

영산강·섬진강 유역을 대상으로 한 논 오염부하 산정 단순회귀모형 적용

Application of Simple Regression Models for Pollutants Load Estimation of Paddy to Yeongsan and Seomjin River Watersheds

최우정*† · 광진협* · 정재운* · 윤광식* · 장남익** · 허유정**

Choi, Woo-Jung · Kwak, Jin Hyeob · Jung, Jae Woon
Yoon, Kwang-Sik · Chang, Nam Ik · Huh Yu Jeong

Abstract

Simple regression models for pollutants load estimation of paddy developed by the Ministry of Environment in 1995 were tested with the data (T-N, T-P, COD_{Mn}, and SS) collected from Yeongsan and Seomjin river watersheds, and improvement measures were suggested. Overall, the simulated values showed a great difference from the measured values except for T-P according to the statistical analyses (RMSE, root mean square error; RMAE, root mean absolute error; RB, relative bias; EI, efficiency index). Such difference was assumed due to the fact that the models use only hydrologic factors (quantity factor) associated with precipitation and run-off as input parameters, but do not consider other factors which are likely to affect pollutant concentration (quality factor) including days after fertilization. In addition, in terms of accessibility of the models, some parameters in the models such as run-off depth and run-off amount which can not be obtained from the weather database but should be collected by on-site measurements need to be replaced with other variables.

Keywords : Non-point source pollution, Universal model, Nitrogen, Phosphorous, Chemical oxygen demand

I. 서 론

하천과 호소의 수질 오염원은 오염배출 특성에 따라 점원오염(point source pollution)과 비점원오염(non-point source pollution)으로 구분된다.⁹⁾ 점원오염은 오수 처리기술 및 설비투자의 진전에 따라 상당량 제어가 가능해짐에 따라 상대적으로 호소와 같은 폐쇄성 수역에서 농업 등에 의한 비점원오염의 기여도가 증가하고 있다.⁸⁾ 특히 최근

* 전남대학교 농업과학기술연구소 생물산업공학과
** 국립환경과학원 영산강물환경연구소
† Corresponding author. Tel.: +82-62-530-2153
Fax: +82-62-530-2159
E-mail address: wjchoi@chonnam.ac.kr

들어서는 점오염원의 농도 규제로서는 수계의 수질을 만족시킬 수 없다는 문제가 제기됨에 따라 수질 관리의 중요한 수단으로서 오염총량제를 3대강에 걸쳐 본격적으로 실시하고 있다. 비점오염원은 크게 도시, 논, 밭, 임야 등으로 구분할 수 있는데 우리나라의 농지 면적은 2004년 현재 국토 면적의 약 18.3%인 182만 4천 ha이며 이 중 논이 차지하는 면적은 60.5%인 110만 4천 ha이다.⁷⁾ 또한, 전체 수자원 이용량 중 농업용수 이용량은 약 48%를 차지하고 있어서 논 비점원오염 기여도가 높은 것으로 보고되고 있다.⁸⁾

논으로부터 발생하는 비점오염은 강우와 같은 계절적인 인자와 시비와 같은 영농활동과 직접적으로 관련되어 있기 때문에 인위적인 제어가 매우 어렵다.^{1),2),3),11)} 또한, 오염총량제 시행과 관련하여 논 비점오염 부하량을 명확히 산정할 필요성이 제기되지만, 광범위한 지역에 산재하는 논 오염 부하량을 모두 실측한다는 것은 기술적이나 경제적인 측면에서 쉽지 않다.¹⁰⁾ 따라서, 오염 부하량과 직접적인 인과관계가 있으며 쉽게 취득이 가능한 기상 및 수문 실측자료를 이용하여 관심 지역에 적용하여 오염 부하량을 산정할 수 있는 오염부하 산정 범용식의 필요성이 제기되고 있다.^{4),9)}

이와 관련하여 환경부에서는 전국적인 비점오염원 실태 파악에 활용할 수 있는 비점오염부하 산정 범용식(이하 환경부 범용식)을 제안한 바 있다.⁹⁾ 환경부 범용식은 수문상황을 독립변수로 이용하는 단순 회귀모형로서 입력자료의 획득이 용이하며, 도시지역, 논, 밭, 목장, 산지 등 토지이용별로 개발되었기 때문에 다양한 토지이용으로 구성된 복합 유역뿐만 아니라, 개별 토지이용(예를 들면 단위 논)에도 적용가능하다. 하지만, 현재까지 환경부 범용식을 실제 사례에 적용하여 범용식의 정확도를 검증하거나, 범용식의 개선 방향을 제안한 연구는 부족하다. 오염총량제에 직접적으로 활용될 수 있는 범용식의 중요성을 고려하면, 환경부 범용식의 지속적인 개선이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는

환경부 범용식에서 이용되는 입력 인자와 부하량과의 인과관계, 입력 인자의 취득 용이성 등에 대해 논하는 한편, 영산강과 섬진강 수계의 논 지역에 범용식을 적용하여 실측 값과 모의 값의 비교를 통해 환경부 범용식의 정확도를 평가하고 향후 범용식 개선 방안을 제안하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 환경부 범용식

환경부 범용식에 대한 설명은 환경부의 비점오염원 조사연구사업 보고서(1995)에 자세히 기술되어 있다.⁹⁾ 주요 내용만을 간단히 소개하면, 환경부 범용식은 Table 1과 같이 선형 및 선형변환형식의 5가지 모형식을 제시한 후 실측값과의 비교를 통해 최대의 결정계수(R^2)를 갖는 모형을 최종적으로 선정하였다. 동일 오염물질에 대해 2~3개의 모델이 비슷한 R^2 값을 가지면 각각의 독립변수 중 정확한

Table 1 Structure and input parameters of the models for paddy developed by the Ministry of Environment (MOE models)

Model number	Model structure ^a
1	$L = A + B(X_1) + C(X_2) + D(X_3) + E(X_4) + F(X_5) + G(X_6)$
2	$L = A + B \ln(X_1) + C \ln(X_2) + D \ln(X_3) + E \ln(X_4) + F \ln(X_5) + G \ln(X_6)$
3	$L = A(X_1)B(X_2)C(X_3)D(X_4)E(X_5)F(X_6)G$
4	$L = A + B \ln(X_1) + C \ln(X_2) + D \ln(X_3) + E \ln(X_4) + F(X_5) + G(X_6)$
5	$L = A + B(X_1) + C(X_2) + D(X_3) + E(X_4) + F \ln(X_5) + G \ln(X_6)$

^aL, Pollutant load (kg/km²); X₁, Rainfall (mm); X₂, Duration of rainfall (hour); X₃, Number of rainy days (day); X₄, Run-off depth (mm); X₅, Rainfall intensity (mm/hour); X₆, Mean hourly run-off (mm/hour); A~G, Empirical coefficients

Table 2 Determinants of the MOE models for paddy

Pollutants	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
SS	0.51	0.32	0.80	0.44	0.30
BOD	0.41	0.50	0.67	0.50	0.49
COD	0.69	0.64	0.70	0.64	0.71
T-P	0.76	0.58	0.77	0.63	0.75
T-N	0.94	0.62	0.70	0.75	0.94

Table 3 Selected MOE models for each pollutant

Pollutants	Model number	Model equation ^a	R ²
SS	3	$L = 150.5(X_1)^{-0.91}(X_4)^{1.72}$	0.80
BOD	3	$L = 1.849(X_3)^{0.25}(X_4)^{0.69}(X_5)^{0.70}$	0.67
COD	3	$L = 1.64(X_1)^{0.93}(X_6)^{0.53}$	0.70
T-P	3	$L = 0.348(X_4)^{0.84}$	0.77
T-N	1	$L = -1.37(X_1) + 10.05(X_4) + 15.02$	0.94

^aDetails of the input parameters are described in Table 1 footnote

자료 획득 가능성을 고려해서 독립변수를 정하였다. 예를 들면 비강우일수와 총 유출량 중 하나의 변수를 선택한다면 전자를 선택하고, 두 개 이상의 모델이 비슷한 R²를 가지면 입력변수가 적은 모델을 선택하였다.

환경부(1995)에 의하면 오염물질별 최적모형을 선정하기 위해 앞에서 제시한 5개의 모형에 대한 결정계수를 검토한 결과 Table 2와 같았다.⁹⁾ SS, BOD, COD, T-P는 Model 3의 결정계수가 가장 높았고, T-N는 Model 1과 Model 5의 값이 높았으나, 입력변수 취득이 용이한 Model 1을 선택하였으며, 이를 근거로 Table 3과 같은 형식의 범용식을 제시하였다.

2. 범용식 검증 자료 수집

환경부 범용식 검증을 위해서 영산강 및 섬진강 수계 단위 논을 대상으로 범용식 검증에 필요한 입

력 변수와 관련된 주요 수문(강우량, 유출고, 평균 시간당 강우량) 및 수질(SS, COD, T-N, T-P) 자료를 수집하였다. 영산강 및 섬진강 수계 조사 대상 지역 및 조사 방법에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다.

가. 영산강 수계 학야지구

전라남도 함평군 엄다면 화양리의 논지구(이하 '학야지구') 1102-1번지부터 1104-5번지까지의 논을 대상으로 2004년과 2005년 영농기간(5월~9월) 동안 수문 및 수질 자료를 실측하여 부하량을 산정하였다. 학야지구의 관개원은 한국농촌공사 함평지사에서 관리하는 대동저수지(관개면적 992.3 ha, 저수용량 5,309 m³)이다. 학야지구는 동쪽에 함평천이 흐르며 서쪽에는 주 배수로가 위치하며, 유역면적은 13.7 ha이다. 표토(0~10 cm)의 토성은 미사질양토(모래 11.7%, 실트 61.4%, 점토 26.9%)였다.

나. 섬진강 수계 적성지구

전북 순창군 적성면 고원리에 위치한 논 지구(이하 '적성지구')로서, 관개원은 적성지구로부터 약 2.5 km 떨어진 전북 순창군 적성면 내월양수장 및 1.0 km 떨어진 점촌양수장이다. 관개수는 용수로를 통해 공급되며 배수된 물은 배수로를 통하여 섬진강 본류 하천으로 다시 유입되며, 유역면적은 8.1 ha이다. 표토(0~10 cm)의 토성은 사질양토(모래 61.8%, 실트 37.0%, 점토 1.2%)이다.

다. 부하량 조사 내용 및 방법

각 지구의 배수로 말단에 수위계를 설치하여 수위를 자동 측정하였으며, 수위 자료를 수위-유량 관계식에 적용하여 유량을 산정하였다. 강우사상시 수질 시료를 채취하여 SS, COD, T-N, T-P 등을 공정시험법에 준하여 실시하였다. 오염부하량은 유량과 농도의 곱으로 계산하였으며, 미측정 수질은 단일 강우사상시 수질 농도가 일정하다는 가정하에

일정 농도법을 적용하여 보정하였다.

범용식을 적용하여 실측된 논 오염 부하량과 범용식을 이용하여 모의한 값을 비교하였다. 영산강 수계와 섬진강 수계에서는 BOD를 조사하지 않았기 때문에 SS, COD, T-N, T-P에 대해서 검증을 실시하였다. 학야지구는 2004년과 2005년, 적성지구

3. 환경부 범용식 검증

영산강 수계와 섬진강 수계에 Table 3의 환경부

Table 4 Input parameters for the MOE models evaluation collected from Hakya site of Yeongsan river basin in 2004

Storm event	Day	Rainfall (mm), X_1	Run-off depth (mm), X_4	Mean hourly run-off (mm h ⁻¹), X_6
1	5/28~5/29	34.0	3.33	0.07
2	6/17~6/26	272.0	128.20	1.07
3	7/3~7/9	272.0	74.19	1.03
4	7/11	5.0	2.47	0.10
5	7/14~7/17	148.5	74.10	1.54
6	8/4~8/6	34.5	21.86	0.91
7	8/10	6.0	4.34	0.18
8	8/13	19.5	4.24	0.18
9	8/18~8/28	261.5	184.74	3.85
10	9/10~9/15	137.5	92.36	0.96
11	9/18~9/22	81.50	67.91	2.83

Table 5 Input parameters for the MOE models evaluation collected from Hakya site of Yeongsan river basin in 2005

Storm event	Day	Rainfall (mm), X_1	Run-off depth (mm), X_4	Mean hourly run-off (mm h ⁻¹), X_6
1	5/17~5/18	46.0	7.39	0.15
2	6/1~6/3	63.0	58.52	1.22
3	6/10~6/11	44.0	26.70	1.11
4	06/28	16.0	7.12	0.10
5	7/1~7/5	69.0	32.47	0.23
6	7/8~7/11	56.5	19.86	0.21
7	7/16	9.5	2.67	0.11
8	7/28~7/29	8.5	2.08	0.04
9	7/31~8/3	81.0	57.75	0.60
10	8/7~8/9	13.0	4.05	0.06
11	8/11	1.0	1.26	0.05
12	8/17	3.0	3.52	0.15
13	8/19~8/25	110.0	109.64	4.57
14	9/20~9/23	71.0	44.42	0.93

Table 6 Input parameters for the MOE models evaluation collected from Jeoksung site of Seomjin river basin in 2005

Storm event	Day	Rainfall (mm), X ₁	Run-off depth (mm), X ₄	Mean hourly run-off (mm h ⁻¹), X ₆
1	06/11	44.6	27.8	1.2
2	6/26~7/6	193.0	115.0	0.4
3	7/28~7/29	61.4	28.2	0.6
4	08/1~8/3	84.6	85.4	1.2
5	08/6~8/11	36.2	39.7	0.3
6	08/17~8/26	110.4	201.9	0.8
7	08/30	1.4	4.9	0.2

는 2005년에 실측한 자료를 이용하여 각 강우사상 별로 환경부 범용식을 적용하였으며, 범용식의 입력 자료의 실측값은 Tables 4, 5, 6과 같다. 모의 값의 정확도는 RMSE(root mean square error), RMAE(root mean absolute error), RB(relative bias)와 EI(efficiency index)를 이용하여 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 범용식 입력변수

Table 1에서 나타낸 바와 같이 환경부 범용식에서는 강우량, 강우지속시간, 강우일수, 총유출고, 시간당 평균 강우량 및 시간당 평균유출량을 주요 입력변수로 이용하였다. 강우량, 강우지속시간, 강우일수 등은 기상청 자료를 이용할 수 있지만, 총유출고와 시간당 평균유출량은 범용식 적용 대상 지구에서 실측을 통해서 취득할 수 있는 자료이기 때문에 가급적 입력변수에서 제외하는 것이 범용식의 접근성 측면에서 유리한 것으로 판단된다. 또한, 오염부하량은 유량에 영향을 미치는 수문인자 뿐만 아니라 수질과 관련된 시비관련 인자에 의해서도 영향을 받는데, 환경부 범용식에서는 시비관련 인자가 제외되어 있다. 영산강 유역 학야지구의 조사 자료를 이용한 유량가중 평균농도와 수문/수질 인

자간의 상관관계 분석 결과에 의하면 이앙 후 일수 또는 시비 후 일수가 수질 농도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다(Table 7).^{6),12)} 모든 수질 항목은 이앙 후 일수와 강한 음의 상관성을 나타내었는데, 이는 경운 후 표토가 교란된 상태에서 비의 생육이 왕성하기 전에 오염물질 부하가 상대적으로 많을 수 있음을 의미한다.¹¹⁾ 또한, T-N 농도와 T-P 농도는 각각 질소 및 인 시비 후 일수와 강한 음의 상관관계를 가졌다. 따라서, 향후 범용식 개발을 위해서는 이앙 후 일수와 시비 후 일수를 중요한 입력변수로 활용해야 함을 알 수 있다. 특히, 매 작기 1회 사용되는 인에 비해 질소는 3회 이상 사용되기 때문에 수문 인자만을 이용해서 오염 부하를 정확하게 모의하는 것은 쉽지 않은 것으로 판단된다.

또한, 다양한 입력변수를 적절히 조합하여 범용

Table 7 Pearson correlation coefficient between water quality and days after transplantation and fertilization

Parameters	Days after transplantation	Days after fertilization	
		N	P
T-N	-0.79**	-0.52*	NA
T-P	-0.57*	NA	-0.55*
COD	-0.51*	NA	NA
SS	-0.56*	NA	NA

* P < 0.05, ** P < 0.01, NA: Not applied

식을 완성하기 위해서는 입력변수와 부하량과의 인과관계(양 또는 음의 상관관계)를 고려하여야 하지만, Table 3에서 보는 바와 같이 SS와 T-N의 경

우 부하량이 강우량과 음의 상관관계를 갖는 것으로 범용식이 제안되어있는데, 이는 범용식을 선정할 때 이와 같은 인과관계 보다는 상관관계를 제시

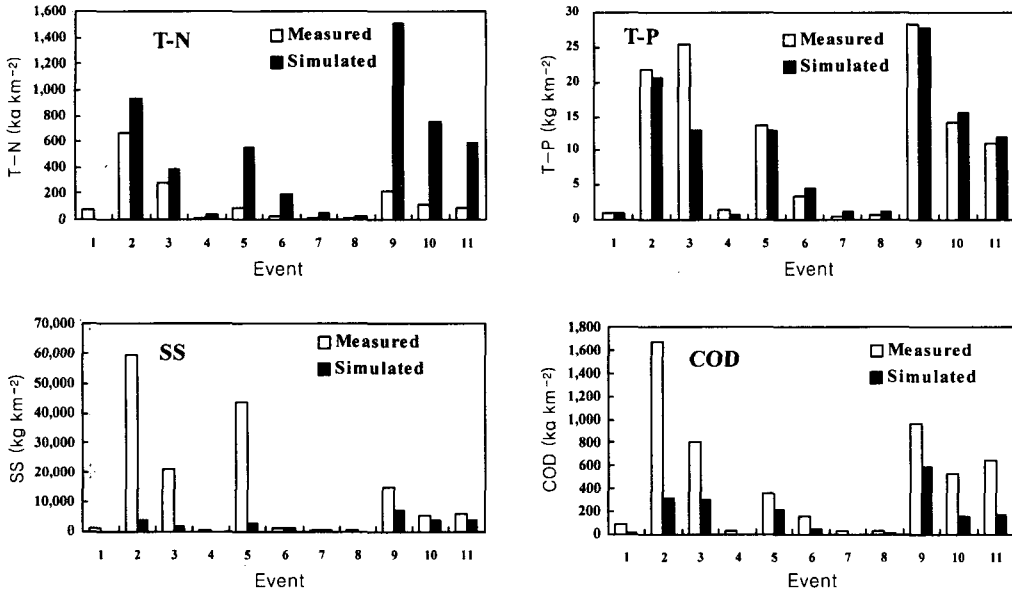


Fig. 1 Comparison between measured and simulated pollutant loads for each storm event at Hakya site of Yeongsan river basin in 2004

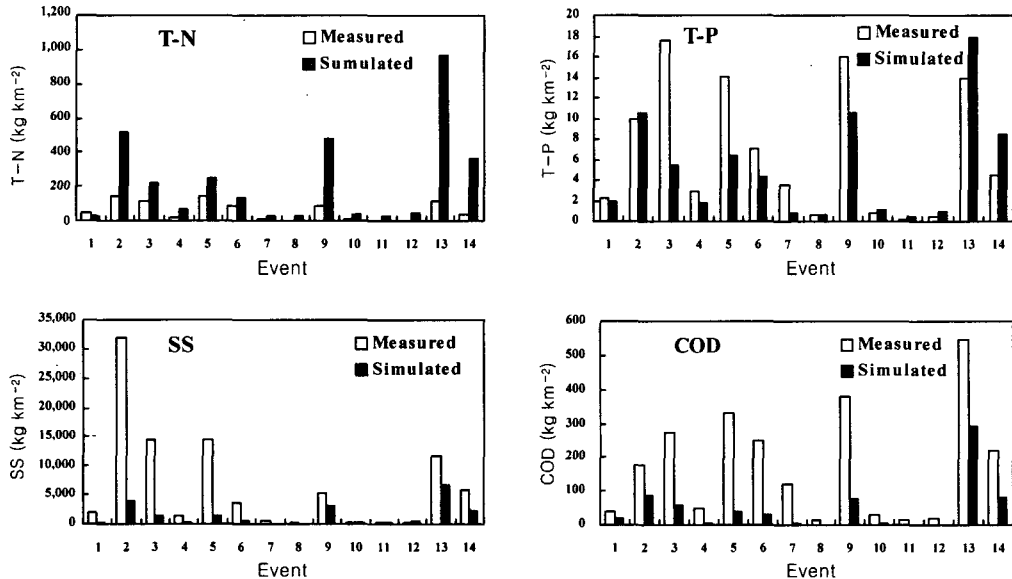


Fig. 2 Comparison between measured and simulated pollutant loads for each storm event at Hakya site of Yeongsan river basin in 2005

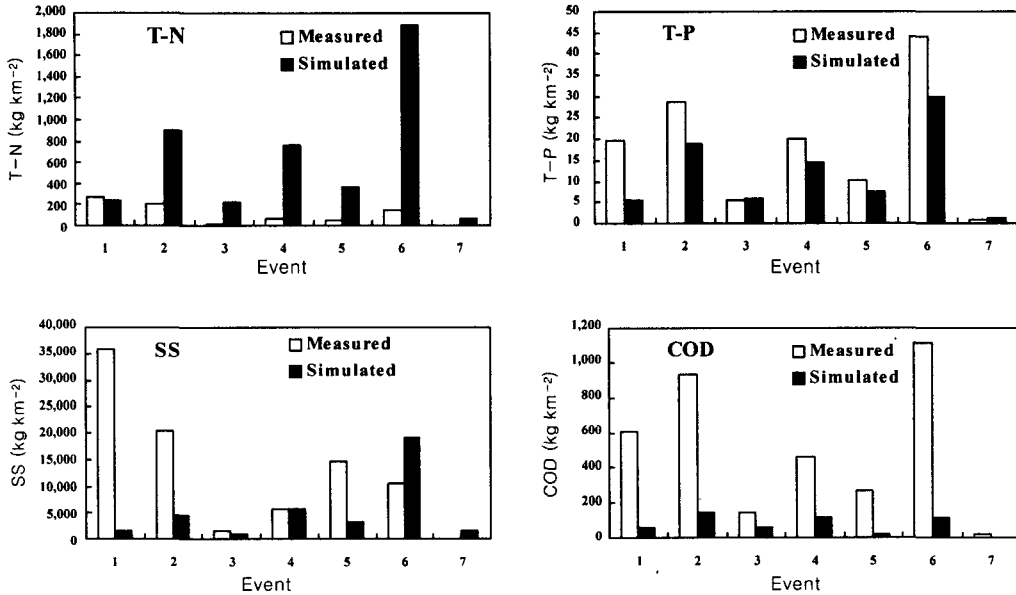


Fig. 3 Comparison between measured and simulated pollutant loads for each storm event at Jeokseong site of Seomjin river basin in 2004

하는 결정계수를 우선적으로 고려한 때문으로 판단 된다.

2. 범용식 모의치와 실측치 비교

강우사상별로 실측값과 모의값을 비교한 결과, T-P는 실측값과 모의값이 유사하였지만, 나머지 T-N, SS, COD는 큰 차이를 나타내었다(Figs. 1, 2, 3). T-N은 실측값보다 모의값이 크게 나타났으며, SS와 COD는 그 반대로 실측값보다 작게 모의되었다.

RMSE, RMAE, RB, EI를 이용하여 실측값과 모의값을 비교하여 범용식을 평가해 본 결과, RMSE는 T-P의 경우 10 kg event⁻¹ 이하였으나 T-N은 280~780 kg event⁻¹, COD는 160~550 kg event⁻¹, SS는 9000 kg event⁻¹ 이상이었다(Tables 8, 9, 10). RMAE는 T-N은 1 kg event⁻¹ 이상이었고, 나머지 수질 항목은 0~1 kg event⁻¹ 범위 였다. 따라서, RMSE와 RMAE값을

기준으로 했을 때 환경부 범용식은 T-P 모의에는 우수하지만, 나머지 항목에 대해서는 정확도가 낮

Table 8 Statistical analyses for the evaluation of the MOE models applied to Hakya site of Yeongsan river basin in 2004

	T-N	T-P	SS	COD
RMSE	383.79	3.01	17038.18	382.06
RMAE	1.36	0.10	0.51	0.40
RB	2.12	-0.09	-0.84	-0.66
EI	-5.93	0.85	-0.30	0.01

Table 9 Statistical analyses for the evaluation of the MOE models applied to Hakya site of Yeongsan river basin in 2005

	T-N	T-P	SS	COD
RMSE	288.58	4.51	9267.92	165.78
RMAE	2.89	0.45	0.79	0.72
RB	2.83	-0.24	-0.78	-0.72
EI	-29.99	0.46	-0.15	-0.08

Table 10 Statistical analyses for the evaluation of the MOE models applied to Jeokseong site of Seomjin river basin in 2004

	T-N	T-P	SS	COD
RMSE	774.12	8.73	15328.06	547.14
RMAE	5.15	0.36	0.82	0.86
RB	5.06	-0.35	-0.59	-0.86
EI	-68.05	0.60	-0.76	-1.13

은 것을 알 수 있다. RB는 T-P가 가장 0에 가깝게 나왔으며, T-N이 가장 크게 나왔다. EI는 T-P를 제외하고는 모두 0보다 작은 값을 나타냈고 T-P는 0~1범위에 있었다. EI 값은 0~1 사이에 있으면 모의치가 실측치와 유사하며, 0 보다 작으면 그 반대로 평가할 수 있다.⁵⁾

IV. 결 론

환경부에서 1995년 제안한 범용식을 영산강 및 섬진강 수계 논 지구에 적용하여 실측값과 비교한 결과 T-P는 유사하게 모의하였지만, 기타 수질항목에 대한 모의는 정확성이 높지 않았다. 이는 범용식의 입력변수가 모두 수문 인자로만 구성되어 있으며 오염물질의 농도에 영향을 미치는 이양 후 일수나 시비 후 일수와 같은 수질 관련 인자가 입력변수에서 제외된 때문으로 판단된다. 특히 논 농업은 영농 형태, 시비 시기, 비료의 종류나 양 등 유출수 수질에 직접적인 영향을 미치는 인자가 다양하기 때문에 이들 요인에 의해 지역별 또는 시기별 유출수 수질에 차이가 있다. 따라서, 수질 인자를 범용식의 입력자료로 활용하여야 보다 정확한 범용식 개발이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 수문 자료 중 유출고나 평균시간당 유출량은 실측이 어렵고 유출량과 면적 등의 자료를 이용하여 계산이 필요한 입력변수이기 때문에, 보다 취득이 용이한 입력변수를 선택하는 것이 유리하다. 따라서 향후 본 연구에서 제안한 바와 같이 수질 인자가 반영되

며 보다 취득이 용이한 입력변수로 구성된 범용식을 개발할 필요가 있다.

본 연구는 2004-2005년도 영산강·섬진강 수계 환경기초조사사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

References

1. Choi, J. K., Koo, J. W., Son, J. G., Yoon, G. S., and Cho, J. Y., 2001. Nutrient balance and runoff loading during cropping period from a paddy plot in Maryeong irrigation district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(5): 153-162.
2. Cho, J. Y., Han, K. W., Choi, J. K., Goo, J. W., and Son, J. G., 2000. Runoff loading of nutrients from a paddy field during non-cropping season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(2): 63-70.
3. Han, K. H., Yoon, K. S., Jung, J. W., Yoon, S. G., Kim, Y. J., 2005. Pollutant load characteristics of a rural watershed of Juam lake. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(3): 77-86.
4. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Hwang, H. S., Yoon, K. S., 2003. Water quality model development for loading estimates from paddy field. *Korean Journal of Limnology* 36(3): 344-355.
5. Kang, M. S., Park, S. W., LEE, J. J., Yoo, K. H., 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management* 79(1): 72-92.
6. Kim, J. S., Oh, S. Y., Oh, K. Y., 2006. Nutrient runoff from a Korean rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season. *Journal of Hydrology* 328(1-2): 128-139.

7. Ministry of Agriculture & Forestry, 2005. Agricultural & Forestry Statistical Yearbook. Gwacheon, Gyeonggi, Korea.
8. Ministry of Construction & Transportation, 2001. Water vision 2020. Gwacheon, Gyeonggi, Korea.
9. Ministry of Environment, 1995. Research Report of the Investigation of Nonpoint Source Pollution. Gwacheon, Gyeonggi, Korea.
10. Park, S. W., Yoo, S. H., Kang, M. S., 1997. Nonpoint source pollution loadings from land uses on small watersheds. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(3): 115-127.
11. Yoon, K. S., Cho, J. G., Han, K. H., Choi, J. K., Son, J. G., Cho, J. Y., 2002. Sediment Losses from a Paddy Plot during Cropping Period. *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 8(1): 69~76.
12. Yoon, K. S., Choi, J. Y., Han, K. H., Cho, J. Y., 2002. Flow weighted mean concentration and runoff-mass load relationship of pollutants derived from intensively sampled water quality data of a paddy field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 127-135.