

ORIGINAL ARTICLE

제주도 남부지역의 유출 특성

강명수 · 양성기* · 정우열 · 김동수¹⁾

제주대학교 토목공학과, ¹⁾단국대학교 토목환경공학과

Characteristics of Runoff on Southern Area of Jeju Island, Korea

Myung-Su Kang, Sung-Kee Yang*, Woo-Yeol Jung, Dong-Su Kim¹⁾

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

¹⁾Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Abstract

For Kangjeong stream and Akgeun stream in the central part of the southern Jeju Island, on-site discharge estimation was carried out for approximately 10 months (July 2011-April 2012) twice a month on a regular basis by using ADCP (acoustic doppler current profiler) and long term rate of discharge was calculated by using SWAT (soil and water assessment tool) model. The discharge was 0.28-1.30 m³/sec for Kangjeong stream and 0.10-1.54 m³/sec for Akgeun stream. It showed the maximum in the summer and the minimum in the winter. As a result of parameter sensitivity analysis of SWAT model, CN (NRCS runoff curve number for moisture condition II), SOL_AWC (available water capacity of the soil layer), and ESCO (soil evaporation compensation factor) showed sensitive responses. By using the result, the model was corrected and the rate of discharge was calculated. As a result, the annual discharge rate was 27.12-31.86(%) at the Akgeun basin and 23.55-28.43(%) at the Kangjeong basin.

Key words : ADCP, SWAT, Sensitivity analysis, Jeju Island

1. 서론

제주도는 화산섬으로서 투수성이 높은 현무암질 화산암을 기반으로 형성되어 있어 국내 최대 강우지역이지만 총 강우량의 약 절반이 지하로 침투하여 대부분의 하천들은 건천을 이루고 있다(Jung과 Yang, 2009).

하천은 한라산 정상부를 중심으로 남·북사면을 따라 지방하천 60개와 소하천 83개가 분포하고 있다. 투수성이 높은 지질학적 특성과 급한 하상 경사, 짧은 유하거리 등의 수문학적 특성으로 특정한 강우강도 이상에만 유출이 발생한 후 1~2일 이내로만 지속되

어 지표수의 이용과 개발에는 한계가 있다. 이러한 특성으로 인하여 제주도민의 모든 용수는 전적으로 지하수에 의존하고 있다(Yang, 2007). 그러나 일부 하천의 경우 해안과 가까운 지점의 하상과 측벽에서 용천수가 기저유출의 형태로 유출되어 상시흐름을 형성하고 있으며, 상시하천 중에서 외도천과 강정천은 1970년대부터 상수원으로 개발되어 이용되고 있다(Moon 등, 2005).

수자원을 지하수에 전적으로 의존하고 있는 제주도는 기후변화와 가뭄 등에 대비하여 상시 하천수의 이용에 대한 체계적인 연구와 정밀한 유량 조사가 필

Received 3 December, 2012; Revised 11 March, 2013;

Accepted 5 April, 2013

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요하지만, 상시하천에 대한 조사는 매우 미흡한 실정이며 지표수 관련 기초자료도 매우 부족한 편이다.

Moon 등(2005)은 상시 하천수의 흐름이 유지되는 제주도의 주요 하천(외도천, 옹포천, 강정천, 연외천)을 대상으로 FLOW-MATE(MODEL, 2000)를 이용하여 매월 1회 유속을 관측한 자료를 이용하여 연간 기저유출량의 규모를 산정하는 연구를 진행하였고, Jung과 Yang(2008)은 제주도 주요하천(천미천, 외도천, 옹포천, 연외천)에 SWAT 모델을 이용하여 장기 일 유출량을 모의하였다. Han과 Yang(2009)은 제주도 북부지역의 외도천을 대상으로 SWAT 모델을 이용하여 과거와 현재의 토지이용변화에 따른 유출량을 비교·분석하였다.

향후 기후변화에 대비하여 상시 하천수를 수자원으로 활용하기 위해서는 정밀한 관측기기를 이용하여 정기적인 유량 관측을 수행하고 모델링 기법을 이용하여 장기간의 유량 자료를 확보하여야 한다.

본 연구에서는 제주도 남부지역에 위치한 강정천과 약근천을 대상으로 최신 계측기기인 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 상시 유량을 정기적으로 관측하고 준 분포형 강우-유출 모델인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모델을 적용하여 장기간의 유출량을 산정하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 연구방법

제주도 상시하천의 수자원 해석을 위하여 기저유

출성분인 용천수로 인하여 상시적으로 흐름이 형성되는 제주도 남부 약근천과 강정천을 연구대상구역으로 선정하였다(Fig. 1). 정밀한 상시 유량을 관측하기 위하여 ADCP를 이용하여 2주에 1회씩 정기적으로 유량을 관측하였으며, 압력식 수위계인 DIVER를 이용하여 수위자료를 확보하였다. SWAT 모형에 필요한 GIS 입력자료는 크게 5가지(DEM, 토지피복도, 토양도, 유역의 경계, 하천의 형태) 나누어진다. 유역의 경계와 하천의 형태는 모형 내부에서도 모의되기 때문에 유역별로 DEM, 토지피복도, 토양도 자료를 구축하여 사용하였다. SWAT 모델의 유출량 산정에 사용되는 수문·기상자료는 기상청 관할 AWS 및 기상관측점 자료를 수집하고 분석하여 사용하였다.

SWAT 모델에서 제공하는 수문학적 매개변수 중에서 유출에 관련된 매개변수를 추정하여 민감도 분석을 수행하였으며, 관측 유량과 모델 결과의 적합성을 판단하기 위하여 평균제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 모형 효율성 계수(Model Efficient, ME)를 목적함수로 사용하였다.

2.2. 연구대상유역

약근천과 강정천은 상시 흐름을 형성하는 하천으로 약근천의 유로연장은 12.11 km이고 유역면적은 23.67 km²이며 비교적 급한 하상경사를 이루고 있으며, 강정천은 유로연장은 16.63 km이고 유역면적은 36.54 km²이며 약근천과 유사하게 하상경사가 1/12~1/37 로 비교적 급경사를 이루고 있다.

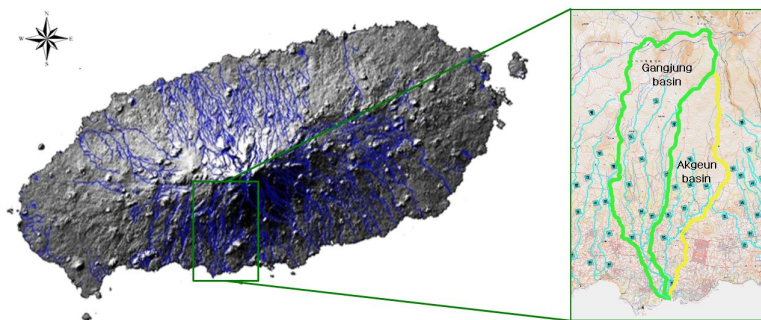


Fig. 1. Basin for the study.

2.3. 하천유량 관측

ADCP는 비접촉식으로 3차원 유속과 수심자료를 매우 효율적이고 빠르게 측정하며 그 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 속도 측정방법과 비교하면 매우 세밀하다. ADCP를 활용한 유량관측은 현존하는 유량 관측 기법 중 매우 정확한 기법으로 알려져 있으며 미국 지리조사소(USGS; United States Geological Survey)의 약 57%의 유량관측소에서 수위-유량 곡선 구성을 선택, 케이블, 교량 등에서 실시한 ADCP 관측을 통해 이루어지고 있으며 그 비중은 계속 높아지고 있다 (Muste 등, 2007).

본 연구에서는 강정천과 약근천을 대상으로 2011년 7월부터 2012년 4월까지 2주에 1회 정기적으로 ADCP를 이용하여 하천의 기저유출량을 관측하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 2011년 10월 14일과 11월 25일에는 관측기기 점검으로 관측을 수행하지 못하여 모델 보정에는 사용되지 않았다.

Table 1. Baseflow discharge using ADCP

Date	Kangjeong stream	Akgeun stream
	ADCP (m^3/sec)	ADCP (m^3/sec)
2011.07.22	1.025	1.2453
2011.08.06	1.304	1.3103
2011.08.19	1.309	1.4788
2011.09.02	1.104	1.5405
2011.09.16	1.115	1.3603
2011.09.30	1.188	1.1693
2011.10.14	-	-
2011.10.28	0.864	0.7400
2011.11.11	0.828	0.7330
2011.11.25	-	-
2011.12.09	0.661	0.7023
2011.12.23	0.599	0.5218
2012.01.06	0.519	0.614
2012.01.20	0.540	0.383
2012.02.03	0.455	0.324
2012.02.16	0.285	0.105
2012.03.02	0.354	0.226
2012.03.16	0.333	0.334
2012.03.31	0.388	0.385
2012.04.13	0.550	0.323
2012.04.27	0.819	0.827

2.4. SWAT 모델의 입력자료 구축

2.4.1. 유역의 수문·기상 자료

SWAT 모형에서 유출량 산정에 사용되는 기본적인 수문·기상자료는 강우, 최고·최저기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등이 있다. 이외에도 관측소의 위치 정보를 나타내는 입력자료 및 관측 유출량 자료 그리고 저수지 수위 등에 따라 선택적으로 요구된다(Jung 과 Yang, 2008). 제주도에 기상청 관할 7개 지점 기상대 관측 자료와 20개 AWS 관측지점이 있다. 대상 유역이 속해있는 AWS 관측지점(윗세오름, 하원, 서귀포)의 기간별 자료를 수집·분석하여 모델의 입력 자료로 사용하였으며, 서귀포 기상대의 기상자료(최고기온, 최저기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등)를 수집·분석하여 사용하였다.

2.4.2. 유역의 GIS 입력자료

DEM(Digital Elevation Model)은 수치지도에서 추출한 등고선을 이용하여, 1초(30 m) 간격의 격자단위로 표고값을 표현한 자료로서 USGS에서 전 세계를 대상으로 구축한 수치고도 자료이다. 대상유역의 DEM은 환경부에서 제공하는 30 m × 30 m 해상도의 DEM을 arcInfo를 이용해 가공하여 사용하였다(Fig. 2). DEM 분석결과 강정천 유역은 0~1,710 m의 표고를 보이며 유역평균 표고는 769 m로 나타났으며, 약근천 유역은 0~1,410 m의 표고를 보이며 유역평균 표고는 451 m로 나타났다.

토지피복도는 2000년 Landset 위성영상을 이용하여 피복 분류된 자료를 이용하여 연구대상유역의 토지피복도(Landuse map)자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하여 사용할 것이며, 토양 자료는 농업과학기술원의 농업토양정보시스템(ASIS) 제공하는 1:25000 정밀 토양도를 기초로 NRCS 수문학적 토양유형 분류(Lee, 2008)를 적용하여 입력자료로 구축하여 사용하였다(Fig. 2).

강정천 유역의 토지피복상태는 전체유역면적 중 산림지역이 29.25 km²으로 76.5%를 차지하고 있으며, 과수원이 4.78 km²으로 12.5%, 초지가 3.57 km²으로 9.34%, 주거지가 0.6 km²으로 1.59%를 차지하고 있는 것으로 분석되었으며, 약근천 유역은 전체유역면적 중 산림지역이 9.83 km²으로 76.9%를 차지하

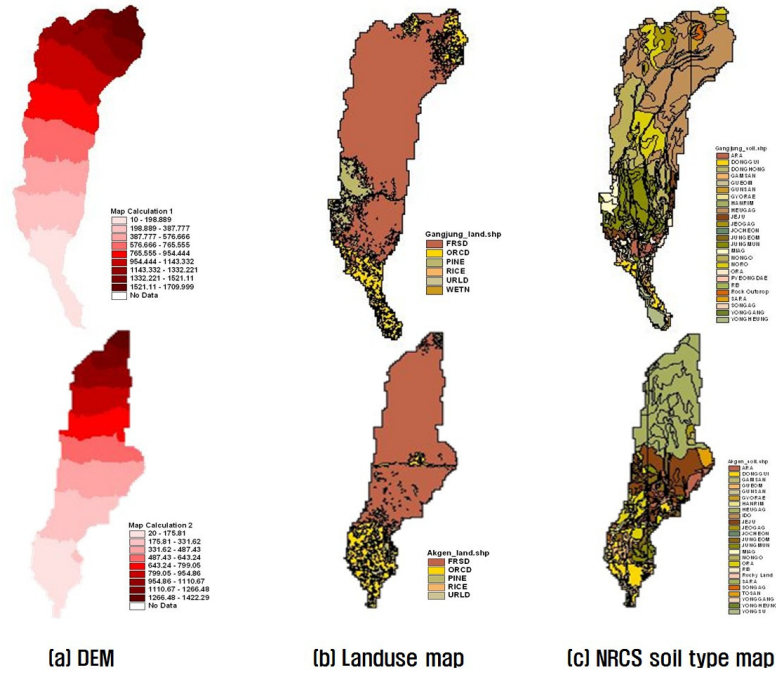


Fig. 2. DEM, landuse map and soiltype map of studies basin.

고 있으며, 과수원이 3.97 km²으로 16.8%, 초지가 0.64 km²으로 2.74%, 주거지가 0.75 km²으로 3.21%를 차지하고 있다(Table 2).

Table 2. Landuse in the watershed

Landuse	Kangjeong basin		Akgeun basin	
	Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)
Forest	29.25	76.5	18.10	77.0
Grassland	4.78	12.5	3.97	16.9
field	3.57	9.3	0.64	2.7
City	0.61	1.6	0.75	3.2
The others	0.03	0.1	0.04	0.2

강정천 유역은 총 25개의 토양통으로 이루어져 있으며, 흑악통이 38.34%로 가장 많이 차지하고 있고 중문, 논고, 노로 통의 순서로 많은 분포를 보이고 있다. 약근천 유역은 총 25개의 토양통으로 이루어져 있으며, 흑악통이 41.85%로 가장 많이 차지하고 있고 제주, 동귀, 오라 통의 순서로 많은 분포를 보이고 있다(Table 3).

3. 결과 및 고찰

3.1. SWAT 모델 매개변수 민감도 분석

수치적 민감도 분석은 시스템 출력의 변화가 모형

Table 3. Soil type in the watershed

Soil series	Kangjeong basin			Soil series	Akgeun basin		NRCS soil group
	Area(km ²)	Ratio(%)	SCS soil group		Area(km ²)	Ratio(%)	
Heugak	14.66	38.3	A	HEUGAG	9.84	41.9	A
Jungmun	5.06	13.2	C	JEJU	3.80	16.2	C
Nongo	4.90	12.8	B	DONGGUI	1.70	7.2	C
Noro	3.42	8.9	B	ORA	1.54	6.6	C
The others	10.20	26.7	-	The others	6.63	28.2	-

Table 4. Rate of change of direct runoff according to the rate of major parameters at basins excepting of a stream

Parameter	Runoff	-100%	-50%	0	50%	100%
CN_2	WATER YIELD	-6.38	-3.34	0	3.63	7.56
	GWQ	95.74	9.22	0	-52.48	-79.43
	SURQ	-28.73	-15.05	0	16.53	34.29
ESCO	WATER YIELD	5.63	-0.82	0	2.08	6.83
	GWQ	198.58	-14.18	0	34.75	380.14
	SURQ	6.46	-0.65	0	2.38	7.53
SOL_AWC	WATER YIELD	-3.79	-1.66	0	2.33	4.52
	GWQ	557.45	132.62	0	-35.46	-41.14
	SURQ	1.83	0.89	0	-1.93	-4.19

매개변수를 약간 수정하여 모형화된 시스템을 가장 잘 나타내주기 위해 모형 매개변수를 섭동하여 모의 결과와의 관계를 분석하는 것이다. 민감도 분석의 기본 목적은 특별하게 민감한 모형 매개변수를 식별하는 것이다. 그래서 가장 비슷한 값으로 잘 수행하는 해를 선택하고 더 정확하게 매개변수를 추정하여 효율성을 높이는 것이다(Jung과 Yang, 2008).

물리학적 매개변수는 매개변수보정의 대상이 되지 않으므로 수문학적 매개변수 중 유출에 관련된 매개변수를 민감도분석을 실시할 매개변수로 선정하였다. SWAT 모형의 매개변수 중에서 지리적 특수성을 띄고 있는 제주도 하천에 대하여 선행된 연구(Jung과 Yang, 2008; Han과 Yang, 2009)를 참조하여, SWAT 매개변수 중 지하수 부분 매개변수 GW_REVAP(얕은 대수층 REVAP 계수), REVAPMIN(침루에 대한 얕은 대수층의 임계 수분량), GWQMN(기저유량에 대한 얕은 대수층의 임계 수분량), ALPHA_BF(기저유출 감수 상수)를 비롯하여 CN_2(AMC-II 조건에서의 SCS 유출곡선지수), ESCO(토양증발 보상계수), CH_K2(하천에서의 수리전도도 계수), SOL_AWC(토양층 유효수분량)를 포함한 총 8 개의 매개변수를 선정하여 기준값에서 각각 $\pm 50\%$, $\pm 100\%$ 의 value 값을 변화시키면서 연구를 진행하였다.

서로 인접해 있는 연구대상유역(악근천, 강정천)에 대하여 하천유출량, 지하수량, 직접유출량의 모의 결과를 대상으로 8개의 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 CN_2, ESCO, SOL_AWC 의 매개변수가 가장 민감한 반응을 나타냈다(Table 4). CN_2의 변화에 따

라 직접유출량은 $\pm 30\%$ 정도 변화하였으며, 지하수유출량은 ± 90 까지 변화하였다(Fig. 3). ESCO는 지하수유출량에 가장 민감하게 반응하였으며, 200~400까지 변화하는 것으로 나타났다(Fig. 4). SOL_AWC 역시 지하수유출량에 가장 민감하게 반응하였으며, 매개변수 변화에 따라 500까지 변화하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

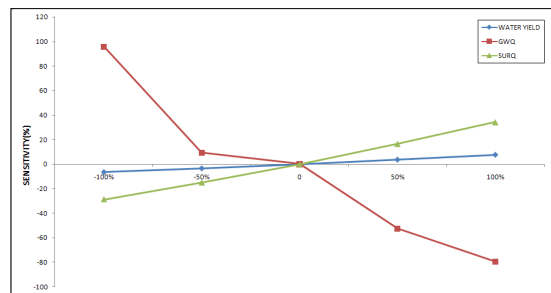


Fig. 3. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter CN_2 of a basin.

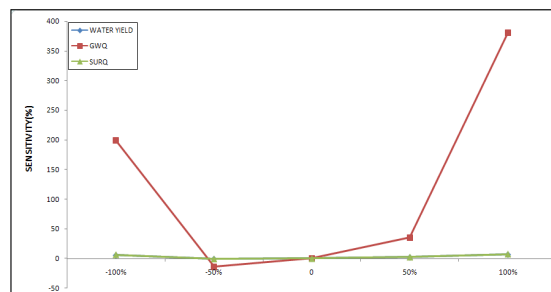


Fig. 4. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter ESCO of a basin.

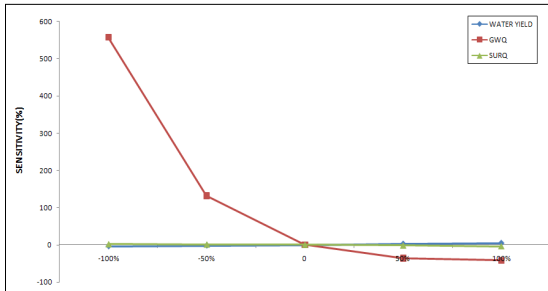


Fig. 5. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter SOL_AWC of a basin.

CN_2, ESCO, SOL_AWC 를 제외한 나머지 매개 변수에 대한 민감도 분석에서는 총 유출량과 직접유출량은 value 값에 따라 1% 미만의 반응을 보였으며, 지하수량의 경우에만 각 매개변수별 값의 미세한 변화에도 민감도가 매우 큰 반응을 보여 지하수 유출에 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서 모델의 적용은 CN_2를 -7 하향 고정, ESCO +0.8, SOL_AWC +0.03 상향하여 모의결과 값을 보정하였다. 보정 결과 결정계수 R^2 값은 0.75, 평균제곱근오차(RMSE) 값은 0.13 으로 나타났다.(Fig. 6).

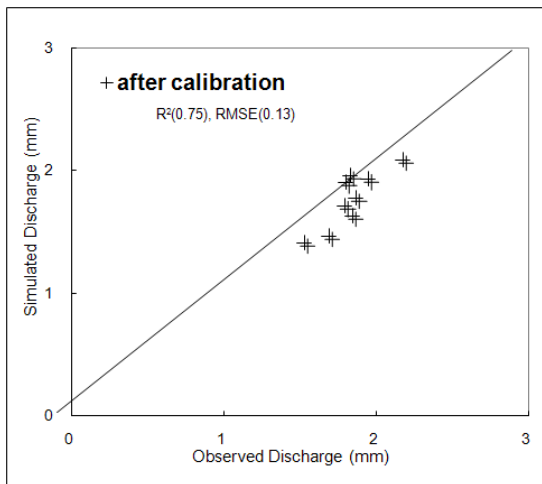


Fig. 6. Result of calibration.

3.2. 유출량 산정 결과

본 연구에서 연구대상기간(2009.1.~2012.4.)동안의 직접유출량을 산정한 결과는 Fig. 7~8 과 같다. 약

근천 유역의 직접유출율은 연간 27.12~31.86%, 강정천 유역은 연간 23.55~28.43% 가 직접유출로 발생하는 것으로 분석되었다(Table 5.).

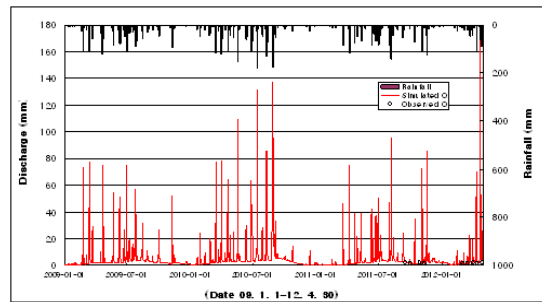


Fig. 7. Result of runoff simulation of the basin of Akgeun stream.

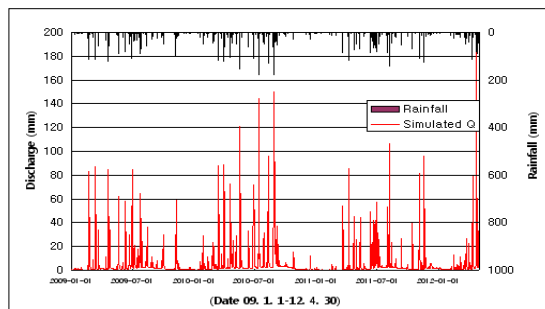


Fig. 8. Result of runoff simulation of the basin of Kangjeong stream.

Table 5. Surface runoff calculation result in years

Basin	Year	Rainfall (mm)	Surface runoff (mm)	Runoff rate (%)
Akgeun	2009	1,830	496.1	27.12
	2010	2,468	786.4	31.86
	2011	1,837	532.1	28.97
Kangjeong	2009	2,152	506.8	23.55
	2010	2,903	825.3	28.43
	2011	2,161	546.5	25.29

4. 결론

육지부외는 상이한 지질학적 특성으로 건천으로 형성되어 있는 대부분의 제주도 하천과는 달리 기저

유출 성분인 용천수가 상시적으로 흐르고 있는 도내 9 개 하천 중 제주도 남부 서귀포시의 주 식수원으로 사용되는 강정천과 이에 근접한 악근천의 유출특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

본 연구에서는 연구대상기간(2009년 1월~2012년 4월) 동안의 수문·기상자료를 구축하고, 준 분포형 강우-유출 모델인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모델을 적용하여 장기간의 유출량을 산정하였다. 정확한 유출량 산정을 위하여 세계적으로 정밀성을 인정받는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 유속계를 이용하여 19회(2011년 7월~2012년 4월, 매 2주 간격)에 걸친 실제하천유량을 관측하여 모델에 적용하였고, 유출에 영향을 미치는 매개변수를 대상으로 민감도 분석을 실시하여 매개변수의 반응성 검토 및 연구대상구역 모형 적용의 검·보정 자료로 활용하였다. 매개변수 민감도분석 결과 수문학적 매개변수 중 유출에 민감한 반응을 나타내는 매개변수 8 개 중 CN₂, SOL_AWC, ESCO 의 매개변수가 총 유출, 직접 유출, 지하수 유출에 민감한 반응을 보였으며, 그 중 CN₂가 가장 민감한 반응을 나타냈다. 매개변수 CN₂를 -7 하향 고정, ESCO +0.8, SOL_AWC +0.03 상향 보정결과 R²는 0.75, 평균제곱근오차(RMSE) 0.13으로 나타났으며, 연도별 하천 유출율은 악근천 유역 27.12~31.86%, 강정천 유역 23.55~28.43%로 분석되었다.

이상의 결과에서 연구대상구역의 일 유출량 모의는 전반적으로 우수하게 나타났으며, 향후 정기적인 관측 외 강우시의 유출 자료를 고려한 후속 연구가 진행된다면 기저유출성분에 대한 더욱 정밀한 분석이 도출될 것으로 판단된다. 이와 같은 연구 결과는 국내 내륙지역과는 상이한 지질구조를 가진 제주도의 물순환 해석과 수자원개발 및 수자원정책수립 등을 위한 중요한 기초자료로서 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- Han, W. K., Yang, S. K., 2009, A runoff simulated using SWAT model depending on changes to land use in Jeju island, J. Environ. Sci., 18(9), 1057-1063.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2008, Application of SWAT model on rivers in Jeju island, J. Environ. Sci., 17(9), 1039-1052.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2009, Simulation of runoff of rivers in Jeju island using SWAT model, J. Environ. Sci., 18(9), 1045-1055.
- Lee, J. S., 2008, Hydrology, Goomibook, 396-399.
- Moon, D. C., Yang, S. K., Koh, K. W., Park, W. B., 2005, Estimation of baseflow discharge through several streams in Jeju island, Korea, J. Environ. Sci., 14(4), 405-412.
- Muste, M., Gonzalez-Castro, J. A., Yu, K., Kim, D., 2007, Accuracy of ADCP discharge measurements for rating of flow-control structures, IIHR Report, IIHR-Hydroscience & Engineering, The University of Iowa, Iowa city, IA
- Yang, S. K., River management and improvement measures of Jeju island, River & Culture, Korea River Assoc., 3(4), 104-115.