

농촌 소유역에 대한 GWLF 모형의 적용성 검토

The Application of the GWLF model for Agricultural Small Watershed

황세운*, 박승우 (서울대)

Hwang, Sye Woon·Park, Seung Woo

abstract

The objective of the study is to investigate the application of the mid-range model for agricultural ungaged small watershed. In this study, the need for the selection of an optimal model was presented, and the Feasibility of the GWLF(Generalized Watershed Loading Function) model was examined for agricultural small watershed. The study watershed covers 384ha, and the hydrologic and water quality data were monitored from 1996 to 2004.

In the results of the simulation for the calibration period (1996~1999) and verification (2002~2004), R^2 were 0.70~0.91 and RMSE was 2.11~5.71. Then, the results of water quality simulation for SS, TN and TP, show that R^2 were 0.58, 0.47 and 0.62 respectively. This results were compared with the other research using the detailed models (SWAT, HSPF) for the same watershed and this showed the feasibility of mid-range model for the small watershed.

I. 서론

우리나라는 급속한 경제 성장을 바탕으로 산업화가 진행되고, 농촌의 도시화 및 이농 현상 등에 의해 수질 문제를 비롯한 환경적 사회 문제가 부각되고 있으며, 이를 해결하기 위한 중요한 과정으로서 미 계측지역 등의 수질을 예측하기 위한 모형의 선정과 적용에 대한 연구가 끊임없이 이루어지고 있다.

수질 모델링은 수질에 영향을 미치는 폐수의 유입, 수체의 유량, 유속, 기하학적 구조, 기상조건 등의 물 속에서 일어나는 물리적, 화학적 작용을 수식화하여 수질을 예측 평가하는 작업을 말하며, 실험하기 어렵거나, 비용 또는 시간이 많이 요구되어 현실적으로 분석이 불가능한 문제들에 관하여 다양한 시나리오와 상황을 고려하여 그 결과를 예측 및 평가할 수 있도록 해 주는데 사용된다. 따라서 수질 모형들은 환경문제에 관한 의사결정과정에 있어서 중요한 도구로 등장하였으며, 이를 적용하기 위해서는 수체의 수리학적 특성, 오염부하량, 수질 현황 등에 대한 조사가 선행되어야 한다. 그러나 현실적으로 급속한 도시화가 진행되고 있는 반면, 하천관리가 지역 발전 수준에 미치지 못하는 농촌 소유역의 하천 수질 관리를 위해 수질 모형을 적용함에 있어 1) 지역적 특성 자료 구축 미흡, 2) 오염원 관리 및 규제 한계 등의 문제는 수질관리의 성공적 수행이 직면한 제한 조건이라 할 수 있다. 또한 각 소유역에 대해 HSPF, SWAT, ANSWERS와 같은 세부적인 인자를 비교적 정밀하게 고려하는 유역 모형을 적용하기에는 자료가 부족하여, 보정을 통한 최적 매개변수 추정으로 이를 해결해야 하며, 모델링의 수행이 경제적·효율적 측면에서 합당치 않을 수 있다. 특히 대상 유역에 대해 가장 합당하고 경제적인 모형을 선정하는 것은 매우 어려우며, 중요한 선행 작업이라 할 수 있다. 미 환경부는 최적 수질 모델링의 선정을 위한 기준을 모의 수준(Time scale), 모형의 복잡성 및 구조, 유역 특성(Land use) 등을 고려하여 제시한 바 있다 (U.S. EPA, 1999).

따라서, 본 연구에서는 농촌 소유역에 대한 오염 부하량을 효율적으로 산정하기 위해 대상 유역을 선정하여, 지방자치단체 및 행정 관공서로부터 자료를 수집하고 비교적 적은 양의 자료를 이용하여 도시 및 농촌 복합 유역의 유출 및 오염부하량을 모의하는 GWLF 모형(Haith et al, 1992)을

적용하여, 선정된 농촌 소유역에 대한 적용성을 검토하였으며, 그 결과를 동일 유역에 대해 비교적 정밀한 모델(Detailed Model)을 적용한 연구사례와 비교·분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 모형의 개요

GWLF version 2.0(Haith et al., 1992) 모형은 사용자가 사용하기 편리한 환경을 도입하여 소규모 정화시설에 대한 발생 오염부하량을 고려하는 모델로서, 도시 유출 모듈을 SWMM(Huber and Dickinson, 1988), STORM(Hydraulic Engineering Center, 1977)과 같은 도시 유출 전용 모형의 기작과 유사한 절차로 보완·개발된 모델이다. 그리고 이 후에 펜실베이니아 주(Pennsylvania State) 환경보호국(Department of Environmental Protection)에서 Visual Basic™ 언어로 변환하여 ArcView와 연계함으로써 자료의 전후처리를 용이하게 하여 사용성을 보완한 AVGWLF version을 개발하였다. 또한 모형의 적용성이 널리 검증되면서, 최초 결과 보정 없이 미 계측지역에 대해 적용되는 모형인 GWLF에 대해 수문 보정(Hydrologic calibration)을 제안하여 정확도를 향상시킨 BasinSim version 1.0이라는 윈도우 기반의 유역 모델링 프로그램(A Window-Based Watershed Modeling Package)이 개발되고(Dai et al., 2000), 월별 유사량 예측에 대해 RUSLE2를 적용한 수정(Zhang and Hamlett, 2003)이 이루어져 모형을 보완하기 위한 연구가 수행되고 있다.

본 모형에서 하천의 영양물질의 이동은 용존(dissolved)상태의 흐름과 고형(solid phases)상태의 흐름으로 나누어진다. 용존상태의 영양물질은 유출, 점오염원, 하천으로 유입되는 지하수에 의해 이동하며, 고형의 영양물질은 점오염원, 토양유실, 도시로부터 발생하는 씻김(wash off)에 의한 유출 등에 의하여 하천으로 유입된다. GWLF 모형은 유출(runoff, urban wash off) 및 침식(erosion)에 대한 분포형 모델(distributed model)과 지하수에 대한 총괄 매개변수 선형저수지 모델(lumped parameter linear reservoir model)의 적용으로 비점오염을 모의한다.

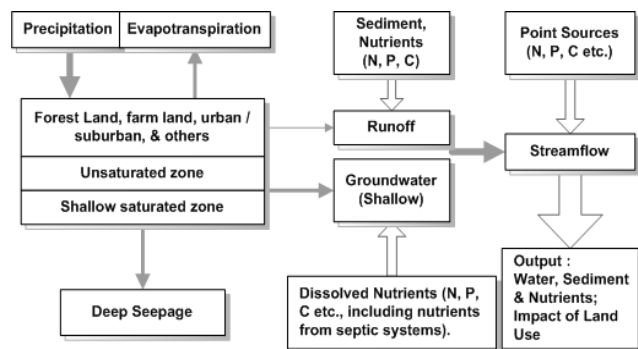


Fig. 1 Structure of the GWLF model. Shaded arrows indicate the hydrologic cycle.

2. 시험유역

농촌 소유역에 대한 본 연구에서 선정된 하천 수질 모델의 적용성을 검토하고 도시화에 따른 수질 변화를 예측하고 평가하기 위하여 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 걸쳐 위치한 발안 시험 유역을 선정하였다.

서울대학교 농공학과 (현 조경·지역시스템공학과)는 이 유역에 대해 1996년부터 현재까지 수문과 수질에 대한 모니터링이 실시하고 있다. 본 유역의 유역면적은 384ha, 유로장은 3.1km로서 행정구역상으로 봉담읍 왕림리(93%)와 세곡리(25%), 당하리(15%)로 구성되어 있다. Fig. 2은 HP#6 소유역의 표고를 나타내는 수치지도(DEM, Digital Elevation Map)이다.

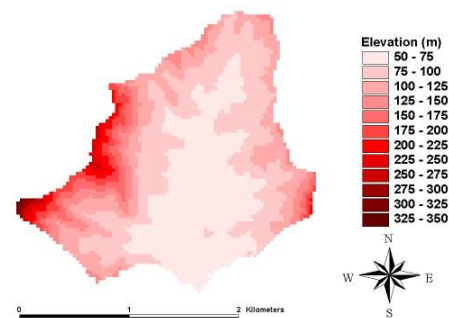


Fig. 2 DEM of the HP#6 watershed

3. 자료구축

1) 수문 자료

GWLF 모형의 입력자료로 활용되는 기상자료는 강우량(cm)과 기온(°C)이다. 자료기간 1996년부터 2004년까지 발안 시험유역으로부터 약 10km 거리에 위치한 수원기상대에서 관측하여 제공되는 기상자료를 수집하였다.

HP#6 소유역 말단의 하천 수위 측정을 위해 압력식 수위계(WL-14, Global Water)를 설치하여 운영하고 있으며, 2005년에는 부자식 수위계(Thalimedes, OTT)를 추가로 설치하여 자료를 수집하고 있다. Fig. 3은 자료기간(1996년~2004년)의 수집된 수위자료를 정리한 시계열을 강우량과 함께 도시한 것이며, fig. 4는 구축한 수위유량 관계를 이용하여 유출량을 도시한 그림이다.

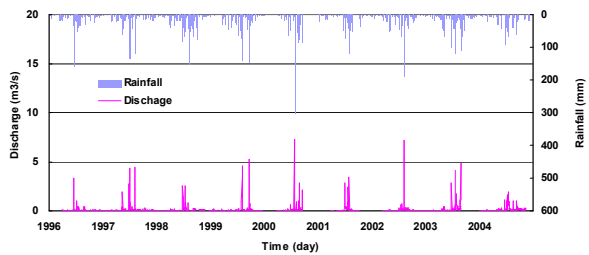
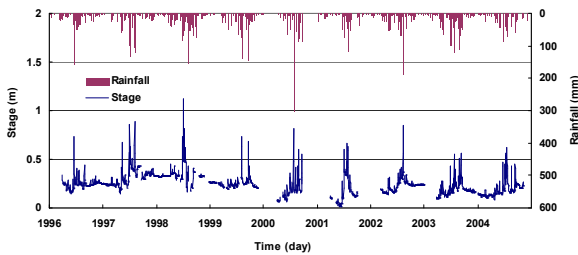


Fig. 3 Daily streamflow stage at the HP#6 station Fig. 4 Daily streamflow hydrograph at the HP#6 station

Fig. 5~Fig. 7은 수집한 수위자료로부터 유출량을 산정하기 위한 실측 유량과 수위와의 관계를 도출한 그림이다.

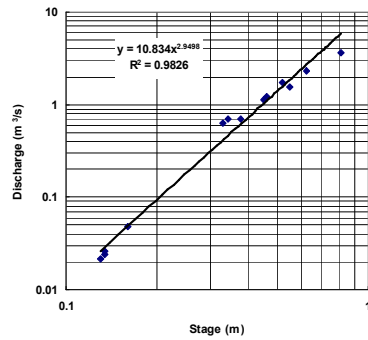
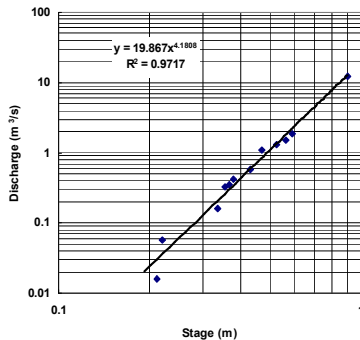
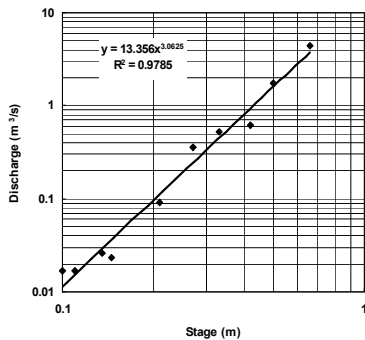


Fig. 5 Stage-discharge relationship (1998~2000) Fig. 6 Stage-discharge relationship (2001~2002) Fig. 7 Stage-discharge relationship (2003~2004)

2) 수질자료

수질 자료는 월 1회의 정기적 샘플링과 하천이 고수위일 경우 유량측정과 함께 샘플링을 실시하여 총 월 1회 이상의 하천수 시료를 채취함으로써 구축하였다. 실험은 서울대학교 농업생명과학대학 부속 법정 연구지원기관인 농업과학공동기기센터(NICEM)를 통해 기본적인 수질항목(pH, DO, COD, SS, TN, TP)에 대해 공정시험법에 따라 수행하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 자료기간에 대한 실측 유량과 부하량 간의 관계를 고시한 그림이며, 이로부터 산출한 일유량에 대한 미계측 일 부하량을 발생시키게 된다.

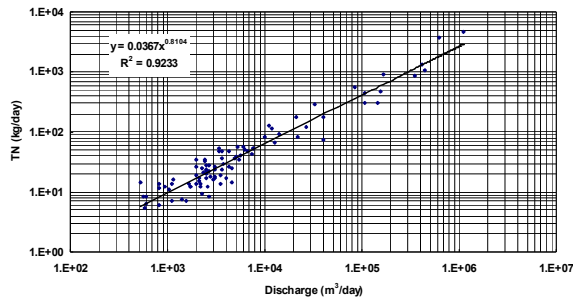


Fig. 8 Load-discharge relationship (TN)

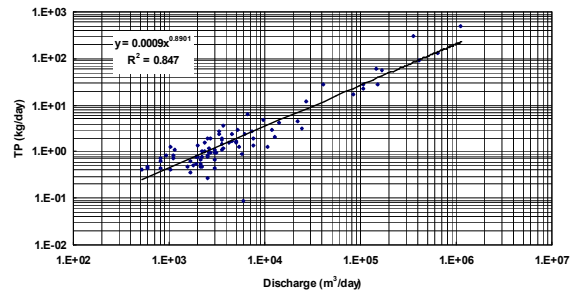


Fig. 9 Load-discharge relationship (TP)

3) 오염원자료

점오염 부하량을 산정하기 위하여 관공서(화성시청, 봉담면 주민자치센터)를 통해 생활계, 산업계, 축산계, 그리고 토지계로 나누어 시험유역의 오염원 자료를 수집하였다. Table 1은 수집한 오염원 자료와 원단위를 적용한 연간 발생 점오염부하량을 정리한 것이다.

Table 1 Calculation of annual Pollutant loading for each sources

	Unit	Unit generation load (g/capita/day)		Number	Annual pollutant loading (kg/year)		
		TN	TP		TN	TP	
Population	(g/capita/day) (capita)	13	1.45	1,936	9,187	1,025	
Livestock	Milk Cow	(g/head/day) (head)	161.8	56.7	58	3,666	1,285
	Pig		27.7	12.2	35.3	379	167
	Chicken		1.1	0.4	1693	723	263
Industry	manufact	(g/m³) (ea)	40	4	84	14,293	1,429
	Construct		50	5	3	176	18
	Food		64.3	6	31	77,821	7,263
	Others		59.9	6	63	5,351	536
Land use	Upland	(kg/km²/day) (km²)	9.44	0.24	0.26	1,449	36
	Paddy		6.56	0.61	0.5	1,879	173
	Wood		2.2	0.14	1.48	2,174	137
	Others		7.23	1.06	0.23	1,564	234

4. 모형의 보정

모형의 보정을 위해 시행착오법을 통하여 매개변수를 추정하였으며, 보정기간은 1996년에서 1999년까지 4년간이며, Fig. 10과 Fig. 11은 보정 결과를 보여주고 있다. R²는 0.47~0.91, RMSE는 2.11~5.72의 범위 내 값을 보였다. Table 2와 Table 3은 실측치와 모의 결과를 자료기간에 대한 유출율과 통계량을 이용하여 비교·정리한 것이다.

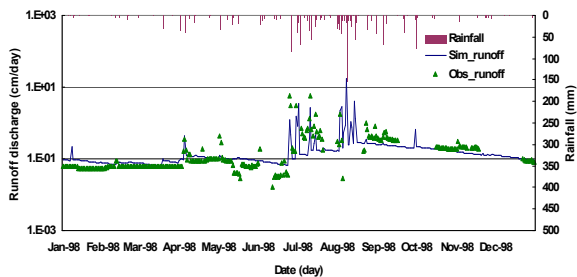


Fig. 10 Obs. and Sim. runoff (1998)

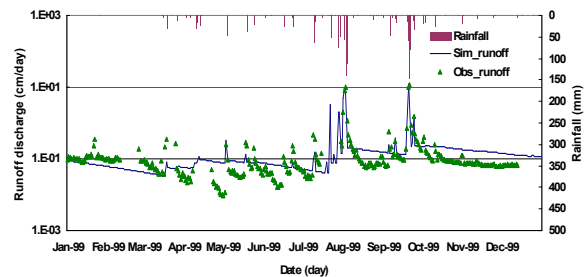


Fig. 11 Obs. and Sim. runoff (1999)

Table 2. Sim. runoff for calibration period

Year	Rainfall (mm)		Obs. span (day)	Sim. runoff (mm)		Runoff ratio	
	a	b		a	b	a	b
1996	883	780	274	239	236	0.31	0.30
1997	1204	1204	348	672	653	0.56	0.54
1998	1621	955	273	886	429	0.55	0.45
1999	1515	1254	299	836	713	0.55	0.57

a. For total span b. For observed span

Table 3. Comparison between Obs. and Sim. runoff

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio		R ²	Bias	a	b
		obs.	sim.	obs.	sim.				
1996	780	345	236	0.44	0.30	0.91	0.38	2.11	0.44
1997	1204	788	653	0.65	0.54	0.87	0.37	3.30	0.20
1998	955	564	429	0.59	0.45	0.47	0.53	3.68	0.33
1999	1254	719	713	0.57	0.57	0.70	0.10	5.72	0.04

a. RMSE (mm/day) b. RMAE (mm/day)

5. 모형의 검증

검정기간은, 계측기 결함과 기상이변 등으로 인한 결측이 많은 2000년과 2001년을 제외한 2002년에서 2004년까지 3년간이며, Fig. 12와 Fig. 13은 검정 결과를 보여주고 있다. 모의된 유출량과 실측치의 R²는 0.81~0.86, RMSE는 3.26~4.03의 범위 내 값을 보였다. Table 4와 Table 5는 실측치와 모의 결과를 통계량을 이용하여 비교·정리한 것이다.

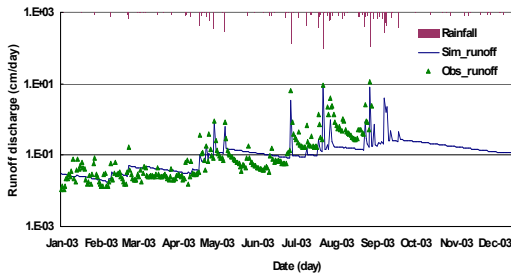


Fig. 12 Obs. and Sim. runoff (2003)

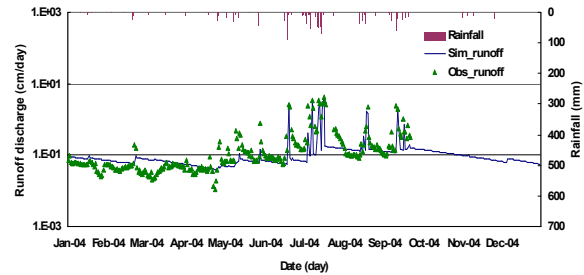


Fig. 13 Obs. and Sim. runoff (2004)

Table 4. Sim. runoff for verification period

Year	Rainfall (mm)		Obs. span (day)	Sim. runoff (mm)		Runoff ratio	
	a	b		a	b	a	b
2002	1247	1191	298	563	510	0.47	0.43
2003	1515	1117	238	775	457	0.69	0.41
2004	1192	1155	312	591	478	0.51	0.41

a. For total span b. For observed span

Table 5. Comparison between Obs. and Sim. runoff

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio		R ²	Bias	a	b
		obs.	sim.	obs.	sim.				
2002	1191	657	510	0.55	0.43	0.86	0.32	4.03	0.15
2003	1117	677	657	0.61	0.59	0.85	0.91	3.70	0.47
2004	1155	731	678	0.65	0.59	0.81	0.70	3.26	0.38

a. RMSE (mm/day) b. RMAE (mm/day)

III. 결과 및 고찰

유역 유출에 대한 보정과 검정을 통하여 매개변수를 보정하고 수질 모의를 실시하고 자료기간 (1996~2004)의 실측자료와 모의한 월별 부하량을 비교하였다(Fig. 14~Fig 16). 각각에 대한 결정계수(R²)를 산정한 결과 SS는 0.58, TN은 0.47 TP는 0.62로 나타났다. Table 6은 본 연구에서 GWLF 모형의 보·검정 과정과 동일 유역에 대해 SWAT 모형과 HSPF 모형을 적용한 연구 사례의 모의·실측 비교 결과를 정리한 표이다. 연구 결과들의 통계치는, 소유역에 대한 GWLF의 적용 가능성을 보여주고 있다.

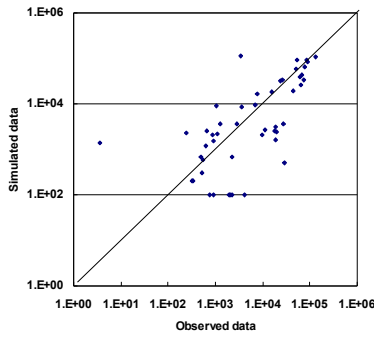


Fig. 14 Scatter diagram of monthly TN

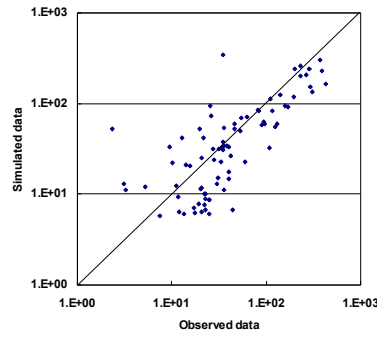


Fig. 15 Scatter diagram of monthly TP

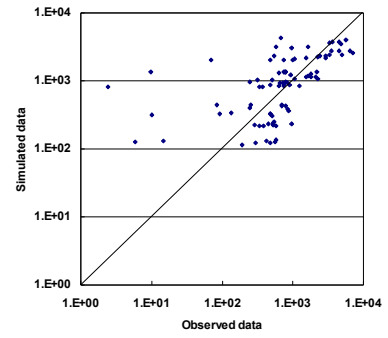


Fig. 16 Scatter diagram of monthly SS

Table 6. Comparison with the results of other research

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio		R ²			RMSE (mm/day)			RMAE (mm/day)		
		obs.	sim.	obs.	sim.	This study	Kang (2002)	Kim (2004)	This study	Kang (2002)	Kim (2004)	This study	Kang (2002)	Kim (2004)
1996	780	345	236	0.44	0.30	0.89	0.93	0.92	2.11	2.29	2.10	0.44	0.40	0.40
1997	1204	788	653	0.65	0.54				3.30			0.20		
1998	955	564	429	0.59	0.45	0.47	-	-	3.68	-	-	0.33	-	-
1999	1254	719	713	0.57	0.57	0.70	0.87	0.84	5.72	6.21	6.03	0.04	0.51	0.49
2002	1191	657	510	0.55	0.43	0.86	-	-	4.03	-	-	0.15	-	-
2003	1117	677	657	0.61	0.59	0.85	-	-	3.70	-	-	0.47	-	-
2004	1155	731	678	0.65	0.59	0.81	-	-	3.26	-	-	0.38	-	-

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 하천관리가 지역 발전 수준에 미치지 못하는 농촌 소유역의 하천 수질 관리를 위해 수질 모델을 적용함에 있어 지역적 특성 자료 구축이 미흡함과 오염원 관리 및 규제 한계 등의 문제를 제기하고 중규모(mid-range) 모델의 적용성을 평가해보고, 동일 대상유역에 대해 비교적 정밀한(detailed) 다른 모형(SWAT, HSPF)을 적용한 연구 결과와 일유출량 모의 결과의 실측치와의 일치 여부를 비교하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 모델의 적용성 검토를 위하여 대상유역을 선정하고 기상, 수문, 수질자료와 오염원 현황을 비롯한 유역 특성 자료를 조사하고 수집하였다.
2. GWLF 모델을 적용하여 보정과 검정의 과정을 거쳐 모의한 오염부하량과 실측치를 비교한 결과, R²가 SS는 0.58, TN은 0.47 TP는 0.62로 나타났다.
3. 검증과정에서 모의된 일유출량은 R²가 0.81~0.96으로 강(2002)과 김(2004)의 연구 결과와 비교해 볼 때, GWLF 모델의 수질 모의에 앞선 유출 모델로서의 적용성을 보여주었다.

참고 문헌

1. 강문성, 2002, 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모델을 이용한 오염총량모의시스템 개발, 서울대학교 박사학위논문.
2. 김상민, 2004, 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 영향 분석.
3. Haith D.A., Ross Mandal, and Ray Shyan Wu, 1992, GWLF(Gneralized Watershed Loading Functions version 2.0, Department of Agricultural & Biological Eng. Cornell University.
4. U.S. EPA, 1999, Protocol for Developing Nutrient TMDLs.