

SWAT 모형을 이용한 미계측 유역의 수리계수 산정

이 종 소* / 김 수 전** / 김 덕 길*** / 강 나 래**** / 김 형 수*****

Estimation of Hydraulic Coefficients in An Ungaged Basin Using SWAT Model

Lee, Jong so** / Kim, Soo Jun** / Kim, Duck Gil*** / Kang, Na Rae**** / Kim, Hung Soo*****

요약 : 수리계수는 하천의 수리학적 특성을 대표하는 인자라고 할 수 있다. 따라서 우리는 하천정비기본계획에 의하여 하천을 측량하고 그 측량성과를 바탕으로 수리계수를 산정하여 왔다. 이러한 수리계수는 하천의 홍수위, 유사량, 수질 산정을 위하여 중요한 매개변수로 활용할 수 있다. 하지만, 하천 측량성과가 없는 미계측 유역의 경우 수리계수를 산정할 수 없는 한계가 있는 것이 사실이다. 이러한 문제점을 극복하고자 SWAT 모형의 방법론을 검토하고 미계측 유역에서 수리계수를 산정하는 방안을 제시하였다.

핵심용어 : 오염총량제, 수리계수, 미계측유역, SWAT 모형

Abstract : A hydraulic coefficient is a factor representing the hydraulic characteristics of the stream or river. For that reason, we survey stream characteristics such as cross section for performing the stream improvement plan and then we calculate hydraulic coefficient based on its surveyed results. This hydraulic coefficient can be used as an important parameter to calculate flood water level in stream, sediment discharge and water quality. However, we cannot calculate the hydraulic characteristics in an ungaged basin. To overcome this problem, we used the SWAT model for calculating the hydraulic coefficient in the ungaged basin.

Keywords : TMDL, Hydraulic coefficient, Ungaged basin, SWAT model

1. 서 론

수질오염총량관리제(TMDL; Total Maximum Daily Loads)에서 수질모형은 목표수질 설정을 위한 핵심요소이나, 대상하천에 대한 수리학적 기초정보의 수집이 어렵고, 서로 다른 정보가 산재되어 있을 뿐 아니라 모델구축에 활용하기에는 제한적이다. 또한, 유역 환경변화가 수질에 미치는 영향에 대한 예측을 위한 모델 입력자료 구축에 상당시간이 소요되며, 동일한 하천에 대해서도 서로 다른 수리학적 정보가 입력됨에 따라 예측 결과의 일관성 결여 및 신뢰성의 문제를 유발하

고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 환경부에서는 한강수계에 대한 Reach File을 설계 및 구축하고, 이를 활용한 수질모형 입력 자료 자동 생성 모듈 및 관련 프로그램을 개발하고 있다.

TMDL에서 수질모의를 지원하기 위해서는 QUAL2E 모델을 사용하는데, Stream Reach별 수리계수와 다양한 오염원 및 오염부하량 자료가 필요하며, 이 중 수리계수는 하천단면에 대한 수리학적 특성을 대표하는 계수로서 유량-유속, 유량-수심과의 관계를 나타낸다. QUAL2E 모델에 입력되는 수리계수는 대상 하천의 유량, 유속 및 수심자료를 회귀분석하여 구하게 되는데 이러한 수리

* 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 석사과정 · E-mail : stynrehero@naver.com
** 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 공학박사 · E-mail : soojuny@empal.com
*** 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 박사과정 · E-mail : k1004dk@hanmail.net
**** 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 석사과정 · E-mail: naraeme@naver.com
***** 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학과 정교수 · E-mail : sookim@inha.ac.kr

자료는 실측자료를 이용하거나 수리 모델을 이용하여 구한다. 일반적으로 실측자료는 수질예측구간이 광범위할때는 거의 얻기가 불가능하므로 보통 수리모델을 이용하여 구한다.

물의 수질 관리를 위하여 1990년대부터 수질 오염 관련 제도 및 연구를 시행하고 있다. 수질오염 총량관리제는 유역단위로 배출 가능한 오염물질의 총량을 정하여 규제하는 방식으로 목표치의 달성 여부에 따라 개발을 허용하거나 제한한다. (환경부,2004) 수질오염총량관리제의 수질모의를 위한 연구(권문진,2010)와 수질오염 총량관리제를 위한 수질예측모델 인자를 평가(신창민, 2009) 등은 지속적으로 이루어 지고 있지만, 수질모의를 위한 필수요소인 수리계수를 미계측유역에서 산정하는 방안은 전무하다.

일반적으로 계측유역에 대하여 수리계수를 산정하는 수리모델은 개발된 것이 많이 있으나 그 중에서 미국 공병단 수문연구소에서 개발한 HEC-RAS 모델을 많이 사용한다. 수리모델을 수행하기 위한 입력자료는 하도의 유하량, 지점수위, 하도의 조도계수, 하도의 중·횡단 측량성과 자료 및 하도상의 수리시설 관련자료 등이다. 하지만 우리나라는 모든 유역에 대하여 HEC-RAS로 하천단면 자료가 구축 되어있지 않다. 그래서 이러한 미계측 유역에 대하여 TMDL에서 수질모의를 지원하기 위해 어떻게 수리계수를 산정해 나가야 할 것인가는 매우 중요한 사항이라 할 수 있다.

따라서 이러한 구간에 대한 수리계수 산정을 위하여 SWAT모델을 이용하고자 하며, SWAT을 이용한 방법과 HEC-RAS를 이용한 방법에 의한 결과들을 비교 분석하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 수리계수 산정 이론

본 연구에서 적용하고자 하는 물의 흐름은 정상 부등류로 가정한다. 정상류는 유량이 시간에

따라 변하지 않음을 의미하고, 부등류는 유량이 공간적으로 변화함을 의미하며 이러한 특성에 대해서 요소 i에 관한 유량평형식은 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{i-1} \pm Q_{x,i} - Q_i = 0 \quad (1)$$

여기서, Q_{i-1} : 계산요소의 상류부 유량

Q_i : 계산요소의 하류부 유량

$Q_{x,i}$: 계산요소로 유입(+) 또는 유출(-)되는 측방향 유량

일단 유량평형이 결정되었다면, 각 요소에 대한 수리·수문 특성을 결정하는 것이 필요하다. 특히, 유속, 수심 및 단면적을 결정해야 한다. 계산요소의 수문학적 특성치와 유량과의 관계는 수리계수를 산정함으로써 가능하다. 맥급수 관계식은 평균 유속과 수심을 유량과 상관시키기 위하여 적용될 수 있다.

$$U = aQ^b \quad (2)$$

$$H = cQ^d \quad (3)$$

여기서, H는 평균수심이고, a, b, c 및 d는 수위-유량 관계곡선으로부터 결정되는 경험적인 상수이다.

2.2 HEC-RAS를 이용한 수리계수 산정

HEC-RAS(River Analysis System) 모형은 미 육군공병단이 개발한 하천해석 모형으로 수면 곡선을 분석하는 HEC-2 모형의 확장된 시스템이다. HEC-2 모형이 자연하천이나 인공하천에서 정상류 상태의 점변류 수면곡선을 계산하기 위해 개발되었다면 HEC-RAS 모형은 정상류뿐만 아니라 부정류, 유사현상 해석 기능까지 포함하는 종합 하천 해석 시스템이다.

HEC-RAS GUI를 통하여 하천을 모형화 할 수 있다. 여기서, HEC-RAS 모델 수행을 위해 요구되는 입력 자료의 종류에는 크게 기하학적 자료, 흐름자료, 전산해석자료 등 3가지가 있으며 기하학적 자료에는 하천망, 하천단면자료, 하천단면의 보간, 수공구조물 등이 있으며, 흐름자료에는 계산 수면형의 개수, 유량 조도계수, 축소/확대 손실 계수 등이 있다. 그리고 전산해석자료에는 흐름영역, 경계조건, 경계조건 종류 등이 있다.

2.3 SWAT을 이용한 미계측유역의 수리계수 산정

SWAT에서는 주하천, 하도들의 단면을 사다리꼴로 가정한다. 하천의 유량을 모의하기 위해서는 하도길이, 하도경사, Manning의 조도계수 'n' 뿐만 아니라, 만수일 때의 수면폭과 수심을 정의해 주어야 한다.

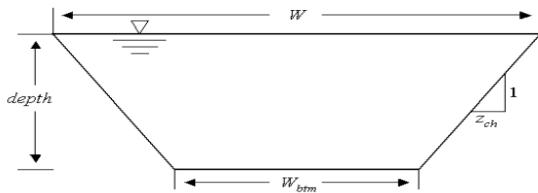


Fig 1. SWAT 모형의 하도 가정(사다리꼴 단면)

층류 흐름에 대하여 유량과 유속을 계산하기 위하여 Manning 식이 이용된다.

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} \cdot R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (4)$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (5)$$

여기서, q_{ch} : 하도에서의 유량(m^3/s)

A_{ch} : 하도에서의 흐름 단면적 (m^2)

R_{ch} : 주어진 수심에 대한 수리반경 (m)

slp_{ch} : 하도의 길이에 따른 경사 (m/m)

n : Manning의 조도계수

v_c : 유속 (m/s)

주어진 시간 간격에 대하여 수심을 계산하기 위하여 다음과 같이 정리된다.

$$depth = \sqrt{\frac{A_{ch}}{z_{ch}} + \left(\frac{W_{btm}}{2 \cdot z_{ch}}\right)^2} - \frac{W_{btm}}{2 \cdot z_{ch}} \quad (6)$$

여기서, $depth$: 수심 (m)

A_{ch} : 주어진 수심에 대한 흐름 단면적 (m^2)

W_{btm} : 하도의 바닥폭 (m)

z_{ch} : 하도 측면경사의 역수

따라서 유량과 유속 계산에 필요한 모든 값이 결정되고, 식 (2)와 식 (3)에 대한 수리계수를 산정할 수 있다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역

본 연구에서는 하천정비기본계획 미수립 구간에 대한 수리계수 산정을 위하여 Fig 2 와 같이 경안천 유역을 선정하였다. 경안천(지방2급) 유역은 국가하천 경안천의 상류부인 동경 127° 16' 47"~127° 14' 40", 북위 37° 11' 8"~37° 21' 1" 사이에 위치하고 있는 한강 제1지류로서 동측으로 경안천의 최대 지류인 곤지암천 유역, 청미천 유역과 경계를 이루고 있으며, 남측으로 진위천 유역, 서측으로는 탄천 유역과 각각 경계를 이루고 있는 유역으로 유역면적 561.12 km^2 이고, 유로연장 47.40 km , 유역둘레 136.78 km , 유역평균폭 11.84 km , 유역경사는 27.01% 이다. 경안천은 광주산맥이 유역의 분수령을 이루고 있으며,

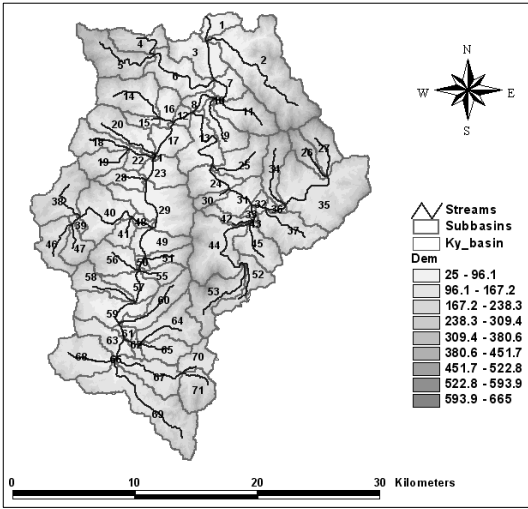


Fig 2. 경안천 유역

경기도 용인시 호동 문수봉에서 발원하여 북서류하다 용인시를 관류하면서 방향을 북으로 바꾸어 광주시를 관류하고 경안천 최대 지류인 곤지암천과 합류한 후 수도권의 상수원인 팔당호로 합류하는 하천이다.

3.2 HEC-RAS 모형을 이용한 수리계수 산정

우선, 기하학적 자료를 구성하여야 하며 우리나라의 경우 하천정비기본계획의 하천 단면 측량 성과를 활용할 수 있다. 하천 측량 성과를 활용하여 Fig. 3과 같이 Reach를 구성할 수 있으며 Fig. 5와 같이 하천 단면을 입력하여 하천의 기하학적 정보를 구성할 수 있다.

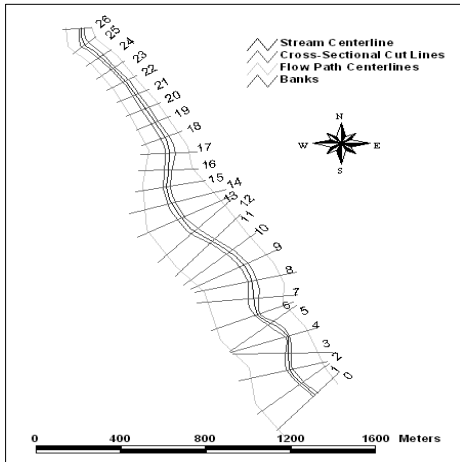


Fig 3. HEC-RAS 입력자료 구축 예시

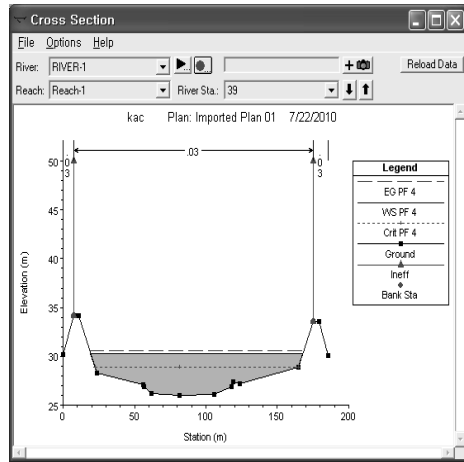


Fig 4. 유량에 따른 수위의 계산

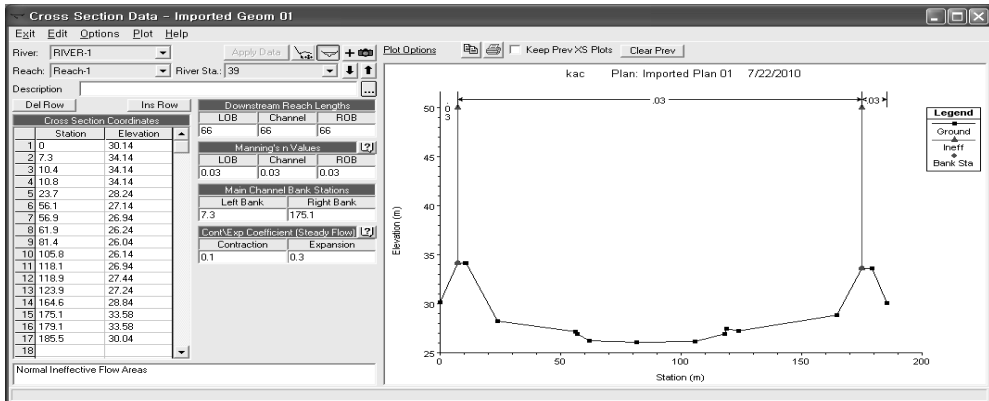


Fig 5. HEC-RAS 이용한 단면 자료의 입력 예시

기타 하천길이 및 조도계수, 단면축소계수, 단면확대계수 등의 기하정보 및 흐름정보가 구성되면 경계조건을 입력하여 입력 유량에 따른 수위를 계산(Fig. 4 참고)함으로써 수면곡선을 산정할 수 있다. HEC-RAS에서는 유량-수위 관계, 유량-유

속 관계를 도시하는 GUI를 Fig. 6 및 Fig. 7 과 같이 지원한다. 이러한 관계를 통하여 수심계수, 수심지수, 속도계수, 속도지수와 같은 수리계수를 산정할 수 있다.

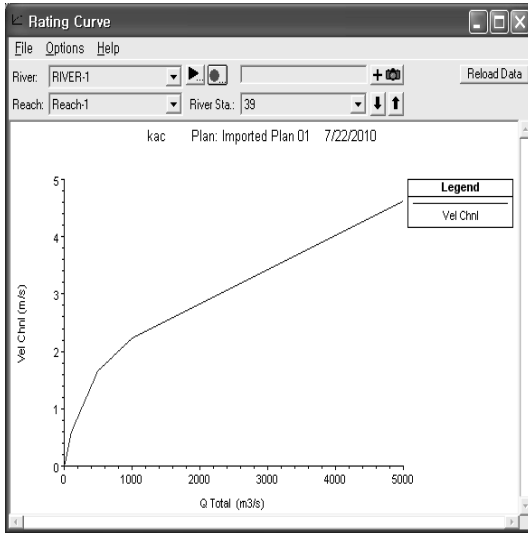


Fig 6. 유량-수위 관계 곡선

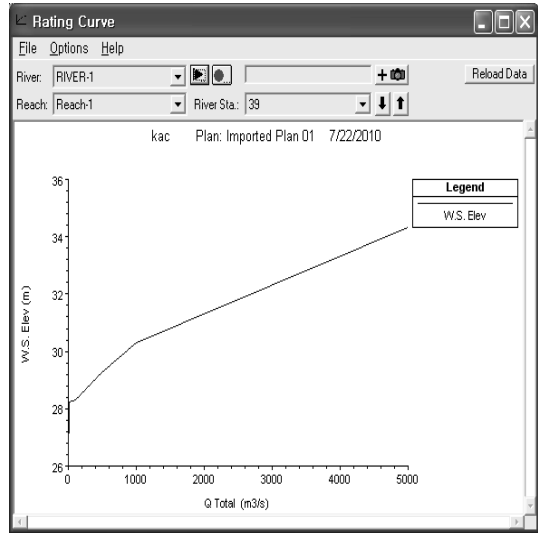


Fig 7. 유량-유속 관계 곡선

Fig. 8 및 9와 같이 각 단면에 대한 유량-유속, 유량-수심에 대한 회귀방정식을 지수식으로 작성하여 수리계수를 산정하였다. 여기서 회귀방정식

의 계수 및 지수는 하천출구점 기준의 누가거리에 따라 각 단면별로 데이터베이스화 할 수 있도록 Table 1과 같이 제시하였다.

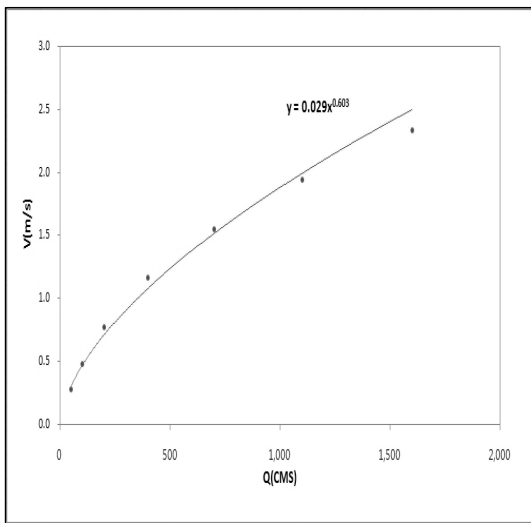


Fig 8. 유량-유속 회귀방정식 결과 예시

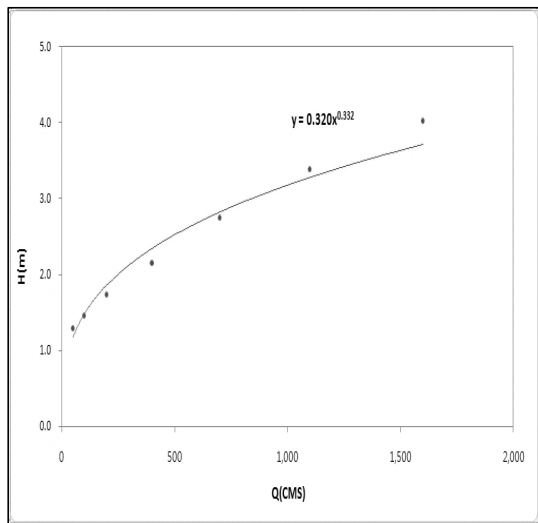


Fig 9. 유량-수심 회귀방정식 결과 예시

Table 1. 수리계수 산정 결과 및 추가적인 하천 정보

Reach	$V = aQ^b$ (V:m/s, Q:CMS)		$H = cQ^d$ (H:m, Q:CMS)		하상경사 [m]	누가거리 [m]	조도계수
	속도계수(a)	속도지수(b)	수심계수(c)	수심지수(d)			
89	0.0290	0.6038	0.3205	0.3322	0.00004	22,433	0.03
88	0.0220	0.6386	0.5020	0.2678	0.00004	22,293	0.03
87	0.0174	0.6709	0.4882	0.2782	0.00936	22,043	0.03
86	0.0100	0.7333	0.6943	0.2442	0.00976	21,793	0.03
85	0.1485	0.3848	0.1312	0.4236	0.00052	21,543	0.03
84	0.1526	0.3213	0.0750	0.5089	0.00012	21,293	0.03
83	0.0301	0.5715	0.2527	0.3669	0.00008	21,043	0.03
82	0.0218	0.6362	0.3688	0.3150	0.01024	20,793	0.03
81	0.0163	0.6623	0.3855	0.3138	0.00972	20,553	0.03
80	1.6913	0.0564	0.0488	0.5652	0.00000	20,285	0.03
.
.
.
9	0.0171	0.6496	0.9587	0.1323	0.0002	2,250	0.03
8	0.0090	0.7697	1.9651	0.0425	0.00476	2,000	0.03
7	0.2280	0.3035	0.0608	0.4301	0.00828	1,750	0.03
6	1.3661	0.0578	0.0221	0.6088	0.00384	1,500	0.03
5	0.2491	0.2973	0.0640	0.5130	0.00024	1,250	0.03
4	0.0265	0.6271	0.3255	0.3200	0.00056	1,000	0.03
3	0.0668	0.4910	0.2583	0.2888	0.00332	750	0.03
2	0.1085	0.4069	0.0817	0.4377	0.01896	500	0.03
1	0.8906	0.1755	0.0786	0.3551	0.06368	250	0.03
0	0.1986	0.2833	0.0485	0.4256	0.0476	0	0.03

3.3 SWAT 모형을 이용한 수리계수 산정

3.3.1 SWAT 모형을 이용한 경안천 유역의 지형 자료 구축

경안천 유역에 대한 1:25,000 수치지도를 활용하여 30m×30m DEM을 구성하였다. 그리고 한강 유역에 대하여 구축한 Reach File을 이용하여 하천을 구성함으로써 Fig 10 과 같이 경안천 유역의 SWAT 모형을 구축하였다.

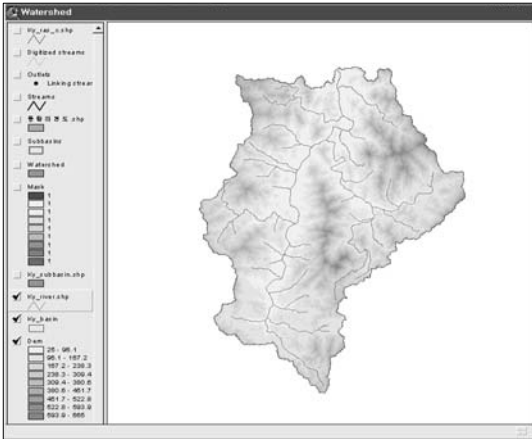


Fig 10. 경안천 유역에 대한 SWAT 모형의 구축

기존 하천망(지방하천 수준)과 유사한 하천이 형성될 수 있도록 Threshold Area를 200ha로 설정하여 하천을 생성하였다. 또한, 하천망 구축 시 입력한 Reach File의 개수와 같은 개수가 추출될 수 있도록 유역출구를 기존 유역출구와 동일하게 정의하였다.

3.3.2 경안천 유역의 Reach 별 수리학적 인자 추출

각 Reach는 SWAT에서 가정한 사다리꼴 형상의 하천 생성 결과를 보여주게 된다. 총 71개의 Reach 중 하천정비기본계획이 수립되어 있는 구간은 다음과 같이 하류 부근이며 Fig 11과 같이

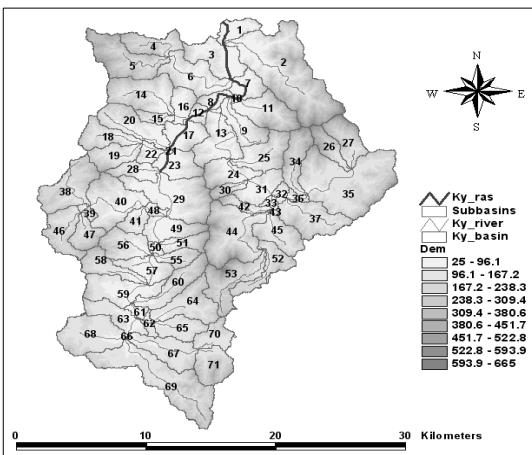


Fig 11. 경안천의 하천정비기본계획 수립구간

Table 2. 경안천의 Reach 별 수리특성 인자 추출

Reach	유역면적 (km ²)	하도 길이 (m)	하도 경사 (%)	하천 폭 (m)	하천 깊이 (m)
1	56,087.55	490.48	0.10	57.53	1.63
3	51,899.04	3,388.24	0.18	54.91	1.58
7	47,457.36	2,534.94	0.32	52.04	1.53
10	45,806.85	704.57	0.57	50.95	1.51
8	45,046.17	2,817.38	0.43	50.44	1.50
12	28,861.83	1,950.38	0.36	38.62	1.25
17	26,527.32	3,171.32	0.16	36.71	1.21
21	24,751.89	332.13	0.30	35.22	1.18
23	23,026.41	2,078.53	0.24	33.72	1.15

총 9개의 Reach를 포함한다. 경안천의 하천정비 수립구간에 대하여 SWAT 모형을 이용하여 추출한 하도정보는 유역면적, 하도길이, 하도경사, 하천폭, 하천깊이이다. 이러한 수리특성 인자를 추출한 결과는 Table 2 와 같다.

3.4 비교 및 분석 결과

하천정비기본계획의 미수립 하천에 대하여 SWAT 모형을 이용하여 산정한 수리계수가 얼마나 타당한 결과를 보여주는지에 대한 검증은 수행하고자 실제 하천정비기본계획에서 하천단면 측량 성과를 이용하여 산정한 HEC-RAS 모형의 결과인 수리계수와 비교하였다. 우선 HEC-RAS 모형으로 산정하여 단면별 수리계수에 대한 Reach별 대표값을 산정하기 위하여 조화평균을 이용하였으며, 그 결과를 정리하면 Table 3 과 같다.

SWAT 모형을 이용하여 추출한 수리특성 인자를 이용해 산정한 하천정비수립구간에 대한 수리계수는 Table 4 와 같으며, 각 수리계수를 비교한 결과는 Fig. 12 와 같이 나타났다.

Table 3. 경안천의 Reach 별 수리특성 인자 추출 (HEC-RAS)

Subbasin	속도 계수 (a)	속도 지수 (b)	수심 계수 (c)	수심 지수 (d)	누적 거리 (m)
1	0.195	0.257	0.066	0.403	500
3	0.032	0.284	0.099	0.152	4,000
7	0.077	0.302	0.122	0.344	6,500
10	0.129	0.391	0.144	0.418	7,400
8	0.013	0.510	0.084	0.245	9,972
12	0.040	0.412	0.066	0.252	12,043
17	0.135	0.221	0.079	0.492	15,103
21	0.347	0.092	0.046	0.521	16,023
23	0.190	0.289	0.105	0.332	17,523

Table 4. 경안천의 Reach 별 수리특성 인자 추출 (SWAT)

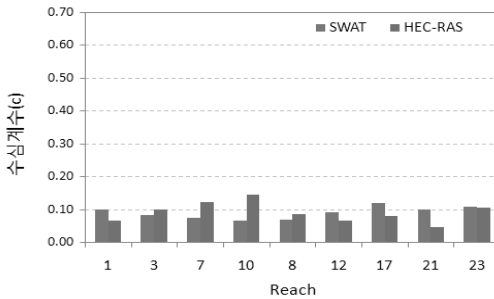
Subbasin	속도 계수 (a)	속도 지수 (b)	수심 계수 (c)	수심 지수 (d)	누적 거리 (m)
1	0.250	0.356	0.098	0.581	490
3	0.294	0.363	0.082	0.589	3,879
7	0.359	0.364	0.072	0.587	6,414
10	0.445	0.357	0.066	0.572	7,118
8	0.396	0.364	0.067	0.588	9,936
12	0.451	0.346	0.089	0.574	11,886
17	0.368	0.336	0.119	0.569	15,057
21	0.445	0.342	0.098	0.575	15,389
23	0.428	0.337	0.109	0.572	17,468



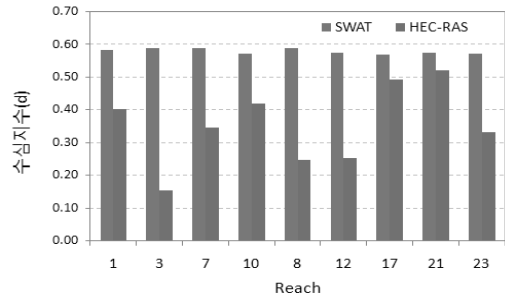
(a) 속도 계수



(b) 속도 지수



(c) 수심 계수



(d) 수심 지수

Fig 12. 수리계수 산정 결과 비교

비교 분석한 결과 SWAT 모형으로 산정한 결과를 살펴보면 우선, SWAT 모형은 각 Reach별로 수리계수의 변동폭이 작음을 알 수 있었지만 실제 측량성과를 이용한 HEC-RAS의 경우 수리계수의 변동폭이 상당히 큼을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 미계측유역의 수리계수를 산정하는 방안을 마련하기 위하여, 경안천 유역에 실제측량성과를 이용하여 수리계수를 산정하여 보고, SWAT 모형으로 미계측유역이라 가정하여 수리계수를 산정한 뒤 비교 분석 하였다.

연구 결과를 통하여 보면, 하천정비기본계획이 수립되어 있는 경안천 유역에 대해, 실제측량 성과를 이용한 HEC-RAS의 경우 수리계수의 변동폭이 상당히 큼을 알 수가 있었다. 하지만 동일 유역에 대해 실제측량 성과가 없다고 가정할 경우 SWAT 모형에 대해서는 수리계수 산정값의 변동폭이 작음을 알 수가 있었다. 이는 우리나라의 하천이 자연하천이 아닌 정비된 제방하천이기 때문에 자연하천으로 고려하여 수리계수를 산정하는 SWAT 모형의 특성 때문이라고 판단되었다.

따라서 추후 위성영상 자료, 수치지도 및 GIS Tool을 통하여 우리나라에 적용 할 수 있는 미계측구간에 대한 하천수리계수를 산정할 수 있도록 방법론을 개선하는 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 연구용역사업의 일환인 「낙동강 및 영산강수계 한국형 Reach File 구축」 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 1998, 경안천 하천정비기본계획 (보완)
2. 건설교통부, 1992, 한강 수계치수기본계획
3. 광주시, 2004, 경기도 광주시 수질오염총량관리계획
4. 국립환경연구원, 2004, 오염총량관리를 위한 하천수질모델의 개발(I)
5. 국토해양부 한강홍수통제소, 2008, 한국하천일람
6. 박지혜, 2001, 경안천 유역의 오염총량관리제 도입을 위한 오염삭감량 산정에 관한 연구, 수원대학교 석사학위논문
7. 백경호, 2010, SWAT 모형을 이용한 경안천유역의 홍수기 비점오염원 특성 분석, 인하대학교 석사학위논문
8. 장대원, 2004, GIS 기반의 SWAT 모형을 이용한 하천 유출량 모의, 인하대학교 석사학위논문
9. Linfield B. and Barnwell, T., 1987, The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, USEPA/600/3-87/007. USEPA, Env. Res. Lab., Athens, GA
10. Diluzio M , Srinivasan R. , Arnold J.G. , 2001. ArcView Interface for SWAT2000, USDA ARS, Temple, Texas
11. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2001, Soil and Water Assessment tool, Theoretical Documentation Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas

논문접수일 : 2011년 05월 18일
 심사의뢰일 : 2011년 05월 20일
 심사완료일 : 2011년 08월 25일