T-P의 경우 하천에 대한 기준이 없는 관계로 호소의 4등급 기준 또는 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질 권고기준 (ME, 2009)과 비교하였다. 그 결과, 관개기간 내내 호



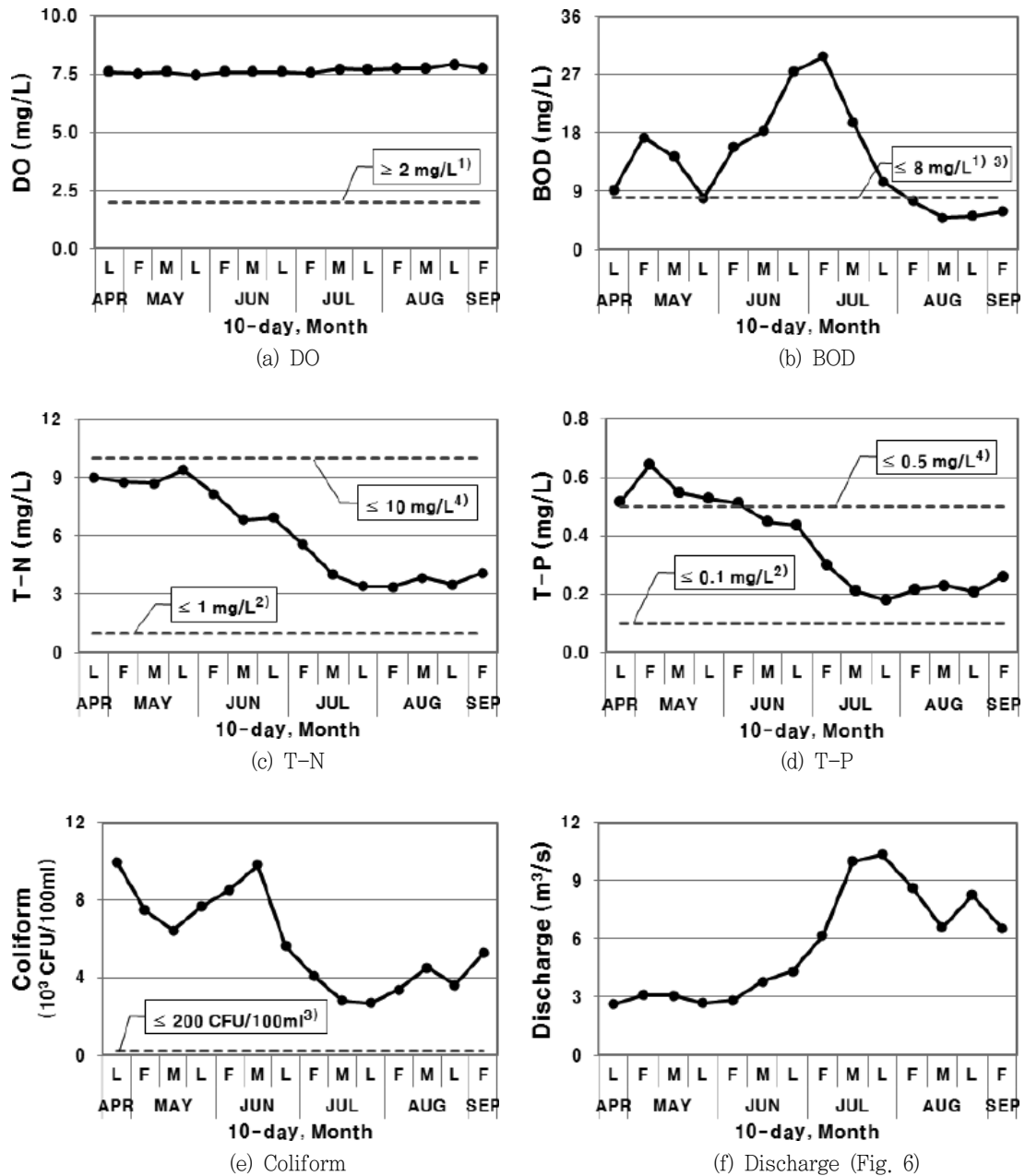


Fig. 9 Comparison of irrigation and wastewater reuse guidelines with predicted 10-day irrigation water quality

- 1) and 2) denote stream and pond water quality standards for grade IV, respectively (Enforcement decree of the framework act on environmental policy, 2012).  
 3) and 4) denote water quality guidelines for wastewater reuse for agricultural water (indirectly edible) and human-friendly water, respectively (ME, 2009).

소수의 기준은 만족하지 못하지만, 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준은 전반적으로 만족하는 것으로 나타났다. 대장균의 경우 관개기간 내내 농업용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준 (ME, 2009)인 200 CFU/100ml를 상회하여 보건 및 환경에 대한 보다 면밀한 검토가 요구된다.

#### IV. 요약 및 결론

하수처리수의 간접재이용에 따른 관개수질을 모의하기 위해, 오산천 유역을 대상 유역으로 선정하고 SWAT 모형과 QUALK02 모형을 연계하여 하수처리장 방류구 하류에 위치하는 관개용수

취수지점에서의 관개기 순별 수질을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. SWAT 모형으로 오산천 유역의 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량과 관개용수 취수지점의 유량을 모의하고, 이를 QUALKO2 모형의 증분유입 자료와 기준유량으로 적용하여 SWAT-QUALKO2 연계 시스템을 구축하였다.

2. SWAT 모형과 QUALKO2 모형의 검·보정은 단순시행착오법으로 이루어졌다. SWAT 모형의 경우 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났으나, QUALKO2 모형의 경우 실측 자료의 부족으로 인해 검·보정이 일부분 미흡한 것으로 나타났으며, 추가적인 모니터링을 통해 보완이 필요할 것으로 사료된다.

3. 순별 관개수질의 모의 결과, BOD, T-N, T-P, 대장균의 농도는 7월~9월에 비해 4월~6월에 높은 것으로 나타났다. BOD의 경우 4월~7월에 농업용수 수질 기준 및 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준을 초과하며, 대장균의 경우 관개기간 내내 농업용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준을 초과하는 것으로 나타나, 보건 및 환경에 대한 면밀한 검토가 필요하며 하수처리수를 안전하게 농업용수로 재이용하기 위한 재처리 시스템의 적용이 요구되는 것으로 나타났다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Choi, H. G., D. I. Kim, J. E. Kim, and K. Y. Han, 2011. Non-point source impact analysis through linkage of watershed model and river water quality model. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(1): 25-36 (in Korean).
2. Enforcement decree of the framework act on environmental policy, article 2, No. 23967 (20. Jul, 2012) (in Korean).
3. Enforcement rule of the sewerage act, article 3, No. 463 (04. Jul, 2012) (in Korean).
4. Gyeonggi Institute of Health & Environment, 2008. Comprehensive plan for water quality improvement (in Korean).
5. Han River Basin Environmental Office (HRBEO), 2009a. Water environment management plan for Anseong stream mid-watershed (2009~2013) (in Korean).
6. Han River Basin Environmental Office (HRBEO), 2009b. Water environment management plan for upper and lower region of Imjin river (2009~2013) (in Korean).
7. Kang, M. S., 2002. Development of total maximum daily loads simulation system using artificial neural networks for satellite data analysis and nonpoint source pollution models. Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
8. Kang, M. S., S. W. Park, S. M. Kim, and C. H. Seong, 2004. Rice cultivation with reclaimed wastewater irrigation for wastewater reuse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 46(1): 75-86 (in Korean).
9. Lee, J. H., J. W. Seo, and C. J. Kim, 2012. Analysis on trends, periodicities and frequencies of Korean drought using drought indices. *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(1): 75-89 (in Korean).
10. Leggett, R. W. and L. R. Williams, 1981. A reliability index for models. *Ecological Modelling*, 13(1981): 303-312.
11. McAvoy, D. C., P. Masscheleyn, C. Peng, S. W. Morrall, A. B. Casilla, J. M. U. Lim, and E. G. Gregorio, 2003. Risk assessment approach for untreated wastewater using the QUAL2E water quality model. *Chemosphere*, 52(2003): 55-66.
12. Migliaccio, K. W., I. Chaubey, and B. E. Haggard, 2007. Evaluation of landscape and instream modeling to predict watershed nutrient yields. *Environmental Modelling & Software*, 22(2007): 987-999.
13. Ministry of Construction & Transportation (MOCT), 2002. Anseong stream maintenance basic plan (revised) (in Korean).
14. Ministry of Environment (ME), 2009. Guidelines for wastewater reuse (revised) (in Korean).
15. Ministry of Environment (ME), 2011. 2010 Statistics of sewerage (in Korean).
16. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. Long-term plans for water resources (2011-2020) (in Korean).
17. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970), River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.

18. National Institute of Environmental Research (NIER), 2005. Development of stream water quality model for total maximum daily load (II) (in Korean).
19. National Institute of Environmental Research (NIER), 2007. QUALKO2 model explanation (in Korean).
20. Park, S. W., 2004. Application for wastewater reclamation and reuse (code#4-5-1). Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
21. Park, S. W., 2007. Application of wastewater reuse system for agriculture (code#4-5-2). Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
22. Park, S. W., 2011. Application of integrated technologies for wastewater reclamation and reuse system for agriculture (code#4-5-3). Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
23. Park, S. W. and T. I. Jang, 2009. Technology for safe wastewater reuse in agriculture. *River and Culture*, 5(3): 102-106 (in Korean).
24. Rural Research Institute (RRI), 2005. A study on water supply methods considering variation of farming conditions in paddy field (in Korean).
25. Seong, C. H., S. J. Kim, S. M. Kim, and S. M. Kim, 2011. Analysis of wastewater reuse effect on field-scale water quality. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(4): 59-65 (in Korean).
26. US EPA, 1995. QUAL2E windows interface user's guide.
27. Yu, J. J., Y. S. Yoon, S. H. Shin, H. G. Kwon, J. S. Yoon, Y. I. Jeon, D. K. Kang, and B. S. Kal, 2011. Water quality prediction and forecast of pollution source in Milyanggang mid-watershed each reduction scenario. *Journal of the Environmental Sciences*, 20(5): 589-598 (in Korean).