

ORIGINAL ARTICLE

제주 외도천 유역의 통합 물수지 분석

김남원 · 정일문* · 나한나

한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소

An Integrated Water Budget Analysis of Oedocheon Watershed in Jeju Island

Nam Won Kim, Il-Moon Chung*, Hanna Na

Hydro Science and Eng. Res. Inst. Korea Institute of Civil Eng. and Building Technology, Goyang 412-712, Korea

Abstract

Hydrologic component analysis was conducted to investigate water budget characteristics the Oedocheon watershed, Jeju Island. For this purpose, integrated SWAT-MODFLOW model was applied to this watershed for continuous surface water-groundwater modeling. Pasture and forest-deciduous are the major land use types and these affect general hydrologic component ratio. The spatio-temporal groundwater recharge can be obtained from SWAT and then distributed groundwater recharge can be reproduced by MODFLOW. The groundwater level variation was simulated with distributed groundwater pumping data. The water budget in this watershed was compared with the previous estimated result by Jeju-Do(2013). As this result considered discharge to the coastal side, the discrepancy was found. However, it was found that the overall tendency of both analyses were similar.

Key words : SWAT-MODFLOW, Oedocheon watershed, Water budget, Groundwater recharge, Pumping data

1. 서론

제주특별자치도 수자원관리종합계획에 의하면 제주 지역의 유출률은 강수대비 22%로 내륙에 비해 매우 낮은 특성을 보이며 지하수 함양량은 강수대비 44%로서 역시 내륙과는 상이하게 높은 지하수 함양률을 나타내고 있다(Jeju-Do, 2013). 이와 같이 제주 지역 수자원은 강수로부터 하천으로 유출되기 보다는 지하공극을 통해 대수층으로 유입되는 양이 커서 전체 수자원관리에 있어서 지하수의 중요성이 매우 크다(Moon 등, 2005).

본 연구는 이와 같이 유출특성이 내륙과는 매우 상이한 제주지역의 맞춤형 수문해석 모형 개발을 위한 연

구의 일환으로 수행되었으며, 다양한 문제점 분석을 통해 모형을 개선하고 필요한 자료를 구축함으로써 제주도의 특수한 수문학적 현상을 규명하는데 그 초점을 맞추고 있다. 기존의 수자원관리는 NRCS-CN (Natural Resources Conservation Service-CurveNumber) 방법을 이용한 직접유출량과 Penman-Monteith 기법을 이용한 증발산량의 개별적인 산정을 이용하여 수문총량으로부터 이 두 가지 수문량을 뺀 나머지 값을 지하수 함양량으로 산정하였다. 하지만, 제주지역의 경우, 연속수문모형(Continuous hydrologic model)을 이용할 경우, 증발산량이 토양수분의 함수로 결정되므로 실제로 증발산량은 강수량에 지배되기 보다는 토양수분에 의해 결정되는

Received 18 February, 2015; Revised 30 March, 2015;

Accepted 30 March, 2015

*Corresponding author: Il-Moon Chung, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

Phone: +82-31-9100-334

E-mail: imchung@kict.re.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.

것으로 판단할 수 있다(Kim 등, 2014). 또한 제주 지역의 경우 일정한 강수량 또는 토양 수분 함수량에 도달하기 전까지는 지표 및 중간유출이 발생하지 않으므로 이를 분석하는데 기존 유출모의 패러다임으로는 설명이 불가능하다(Chung 등, 2011). 따라서 개별적인 수문성분 계산을 통한 수지식으로는 정확한 증발산량 산정이 어렵다. 또한 총 유출량의 경우에도 지표면 유출량이 극히 제한적이며, 지하수 함양을 통해 지하심부로 유입된 성분은 지하수/해수 경계면을 통해 해안으로 배출되는 것으로 추정되고 있다(Hwang 등, 2005).

이와 같은 기본 전제하에 본 연구에서는 기존의 SWAT 모형(Arnold 등, 1993)을 개선한 SWAT-K 모형(Kim 등, 2009)을 기반으로 지표수-지하수 통합 수문 분석을 수행한 후 제주의 유출특성과 해안지하수 유출성분을 고려한 물수지 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. SWAT-K모형

본 연구에서 활용하고자 하는 SWAT-K(Korea)모형은 미국농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Arnold 등(1993)에 의해 개발된 준 분포형 장기 유역 수문모형 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 우리나라 특성에 맞도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화와 지표수-지하수 연계 해석 등을 개선하여, 강우-증발산-토양수분-지표수-지하수의 시공간적 분포를 정량적으로 산정하는 장기유출 해석 모형이다. 특히 SWAT과 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1984)의 완전연동형 결합, 자체적인 토양통 DB의 구축 및 시간가중CN 곡선지수, 하도추적 모듈 개선 등 유출 구조를 혁신한 한국형 모형이라고 할 수 있다(Kim 등, 2008; Kim 등, 2009). SWAT에서 모의되는 수문순환은 다음과 같은 물수지 방정식에 근거하여 일별로 모의된다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 와 SW_o 는 각각 주어진 날의 최종 및 초

기 토양 수분량(mm H₂O), t 는 시간(일), R_{day} 는 강수량(mm H₂O), Q_{surf} 는 지표유출량(mm H₂O), E_a 는 증발산량(mm H₂O), W_{seep} 는 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm H₂O), Q_{gw} 는 회귀수량(mm H₂O)이다. 본 연구에서는 NRCS 유출곡선법을 이용한 일별 지표유출량, 토양수분을 고려한 중간유출량, Penman-Monteith 방법을 이용한 실제증발산량을 산정하였다. SWAT 모형은 토지이용상태, 토양상태, 경사, 방향에 따라 수문학적 반응단위를 가지는 동질 유역으로 정의되는 HRU(Hydrological Response Unit)라는 분할개념을 이용하고 있다(Leavesley 등, 1983). 이와 같은 단위로 유역이 구분되면 여러 종류의 작물과 토양에 의한 다양한 증발산, 토양수분, 지하수 함양 등을 반영할 수 있다. 각 HRU에서 수문성분의 발생량이 계산되고 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 소유역별 하도로 유입된다.

한편, 지하수 함양량의 공간분포를 계산, MODFLOW 모형에 일별 입력값으로 활용하고 지하수 양수의 공간분포를 통합물수지 분석에 반영하기 위해 일단위 완전연동 SWAT-MODFLOW모형을 이용하였다.

2.2. 외도천의 특성 및 기상자료 구축

외도천은 제주시 한라산 EL.1,950m 고지에서 발원하여 외도동 해안으로 유입되는 하천으로 유로연장 14.70 km이고, 유역면적은 74.92 km²이다. 본 연구에서는 외도천을 중심으로 표준유역 경계까지 확장하여 모델영역을 설정하였으며, 11개의 소유역으로 구분하였다. 연구지역에 대한 소유역 현황은 Fig. 1과 같으며, 각 소유역에 대한 유역특성인자는 Table 1에 나타내었다.

제주도내 운영중에 있는 82개의 관측소중 본 연구지역인 외도천유역과 근접한 제주기상청 관할관측소자료와 AWS의 윗세오름, 어리목, 재난안전대책본부의 천백고지, 노형, 도두동의 3개 지점 자료를 이용하여 기상자료를 구축하였다(Fig. 2). 자료구축은 관측소별 강우량을 비롯하여 최저·최고 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등이다. 제주관측소는 최근 9년간(2002년~2010년)의 연평균 일사량이 13.8 MJ/m²이며, 연평균 최저기온은 12.9 °C이고, 연평균 최고기온은 19.2 °C, 연평균 상대습도는 65.4 %이며, 연평균 풍속은 3.3 m/s로 나타났다(Table 2).

Table 1 Characteristics of Subbasin

No. of Subbasin	Area (km ²)	Main Channel Length (km)	Main Channel Gradient (m/m)	Tributary Length (km)	Tributary Gradient (m/m)	Average Elevation (EL.m)
1	4.020	5.921	0.032	7.839	0.039	114.0
2	5.400	6.609	0.036	8.463	0.048	141.0
3	0.510	0.150	0.001	2.298	0.032	40.0
4	4.030	4.428	0.038	6.342	0.044	141.0
5	0.380	0.833	0.006	0.986	0.014	8.0
6	19.590	13.495	0.069	14.898	0.088	355.0
7	11.880	11.466	0.061	13.349	0.077	330.0
8	3.480	2.137	0.070	5.183	0.088	752.0
9	11.280	5.926	0.010	7.586	0.127	1,116.0
10	13.690	2.686	0.010	8.741	0.128	1,276.0
11	12.590	11.477	0.056	14.020	0.081	305.0

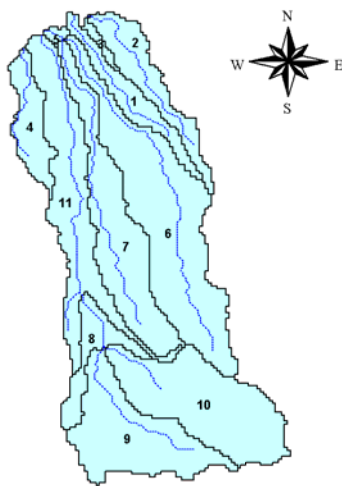


Fig. 1. Division of Subbasin.

또한 유출모형의 보정과 검증, 모의결과에 대한 평가를 위해 하천유량자료 및 지하수위 관측 자료가 필요하다. 대상유역에는 Fig. 3과 같이 2개의 지표수 유량관측 지점(외도천1, 외도천2)이 있으며, 지하수위 관측지점은 총 3개(JW이호, JR하귀3, JH어승생)이다.

2.3. 공간특성 입력 자료 구축

SWAT모형은 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 유역내 토지이용상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에는 DEM(해상도 100 m), 환경부에서 2009년에 제시한 중분류 토지이용도(1:25,000), 2007년 농업과학원에서 구축된 토양도(1:25,000)를 사용하였다(Fig. 4~Fig. 6). 또한 토지이용 및 토양특성의

Table 2. Weather data of Oedocheon watershed

Month		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ave.
Temp. (°C)	Max	8.5	10.2	13.4	17.9	21.8	25.0	29.0	29.9	26.2	21.9	16.2	10.6	19.2
	Min	3.0	3.6	6.0	10.4	14.5	19.1	23.3	24.4	21.2	15.4	9.4	4.6	12.9
Solar radiation (MJ/m ²)		6.7	9.8	14.4	18.0	19.6	18.1	18.2	18.2	14.3	13.1	8.9	6.7	13.8
Relative Humidity (%)		61.4	60.4	59.1	60.0	65.8	73.0	75.4	72.7	72.4	62.7	60.2	61.8	65.4
Wind Speed (m/s)		4.1	3.6	3.7	3.2	2.9	2.7	2.8	2.7	2.9	3.0	3.4	4.2	3.3

Table 3. Land use types and areas of Oedocheon watershed

Items	Types	Area(Km ²)	Ratio(%)
PAST	Pasture	21.75	25.04
WATR	Water	0.30	0.35
UCOM	Commercial	0.03	0.03
UINS	Institutional	0.19	0.22
FRSD	Forest-Deciduous	23.08	26.58
FRSE	Forest-Evergreen	16.50	19.00
FRST	Forest-Mixed	1.48	1.71
AGRC	Agricultural Land-Close-grown	1.14	1.32
URLD	Residential-Low Density	2.29	2.65
UIDU	Industrial	0.05	0.06
RICE	Rice	0.24	0.28
UTRN	Transportation	0.99	1.14
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	7.12	8.20
ORCD	Orchard	11.66	13.42

Table 4. Hydrologic soil groups in Oedocheon watershed

Name	Area(Km ²)	Ratio(%)	Name	Area(Km ²)	(%)
UDO	0.77	0.89	JUNGEOM	0.54	0.63
PYEONGDAE	2.55	2.94	IDO	0.93	1.07
SONGAG	0.42	0.49	YEONGRAG	0.02	0.02
DAEHEUL	0.08	0.09	DONGGUI	8.59	9.9
GUEOM	0.68	0.78	RB	3.06	3.52
NORO	2.68	3.09	AEWEOL	0.57	0.66
MINAG	0.09	0.1	HANGYEONG	4.18	4.82
YONGGANG	0.08	0.09	YONGSU	0.01	0.01
DAEJEONG	0.21	0.24	WEOLPYEONG	0.02	0.02
ARA	1.79	2.06	HANRIM	2.21	2.54
SARA	3.94	4.54	MUREUNG	0.34	0.39
TOSAN	2.18	2.51	JUNGMUN	3.97	4.57
JEOGAG	4.96	5.71	ORA	6.73	7.75
ONPYEONG	0.13	0.15	JOCHEON	0.21	0.24
JEJU	10.80	12.44	GANGJEONG	0.34	0.39
NONGO	2.18	2.51	HEUGAG	14.17	16.32
YONGHEUNG	1.77	2.04	BRB	0.02	0.02
JEONGBANG	0.30	0.35	GYORAE	0.08	0.09
GUNSAN	4.33	4.99	DONGHONG	0.42	0.49
GAMSAN	0.24	0.28	GUJWA	0.22	0.26

세목은 Table 3 ~ Table 4와 같다. 토양분포는 HEUGAG, JEJU 토양통이 가장 넓게 분포하는 것으로 나타났다.

2.4. 수리지질 자료 구축

제주도는 화산분출에 의해 형성된 화산섬으로 클링커와 같은 고투수성 층과 저투수성 현무암과 같은 수문지질 요소가 교대되는 다층구조를 형성하고 있으나, 각 층 구조를 MODFLOW에 반영하는 것은 불가능하므로 1개의 자유면대수층으로 가정하였다. 모델영역은 86.85 km² 이고, 모델 격자는 161행 96열로 구성되며 수평방향 격자 한개의 크기는 100 m × 100 m 이다. 격자의 크기는 지표수 유출해석을 위한 DEM 및 토지이용도, 토양도를 구성함에 있어 100 m 격자를 사용하였기에 지하수역시 이와 동일하게 100 m 격자를 사용하였다. 대수층의 상부는 지표면으로, 하부는 임의적인 해발고도를 수평으로 설정하였다. 모형의 보정을 수행하며 수리전도도를 추정하였으며, 그 범위는 고도별로 1.94 ~ 139.4 m/day 이다(Fig. 5).

경계조건은 유역경계를 기준으로 바깥쪽은 무흐름으로 간주하여 분수령을 따라 불투수경계(No-flow boundary)로 설정하였으며, 해안선은 일정수두경계(Constant head boundary)로 설정하고 그 수위는 해수면 수위와 일치시켰다. 또한 지하수 유출입이 일어나는

외도천을 중심으로 광령천, 어시천, 원장천, 이호천 등 지방2급 하천들을 모두 하천경계로 입력하였으며, 이 하천셀에서 시간중속수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다.

제주도 전역에 걸쳐 분포하고 있는 4,514개의 관정 중 외도천 유역에는 55개의 관정이 분포(Fig. 6)하고 있으며 이는 모델에서 양수정으로 설정하여 조사연구 자료를 통해 추정된 공당 사용량만큼 양수하도록 입력하였다.

3. 결과분석

3.1. 지표수 유출분석

외도천 유역에 통합수문모형을 적용하여 유출분석을 실시하였다. 제주도 북부지역에 위치한 외도천은 중산간 지역에서 대부분의 강수가 지하수로 함양되어 다시 해안과 가까운 지점에서 용천수로 유출됨으로써 하천수의 흐름이 유지되고 있는 상시하천중 하나이다(Ha 등, 2008). 외도천유역의 유출특성을 파악하기 위하여 “외도천1(외도정수장)” 관측소에서 관측된 수위·유속자료를 이용하여 수위·유량관계곡선식을 산정하여 유출량을 산정하였다(Jung과 Yang, 2008; Jeju Development Institute,

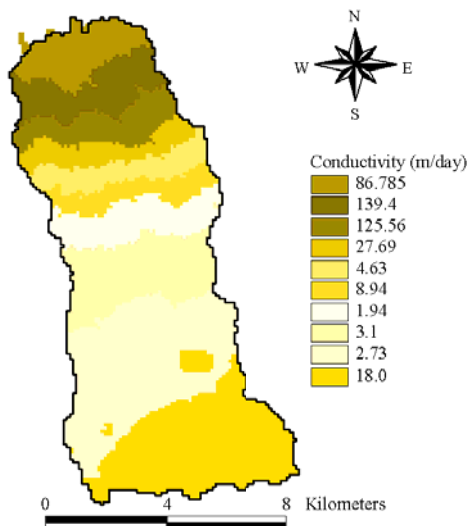


Fig. 5. Hydraulic conductivity distribution.

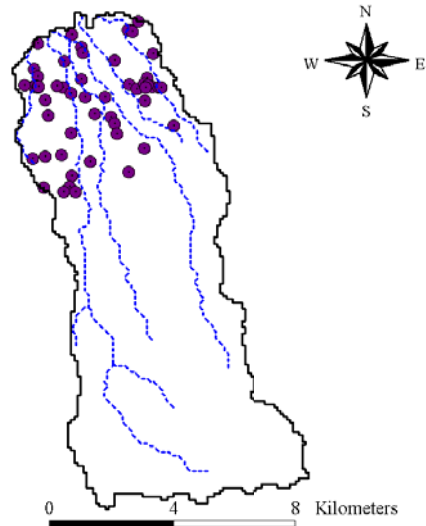


Fig. 6. Pumping well distribution.

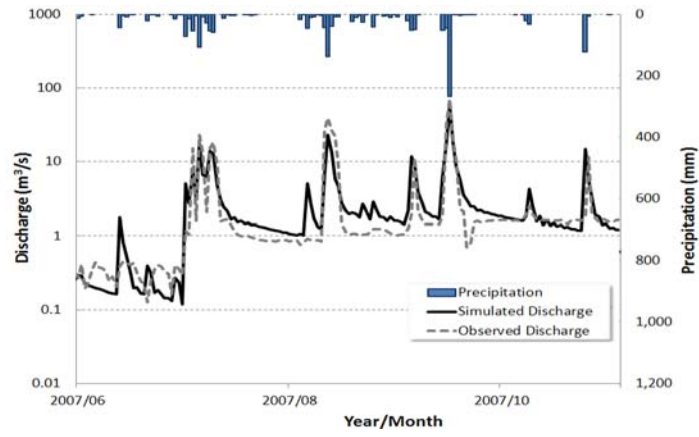


Fig. 7. Streamflow calibration.

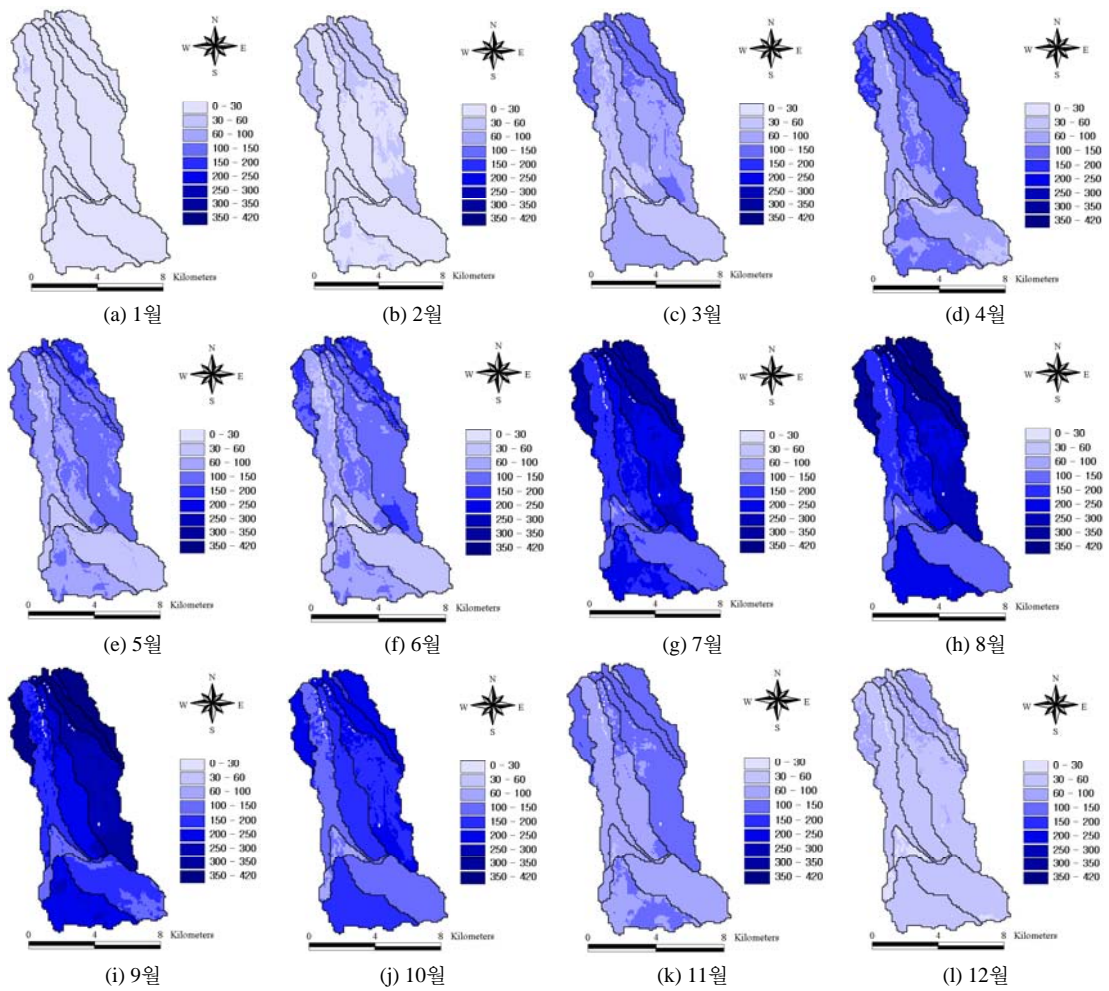


Fig. 8. Monthly groundwater recharge estimation.

2009). Fig. 7은 외도천 유역의 유출수문곡선으로 점선은 관측유출량, 실선은 모의유출량을 나타낸 것으로 모의 유출수문곡선이 관측 수문곡선과 $R^2=0.65$ 로 비교적 양호한 적합을 나타냈다.

3.2. 지하수 함양 분석

유출량의 보정을 완료한 후, 모의 함양량과 지하수위 변화의 상관성을 고려한 함양의 지체시간 분석(Chung 등, 2010)을 수행하여 함양량의 월별 시공간적 변동을 추정하였다. Fig 8에 나타난 바와 같이 월 함양량의 분포는 건기와 우기에 따라 확연하게 달라지는 것을 알 수 있으며 유역의 토지이용 및 토양특성, 경사 등에 따라 매우 비균질하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 지하수 유동 분석

외도천 유역에는 El. 600m 이상의 고지대에 지하수위를 관측하는 관정이 존재하지 않기 때문에 관측지하수위 분포도는 고지대의 오차를 포함하고 있을 것으로 판단된다. 또한 본 유역내에 위치한 3개의 지하수위 관측소 자료로는 지하수위의 공간분포를 재현하기가 매우 어려워 공간지하수위 분포는 모의값만을 제시하였으며, 고도에 맞게 산지에서 해안쪽으로 유동하는 제주지역의 전형적인 특성을 나타냈다. 지하수위 시계열 모의값의 경우는 지하수 양수영향이 비교적 크지 않은 JW어승생 지하수위자료와 비교하였으며, $R^2=0.72$ 로 모의치가 관측치의 양상을 양호하게 모사하고 있음을 알 수 있었다.

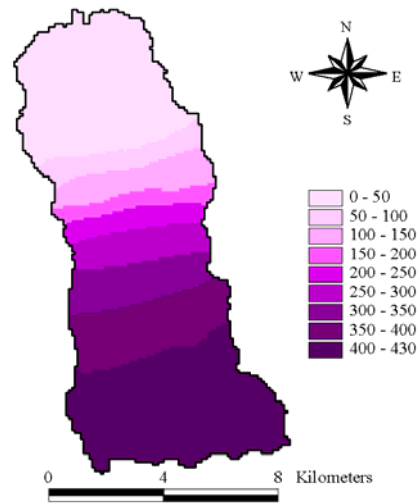


Fig. 9. Simulated spatial groundwater distribution.

3.4. 통합 물수지 분석

본 연구에서 수행한 제주형 지표수-지하수 통합해석을 통해 얻은 물수지 분석 결과는 Table 5에 나타내었다. 외도천유역을 대상으로 3개년(2008~2010)에 대해 물수지 분석을 수행한 결과 강수량 대비 증발산 26% ~ 45%, 함양량은 34% ~ 40%, 직접유출은 20~34%의 범위를 나타내었다. 이와 같은 범위는 기존 수립된 수자원 계획보고서의 값인 제주 북부지역의 강수량 대비 연평균 수문성분값인 증발산 34%, 연합양량 44%, 직접유출량 22%와 비교할 때 전반적으로 유사한 범위에서 산정된

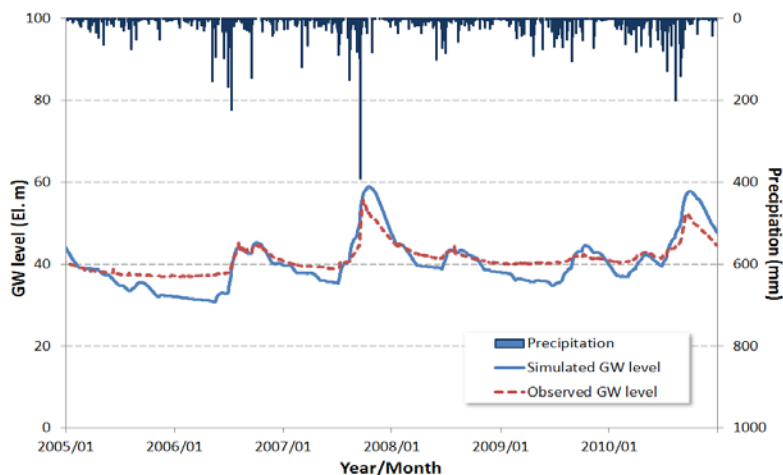


Fig. 10. Comparison between simulated and observed groundwater time series.

Table 5. Integrated water buget result

Year	Prec. (mm)	Direct runoff (mm)	EVT (mm)	Recharge (mm)	Baseflow (mm)	Discharge to sea (mm)
2008	1,538	392	693	524	276	248
2009	1,921	523	688	709	288	421
2010	2,681	923	689	1,069	305	764
Ave.	2,047	589	683	772	290	485

것을 알 수 있었다. 3개년 평균 강수량 대비 기저유출량은 14 %로 강수량 대비 해안유출량 23 %보다 적은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 제주 외도천 유역의 통합물수지 분석을 위해 SWAT-K모형을 기반으로 프로세스 중심의 장기 지표수-지하수 수문성분분석을 수행하였다. 외도천은 상시 유출량이 존재하는 제주지역의 하천으로 일정기간의 계측자료를 활용하여 유출량을 보정할 수 있었다. 물수지의 구조중 함양량의 일부는 기저유출성분과 해안유출성분으로 나뉘 분석을 하였다. 그 결과 기존 제주수자원종합계획에서 분석된 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 가용한 자료만을 이용하여 수행하였으므로 결과로 제시한 것이 참값이라고 할 수는 없으나 기존의 해석에서 진일보 시킨 모의기법을 제시한 것과 해안유출량을 정량화한 점이 유의미한 결과라고 판단된다. 이와 같은 해안유출 지하수는 제주지역의 지속가능한 수자원 활용을 위해 필수적인 요소이며 향후 이를 보존하기 위한 전략이 필요할 것으로 사료된다. 또한 제주 전역에 대한 물수지분석도 매우 중요한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

REFERENCE

Arnold, J. G., Allen, P. M., Bernhardt G., 1993, A comprehensive

surface-groundwater flow model, *J. Hydrol.*, 142, 47-69.
 Chung, I. M., Kim, N. W., Lee, J., Sophocleous, M. A., 2010, Assessing distributed groundwater recharge rate by using integrated surface-groundwater modeling: Application to Mihocheon watershed, Korea, *Hydrogeol. J.*, 18(5), 1253-1264.
 Chung, I. M., Lee, J., Kim, J. T., Na, H., Kim, N. W., 2011, Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island, *J. Environ. Sci.*, 20(10), 1347-1355.
 Ha, K. C., Moon, D. C., Koh, G. W., Park, K. H., 2008, Runoff characteristics of the Oedocheon watershed in Jeju Island, *J. Soil Groundwater Environ.*, 13(5), 20-32.
 Hwang, D., Lee, Y., Kim, G., 2005. Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea. *Limnology and Oceanography* 50 (5), 1393-1403.
 Jeju development institute, 2009, The hydrologic and water quality characteristics analysis for the streamwater application in Jeju island, 2009-11, p.98.
 Jeju Do, 2013, Comprehensive Water Resources Plan in Jeju Island. p.366
 Jung, W., Yang, S. K., 2008, Simulation of runoff of rivers in Jeju Island using SWAT model, *J. Environ. Sci.*, 17(9), 1039-1052.
 Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G., 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, *J. of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16
 Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C., Lee, J., Lee, J. E., 2009, Development and applications of SWAT-K (Korea). In: *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications* (Eds. J. Arnold et. al.), Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand.

- Kim, N.W., Nah, H., Lee, J., Lee, J.E., 2014. Complementary relationship based evapotranspiration estimation model suitable for the Hancheon and Kangjeongcheon watersheds in Jeju Island, J. of Korea Water Resour. Assoc., 47(12) 1155-1163
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., Saindon, L. G., 1983. Precipitation-runoff modeling system: user's manual, US Geological Survey, Water-Resour. Invest. Rep., 83-4238(207).
- McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh., 1988. "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model", U.S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, p. 528.
- Moon, D. C., Yang, S. K., Koh, G. W., Park, W. B., 2005, Estimation of baseflow discharge through several streams in Jeju Island, Korea, J. Environ. Sci., 14(4), 405-412.