

SWAT HRU Mapping module을 이용한 해안면 만대천 유역의 토지이용별 지하수 함양량 평가

류지철 · 최재완 · 강현우* · 금동혁* · 신동석 · 이기환** · 정교철*** · 임경재*†

국립환경과학원 수질총량연구과
*강원대학교 지역건설공학과
**강원대학교 지리정보체계과정
***안동대학교 지구환경과학과

Evaluation of groundwater recharge rate for land uses at Mandae stream watershed using SWAT HRU Mapping module

Jichul Ryu · Jae Wan Choi · Hyunwoo Kang* · Donghyuk Kum* · Dong Suk Shin · Ki Hwan Lee** ·
Gyo-Cheol Jeong*** · Kyoung Jae Lim*†

Water Pollution Load Management Division, National Institute of Environmental Research
*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University
**Interdisciplinary Graduate Program in GIS, Kangwon National University
***Department of Earth and Environmental Sciences Andong National University
(Received 11 June 2012, Revised 14 September 2012, Accepted 14 September 2012)

Abstract

The hydrologic models, capable of simulating groundwater recharge for long-term period and effects on it of crops management in the agricultural areas, have been used to compute groundwater recharge in the agricultural fields. Among these models, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) has been widely used because it could interpret hydrologic conditions for the long time considering effects of weather condition, land uses, and soil. However the SWAT model couldn't represent the spatial information of Hydrologic Response Unit (HRU), the SWAT HRU mapping module was developed in 2010. With this capability, it is possible to assume and analyze spatio-temporal groundwater recharge. In this study, groundwater recharge of rate for various crops in the Mandae stream watershed was estimated using SWAT HRU Mapping module, which can simulate spatio-temporal recharge rate. As a result of this study, Coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) for flow calibration were 0.80 and 0.72, respectively, and monthly groundwater recharge of Mandae watershed in Haean-myeon was 381.24 mm/year. It was 28% of total precipitation in 2009. Groundwater recharge rate was 73.54 mm/month and 73.58 mm/month for July and August 2009, which is approximately 18 times of groundwater recharge rate for December 2009. The groundwater recharges for each month through the year were varying. The groundwater recharge was smaller in the spring and winter seasons, relatively. So, it is necessary to enforce proper management of groundwater recharge during droughty season. Also, the SWAT HRU Mapping module could show the result of groundwater recharge as a GIS map and analyze spatio-temporal groundwater recharge. So, this method, proposed in this study, would be quite useful to make groundwater management plans at agriculture-dominant watershed.

keywords : Agricultural field, Groundwater, Recharge rate, SWAT HRU Mapping module

1. 서론

지하수 함양량 산정은 지하수 자원개발 및 지하수 관리에 있어서 매우 중요한 요소이며(안승섭 등, 2009), 지하수 함양량은 농업지역의 농업용수에 있어 밀접한 관계가 있다. 건설교통부(2006)에서는 2003년 우리나라 수자원 이용량 중 농업용수가 전체 수자원 이용량의 47.5%를 차지하고 있으

며, 향후 2020년까지 전체 수자원 이용량의 절반 정도를 농업용수가 차지할 것이라고 예측하고 있다. 또한 이에 따른 농업용수 이용량 증 지하수 이용량 또한 점차 증가 하고 있는 것으로 분석하였다. 하지만 우리나라에서는 아직 지하수 함양량 특성 분석을 위한 기초자료가 부족하고, 함양량 산정 기술이 취약하며 이에 따라 농업지역에서의 지하수 함양량 산정 및 평가 또한 미흡한 실정이기 때문에 농업 활동에 따른 농업용수에 있어 중요한 역할을 하는 지하수 함양량 특성에 대한 기초 데이터 구축 및 정확한 함양량 산정이 필요하다(농림부, 2007; 이승현과 배상근, 2004).

† To whom correspondence should be addressed.
kjlim@kangwon.ac.kr

이와 관련하여, 농업지역 및 도시지역의 지하수 함양량 산정을 위해 물수지분석법(안정훈 등, 2008), SCS-CN 방법(이승현과 배상근, 2004), 지하수위 변동법(문상기와 우남철, 2001), 무강우 지속일수 동안의 지하수위 감소곡선법(최병수와 안중기, 1998), 기저유출 분리법(박창근, 1996), 환경동위원소를 이용하는 방법(고용권 등, 2001; Andres and Egger, 1985; Solomon et al., 1993), L-THIA CN기법 기반의 기저유출량 분석방법(김희원 등, 2011), 등 여러 가지 지하수 함양량 산정 방식이 사용되어 오고 있지만 이러한 모형들은 장기적인 지하수 함양량 산정에 있어 한계점이 있으며, 지역의 지형적 특성, 기후조건, 토양 조건 등을 반영하지 못한다. 한편 토양수분추적을 이용한 지하수함양량 추정방법(김성준과 채효석, 2000)은 지역의 지형적 특성, 기후조건, 토양 조건 등을 반영하였으나, 특히 농업지역인 경우 이러한 방법 들은 해당 지역의 정확한 작물별 특성에 따른 토지이용 및 영농방법을 고려한 지하수 함양량 산정이 어렵다.

따라서 이러한 지하수 함양량 산정을 유역단위로 모의하고 분석하기 위해 GLEAMS(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System)(Leonard et al., 1987), DRAINMOD(Drainage and related water management system)(Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, 1978), SWAT(Soil and Water Assessment Tool)(Arnold et al., 1998) 모형 등이 많이 사용되고 있으며 특히, 이러한 모형 중 SWAT 모형은 국내외에서 적용성 및 확장성이 뛰어난 것으로 인정받아 유역 내 수문, 지하수 및 비점오염원 분석에 많이 사용되고 있다(김남원 등, 2009; 최윤영과 최정우, 2010; Arnold, et al., 2000; Coffey et al., 2010; Rao and Yang, 2010). 최근 이러한 SWAT 모형에서 모의되는 지하수 함양량 및 대수층 오염부하량을 좀 더 시/공간적으로 분석할 수 있게 개선한 SWAT HRU Mapping

module이 개발되었다(류지철 등, 2010). SWAT HRU Mapping module은 기존의 SWAT 모형에서 내부적으로 계산되던 HRU 지도를 SWAT 결과에 표출하여 연구 유역 내 소 유역 HRU별 토지이용에 따른 지하수 함양량 지도를 보여 주고 이에 따른 결과를 정량적으로 산출할 수 있기 때문에 기존의 SWAT모형에서 지하수 함양량을 시/공간적으로 도출해 낼 수 없었던 제한점을 보완하며, 이를 통해 지하수함양량 평가가 필요한 연구유역의 지하수 함양량 특성을 토지이용별로 보다 정확하고 효율적으로 나타낼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 유역의 특성 및 실제 작물별 특성을 고려 할 수 있는 SWAT HRU Mapping module(류지철 등, 2010)을 이용하여 1) 대표적 고랭지 농업지역인 해안면의 정확한 작물별 토지이용에 따른 지하수 함양량을 산출하고, 이에 따라 2) 농업지역의 작물별 토지이용에 따른 지하수 함양량 특성을 평가하는 것이다.

2. 연구방법

본 연구에서 농업지역의 지하수 함양량 산정을 통한 농업지역에서의 지하수 함양량 관리 계획을 제시하고자 하였다. 이를 위해 고랭지 농업이 성행하고 있고 작물별 자세한 토지피복도 및 영농방법과 유량 모니터링 자료가 있는 강원도 양구군 해안면 만대천 유역을 연구대상지역으로 선정하였다. 해안면 만대천 유역은 소양강댐 유역 내 전형적인 고랭지 농업이 성행하고 있는 지역으로 유역의 면적은 61.97 km²이며, 지리적 위치는 북위 38° 15'~38° 20', 동경 128° 15'~128° 10'에 위치하고 있다(유동선 등, 2008)(Fig. 1). 해안면 만대천 유역은 분지를 형태의 매우 독특한 지형으로 이루어져 있으며, 그 지형이 마치 접시를 주먹으로 꼭 눌러 놓은 것과 같은 형태를 가지고 있다고 하여 편치불 지형이라는 명칭을 지니고 있다(최해진 등, 2009).

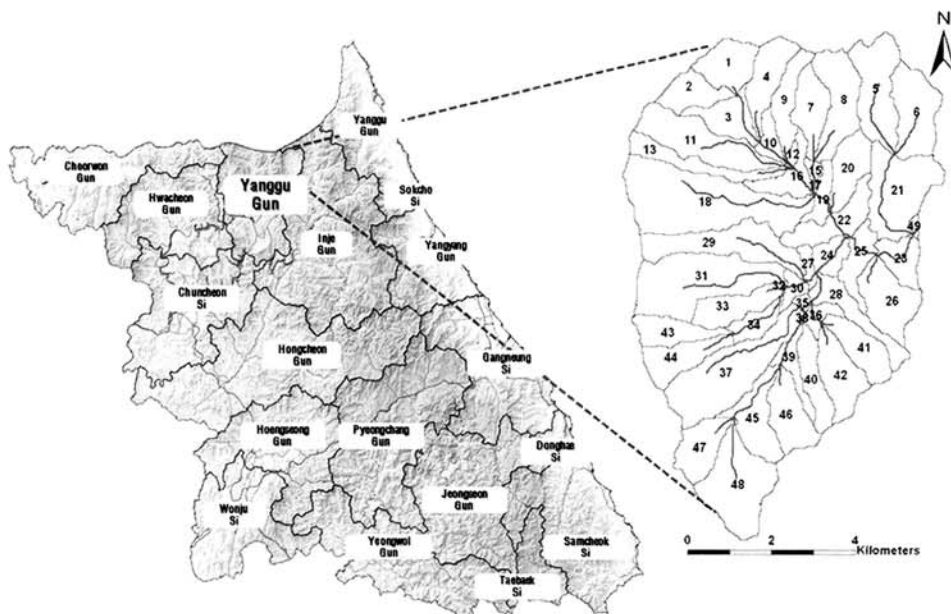


Fig. 1. Location of the Mandae watershed, Gangwon province.

2.1. SWAT HRU Mapping Module의 개요

대부분 우리나라에서 지하수함양량을 추정할 시, 정확한 지하수량 실측 데이터 및 기초자료가 부족하기 때문에 간접적으로 지하수 함양량을 추정하는 방법이 많이 사용된다(이도훈 등, 2010). 이러한 간접적인 지하수 함양량 추정 방법 중 유출량자료를 이용하여 지하수 함양량을 추정하는 방법으로, 강수량(mm), 관개량(mm), 직접유출량(mm), 실제 증발산량(mm) 및 토양수분함량(mm)을 이용하여 지하수함양량(mm)을 산출하는 물수지분석법(안중기와 최무웅, 2006), 기저유출 감수곡선식을 이용하여 유출수문곡선으로부터 지하수 함양량을 추정하는 기저유출 분리법(배상근과 김용호, 2006), 유출곡선지수(CN)을 이용하여 침투량(mm)을 산정하고 이를 강수량(mm)과 함께 산정하여 지하수 함양량을 추정하는 SCS-CN 방법(정영훈과 김경호, 2000)등 여러 가지 간접 추정 방법이 이용되고 있다.

또한 최근에는 수문모형으로 지하수 함양량 산정을 산정하는 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 특히 이러한 모형 중 SWAT은 다양한 재배작물에 따른 재배방법이 지표수 및 지하수 수질에 미치는 영향에 대해 유역단위로 평가가 가능하기 때문에 국내외에서 많이 활용되고 있다. 하지만 SWAT 모형은 소유역별 수문학적 반응단위인 HRU(Hydrologic Response Unit)를 이용하여 유역 내 수문 및 수질을 평가하지만, 소유역 내 HRU의 공간적인 정보가 표출되지 않기 때문에 다양한 영농 방법이 지표수 및 지하수에 미치는 영향을 공간적으로 분석하는 데는 한계가 있다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 류지철 등(2010)은 SWAT HRU Mapping module을 개발하여 SWAT 모형에서 계산되는 지하수 함양량 값을 HRU 맵으로 표출할 수 있도록 SWAT 내 모듈을 추가하여 개선하였다.

SWAT HRU Mapping module의 모식도는 Fig. 2(류지철 등, 2010)와 같으며, 구성요소는 SWAT엔진 수정을 통해 생성되는 전체 유역에 대한 HRU 모의 결과값과, 이를 소유역별 HRU별 모의 값으로 변환해 주는 전처리 프로세서, HRU맵과 변환된 HRU 모의치를 연계해주는 Avenue 프로그램으로 구성되어 있다. 모듈이 개발된 자세한 과정은 다음 아래와 같다.

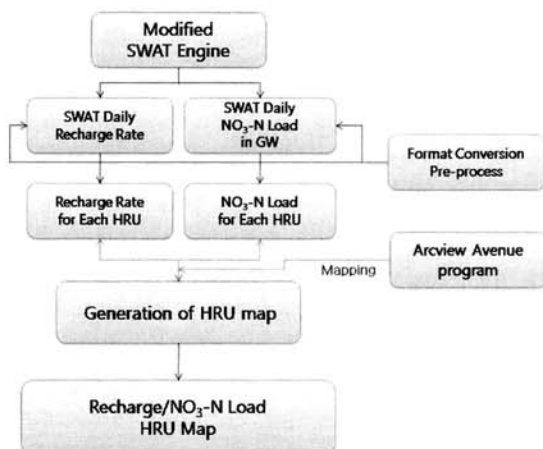


Fig. 2. Overview of SWAT HRU Mapping module.

2.1.1. SWAT 엔진 수정을 통한 소유역별, HRU별 지하수함양량 및 대수층 유입 오염부하량 추출

SWAT은 소유역별 HRU별 수문, 토양유실, 그리고 비점 오염 거동을 일 단위로 평가하는 모형이지만 일 단위의 HRU별 지하수함양량 및 대수층 유입 오염부하량의 결과를 나타내지 않으며, 이와 같은 이유로 HRU별 소유역별 토지이용별 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량의 결과를 유역에 표출하지 못하는 단점이 있다. 따라서 SWAT HRU Mapping 모듈은 SWAT 엔진 내 코드를 일부 수정 및 추가하여 일 단위 HRU별 소유역별 토지이용별 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량 결과를 추출하며, 추출된 일 단위 결과를 월 단위 및 연단위로 결과로도 재산정하여 텍스트파일 형태의 결과로 나타낸다. 또한 추출된 결과들은 모듈 내 전처리프로세서를 이용하여, 아래의 SWAT HRU 지도와 연계하기 위해 포맷을 변환하는 과정을 거친다.

2.1.2. HRU 맵 생성 및 HRU 별 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량 맵핑

SWAT 모형은 HRU 맵을 내부적으로 생성하여 필요한 정보를 추출한 후 이를 저장하지 않는다. 따라서 SWAT HRU Mapping module은 SWAT 모형의 HRU 생성방법과 동일한 방법으로 HRU 맵을 생성하며, 이렇게 생성된 HRU 맵에 추출된 SWAT 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량 예측치를 Avenue 프로그램을 통해 연결한다.

2.2. SWAT HRU Mapping module의 입력자료

SWAT HRU Mapping module은 기존의 SWAT 모형에서 내부적으로만 계산되는 HRU Map을 결과로 도출시킨 모듈로써, SWAT모형을 기반으로 한 모듈이다. 따라서 SWAT HRU Mapping module의 유역 입력 자료의 종류 및 형식은 기존의 SWAT 모형과 모두 동일하기 때문에 본 연구에서는 해안면 만대천 유역에 대한 SWAT 모형의 일 기상자료, DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도, 토양도를 구축하였다.

2.2.1. 기상자료

SWAT 모형에서 필요한 기상자료는 일 강수량(mm), 일 습도(%), 일 수평면일사량(MJ/m²), 일 풍속(m/sec), 일 최소 온도(°C) 및 일 최대 온도(°C)이다. 본 연구에서는 해안면 만대천 유역의 총 11개의 지점에서 2001년부터 2009년 까지 관측된 일별 기상자료를 SWAT 모형의 기상자료 DB로 구축된 자료를 사용 하였다(이지원 등, 2011). Fig. 3에서 사각형 상자로 표시한 부분은 해안면 만대천 유역의 총 11 개의 기상지점 위치를 나타낸다(w1~w11).

2.2.2. 토지이용도, DEM (Digital Elevation Model), 토양도

본 연구에서는 Bayeruth University에서 2009년에 조사한 양구 해안면 만대천 유역의 실측 작물지도를 바탕으로 구축한 토지이용현황 Database를(이지원 등, 2011) SWAT모형의 입력 자료로 사용하였다(Fig. 4).

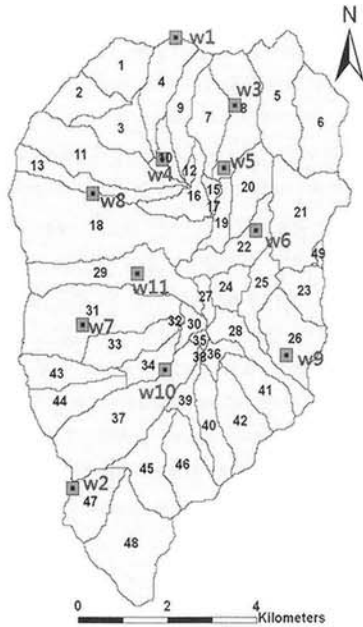


Fig. 3. Locations of weather station in Mandae watershed (w1 ~ w11).

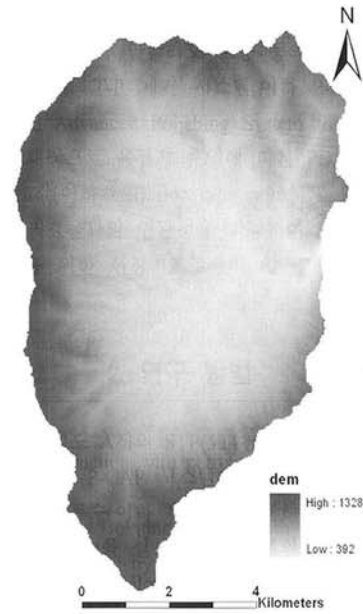


Fig. 5. DEM.

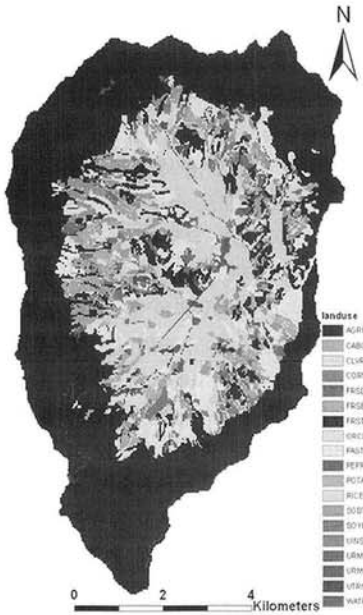


Fig. 4. Landuse.

Fig. 4에서와 같이 본 연구에서 작성한 해안면 만대천 유역의 토지이용현황은 혼효림(FRST, 54.25%)이 가장 많은 면적을 차지하고 있고, 벼(RICE, 14.26%), 초지(PAST, CLVR, 12.81%), 감자(POTA, 3.76%), 무(SGBT, 3.56%), 콩(SOYB, 2.45), 배추(CABG, 2.34%), 호박(AGRR, 1.75%), 과수원(ORCD, 1.43%), 옥수수(CORN, 0.80%), 교통지역(UTRN, 0.63%), 중간-밀집 주거지역(URMD, 0.54%), 활엽수림(FRSD, 0.54%), 저밀도 주거지역(URML, 0.31%), 고추(PEPR, 0.30%), 공공시설지역(UINS, 0.16%), 상록수림(FRSE, 0.06%), 수역(WATR, 0.05%)으로 이루어져 있다.

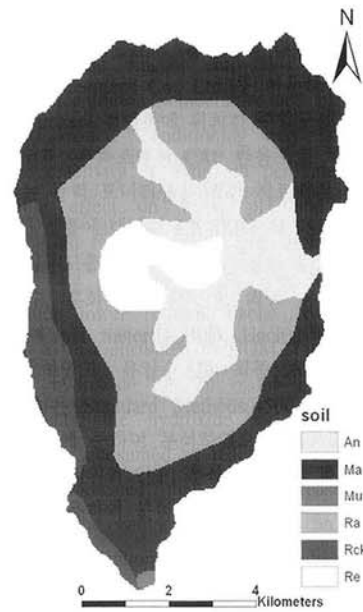


Fig. 6. Major soil types.

본 연구에서 사용한 토지이용도는 환경부 중분류 토지피복도의 토지이용 분류처럼 농경지를 논, 밭, 과수원, 기타재배지로 나누는 것에 비해 Fig. 4에서와 같이 해안면 만대천 유역에서 현장 조사되어 총 9개의 작물로 세분화된 토지이용을 사용하였다.

또한 SWAT 모형의 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 구축하기 위하여 국립지리원에서 제공해주는 수치지도(1:5000)를 이용하였으며(Fig. 5) 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공해주는 개략토양도(1:50,000)를 사용하였다. 해안면 만대천 유역의 토양속성 현황은 Clay-Silt (An), Silt-Sand (Ma), Clay-Silt (Mu), Silt-Sand (Ra), Silt-Sand (Rock), Silt-Sand (Re)로 구성되어 있다(Fig. 6).

2.2.3. 영농자료

SWAT모형은 유역의 토지이용도, 토양도, 기상자료 등 다양한 유역에 관한 입력 자료를 필요로 한다. 이러한 입력자료 중 토지이용도가 정확하지 않으면 모형에서 산정되는 결과 값이 제대로 산정되지 않고 과소 또는 과대평가될 수 있다(허성구 등, 2008). 또한 실제 농경지에서 발생하는 지하수의 오염물질들은 작물별 영농방법에 따라 많은 편차를 나타낸다(김진호 등, 1999). 따라서 본 연구에서는 이지원 등(2011)이 구축한 2009년 해안면 만대천 유역의 실측된 작물지도 DB를 토지이용도에 적용하여 토지이용도의 정확성을 높였으며, 이를 농촌진흥청에서 제공하는 작목

별 관리 매뉴얼과 연계하여 옥수수, 배추, 콩, 무, 고추 등 9개의 작목별 영농방법 DB를 구축한 후 SWAT모형에 적용하였다(Fig. 7, Table 1).

2.2.4. SWAT 모형의 보정 및 SWAT HRU Mapping module의 적용

SWAT HRU Mapping module을 적용 전, 2009년 실측 작물지도 DB가 반영되어 보다 높은 정확성을 가진 해안면 만대천 유역의 토지이용도 및 그 외 SWAT 입력 자료를 이용하여 2009년 7월~2009년 10월 까지 총 18일에 대한 해안면 만대천 유역 대한 일별 유량 보정을 실시하였다.

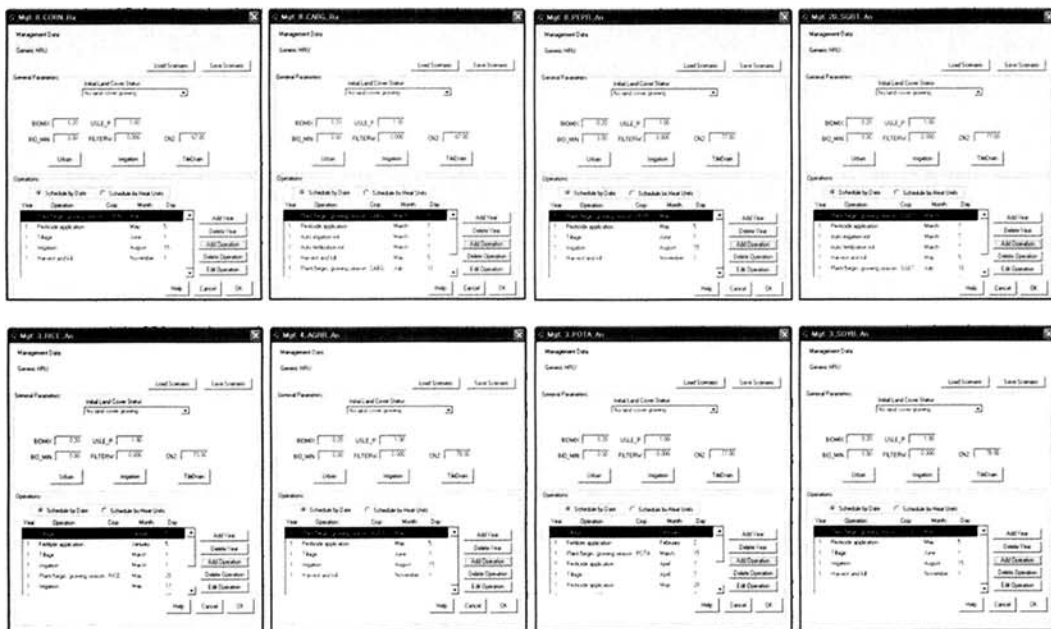


Fig. 7. Crop management information.

Table 1. Scenarios of crop cultivation periods in SWAT crop management module

Crop	Plant/begin growing season	Fertilizer applications	Pesticide applications	Tillage	Irrigation	Harvest and kill
Rice	May. 20	Jan. 5 Aug. 1 (Auto fertilizer)	Jun. 1	Jan. 5 Mar. 1 Nov. 1	Mar. 1 May. 17 (Auto irrigation)	Oct. 15
Corn	May 1	-	May 5	Jun. 1	Aug. 15	Aug. 15
Soybean	May 1	-	May 5	Jun. 1	Aug. 15	Nov. 1
Radish	Mar. 1	Mar. 7 (Auto fertilizer)	Mar. 7	Mar. 10	Mar. 10 (Auto irrigation)	May 5
Carrot	Jun. 10	May 20 Jun. 30	May 20	May 27	-	Sep. 5
Potato	Mar. 15 Aug. 10	Feb. 2 Jul. 11	Apr. 7 Aug. 20 Sep. 18	Feb. 1 Apr. 7 Jul. 10 Aug. 25	-	Jul. 7 Oct. 30
Squash	May 1	-	May 5	Jun. 1	Aug. 15	Nov. 1
Cabbage	Mar. 1 Jul. 10	Mar. 7 (Auto fertilizer) Aug. 1 (Auto fertilizer)	Mar. 7 Aug. 5	-	Mar. 7 (Auto irrigation) Aug. 1 (Auto irrigation)	May. 5 Oct. 20
Pepper	May 1	-	May 5	Jun. 1	Aug. 15	Nov. 1

또한 SWAT 모형의 일별 유량 보정 후, SWAT HRU Mapping module을 사용하여 해안면 만대천 유역의 2009년 도 월별 지하수 함양량을 산출하였고, 산출된 함양량 결과는 다시 SWAT HRU Mapping module을 통하여 2009년 지하수 함양량 지도로 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SWAT 모형의 보정 결과

본 연구에서 2009년 7월부터 2009년 10월까지 총 18일간 일별로 해안면에 대한 SWAT 모형의 보정을 실시한 결과 R^2 는 0.80, NSE는 0.72로 나타났다(Fig. 8). 모형의 보정결과인 NSE가 0.8을 넘는 것으로 보아 해안면에 대한 자연현상을 잘 모의하는 것으로 판단되었으며(Donigan and Love, 2003) 본 연구에서 사용된 SWAT 모형은 SWAT2005 버전으로써, 지하수위에 대한 보정이 불가능하기 때문에 하천의 유량만을 보정하였다.

3.2. SWAT HRU Mapping module 적용 결과

3.2.1. 월별 지하수 함양량 결과

본 연구에서는 2009년도 실측된 해안면의 작물지도를 바탕

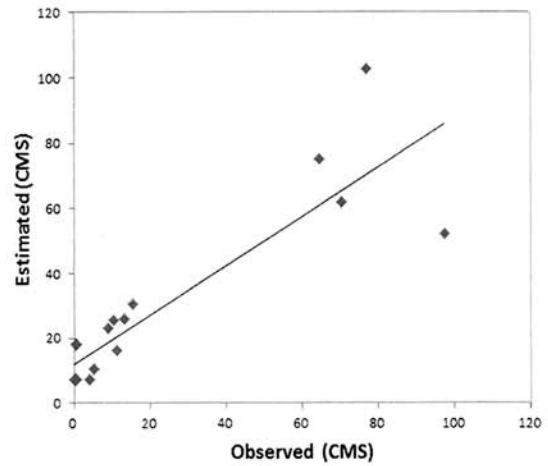


Fig. 8. Comparison of estimated and measured stream flow data at the Madae watershed.

으로 SWAT HRU Mapping module을 적용하였고, 2009년 HRU 별 월 지하수 함양량을 산정하였다(Figs. 9 and 10, Table 2).

해안면 만대천 유역의 2009년 지하수 함양량은 381.24 mm/year로 2009년 강수량(1340.16 mm)의 약 28% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 2009년 해안면 만대천 유역의 월별 지하수 함양량을 비교하면, 여름철인 7월과 8월

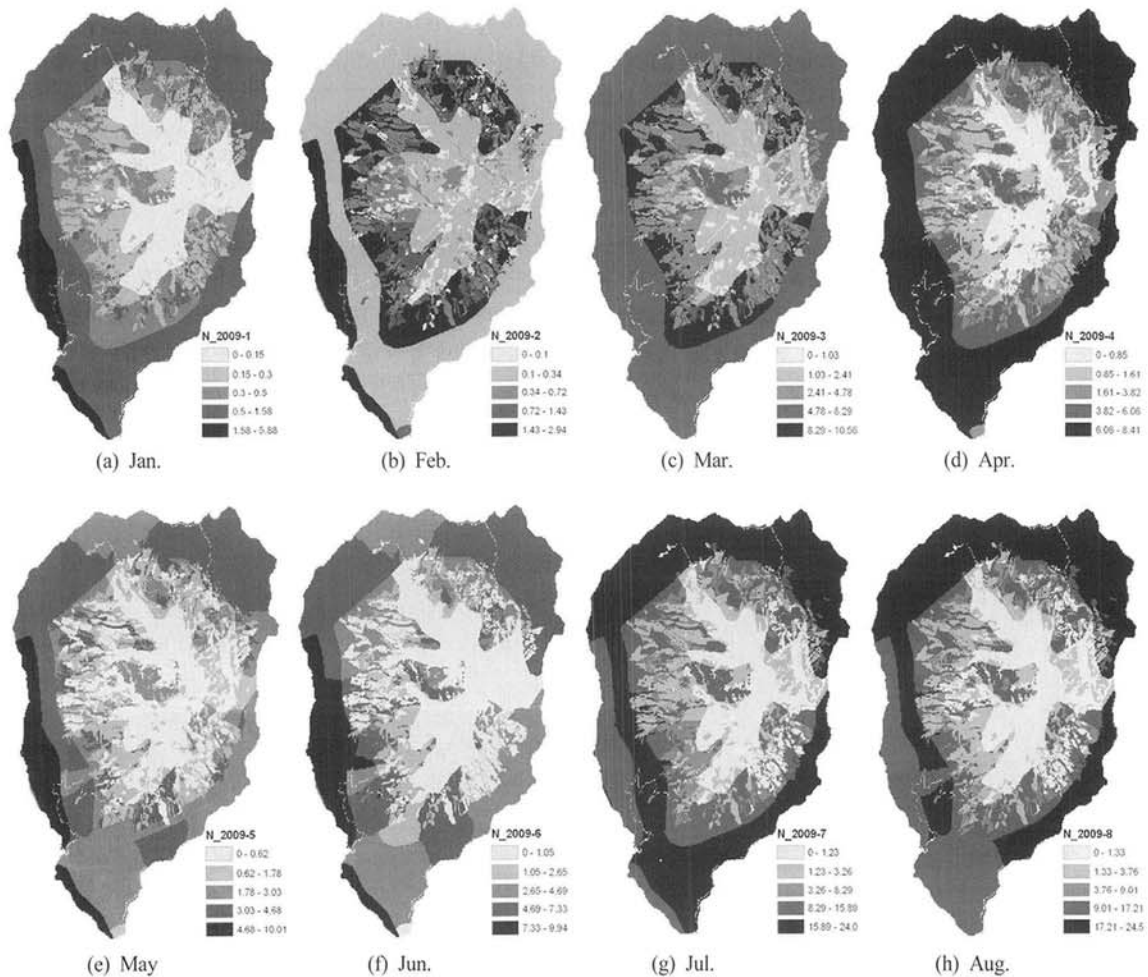


Fig. 9. Recharge rate (mm/month) in 2009.

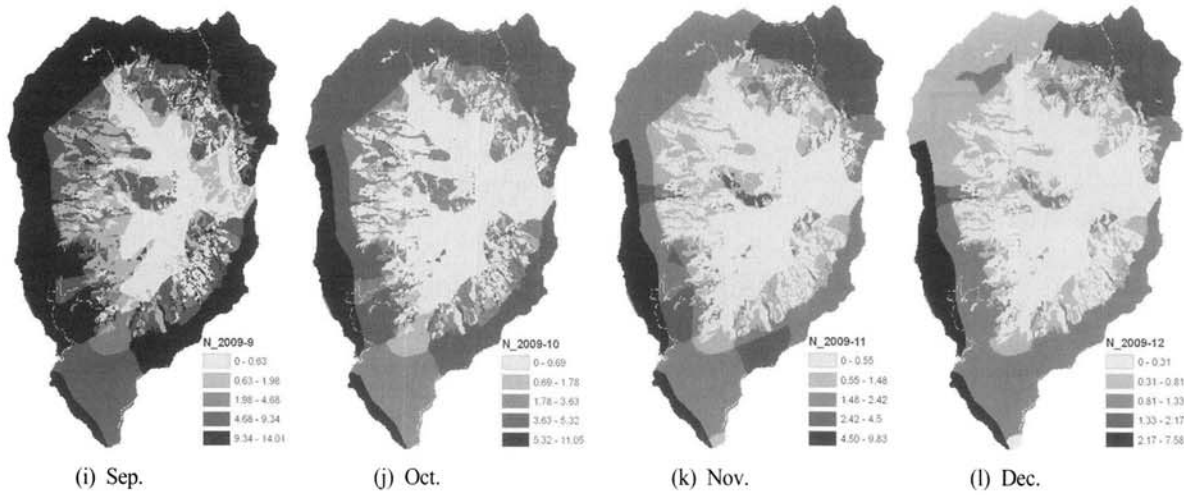


Fig. 9. Recharge rate (mm/month) in 2009.

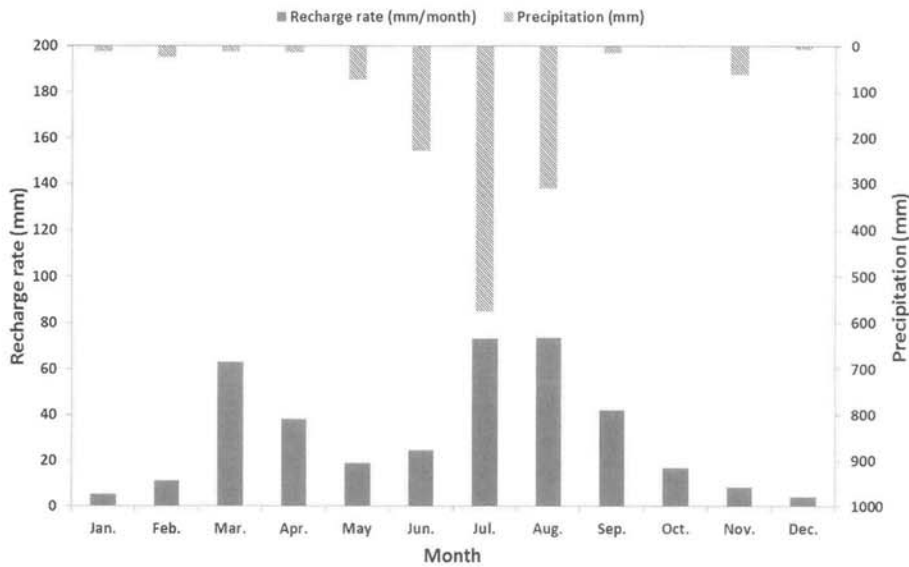


Fig. 10. Recharge rate vs. precipitation in 2009.

Table 2. Monthly recharge rate, precipitation, temperatures in 2009

(mm)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Recharge rate	5.24	11.40	63.09	38.60	19.19	24.75	73.54	73.59	42.45	16.90	8.32	4.17
Precipitation	13.00	24.00	12.00	14.00	74.64	230.00	575.11	310.00	16.36	1.89	61.71	7.45
Mean maximum temperature	0.52	5.56	10.34	17.07	23.13	23.98	25.06	25.10	22.23	18.85	5.32	-0.58
Mean low temperature	-11.65	-4.80	-1.51	4.32	8.76	13.62	16.30	15.92	10.54	6.11	-1.61	-8.90

에 각각 73.54 mm/month, 73.59 mm/month로 함양량이 가장 적은 겨울철인 12월(4.17 mm/month) 보다 약 18배 정도의 지하수 함양량이 많은 것으로 나타났다.

3월과 9월의 경우 각 월 강수량 대비 지하수 함양량이 많은 것으로 나타났으며 이와 같은 이유는 3월의 경우, Fig. 11에서 보이는 바와 같이 1월과 2월에 적설되었던 눈이 기온상승으로 인하여 용설 되었으며, 용설 된 물이 지하로 침투되어 지하수 함양량의 양이 급격히 많아졌기 때문인 것으로 분석되었고, 9월 지하수 함양량(42.45 mm/month)의 경우, 7월과 8월에 급격히 증가한 강수량으로 인하여 지하수 함양량이 증가 되었고 그 영향으로 인하여 9월과 10월까지 지하수 함양량이 증가된 것으로 분석되었다.

3.2.2. 토지이용별 지하수 함양량 결과

본 연구에서는 실제 해안면 만대천 유역의 작물별 파종 시기, 시비시기, 수확시기 등의 재배시나리오들을 SWAT모형 내 입력하여 보다 현실적인 작물재배 과정을 모형 내 반영하였다.

해안면 만대천 유역의 작물별 지하수함양량을 분석한 결과, 12개월 모두 옥수수 작물과 과수원이 파종 전과 후, 수확 및 수확한 후 모두 지하수 함양량이 제일 큰 것으로 분석되었다. 또한 전체 토지이용별 지하수 함양량의 경우, 12개월 모두 산림지역과 초지지역에 가장 많은 지하수 함양량이 분포되어 있는 것으로 나타났고 주거지역, 공공시설지역, 도로교통지역등 불투수층으로 이루어진 지역은 지하수

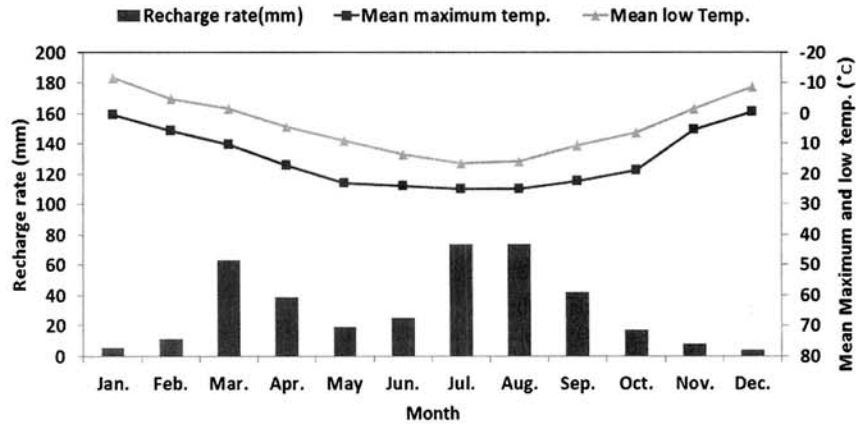


Fig. 11. Recharge rate vs. temperatures in 2009.

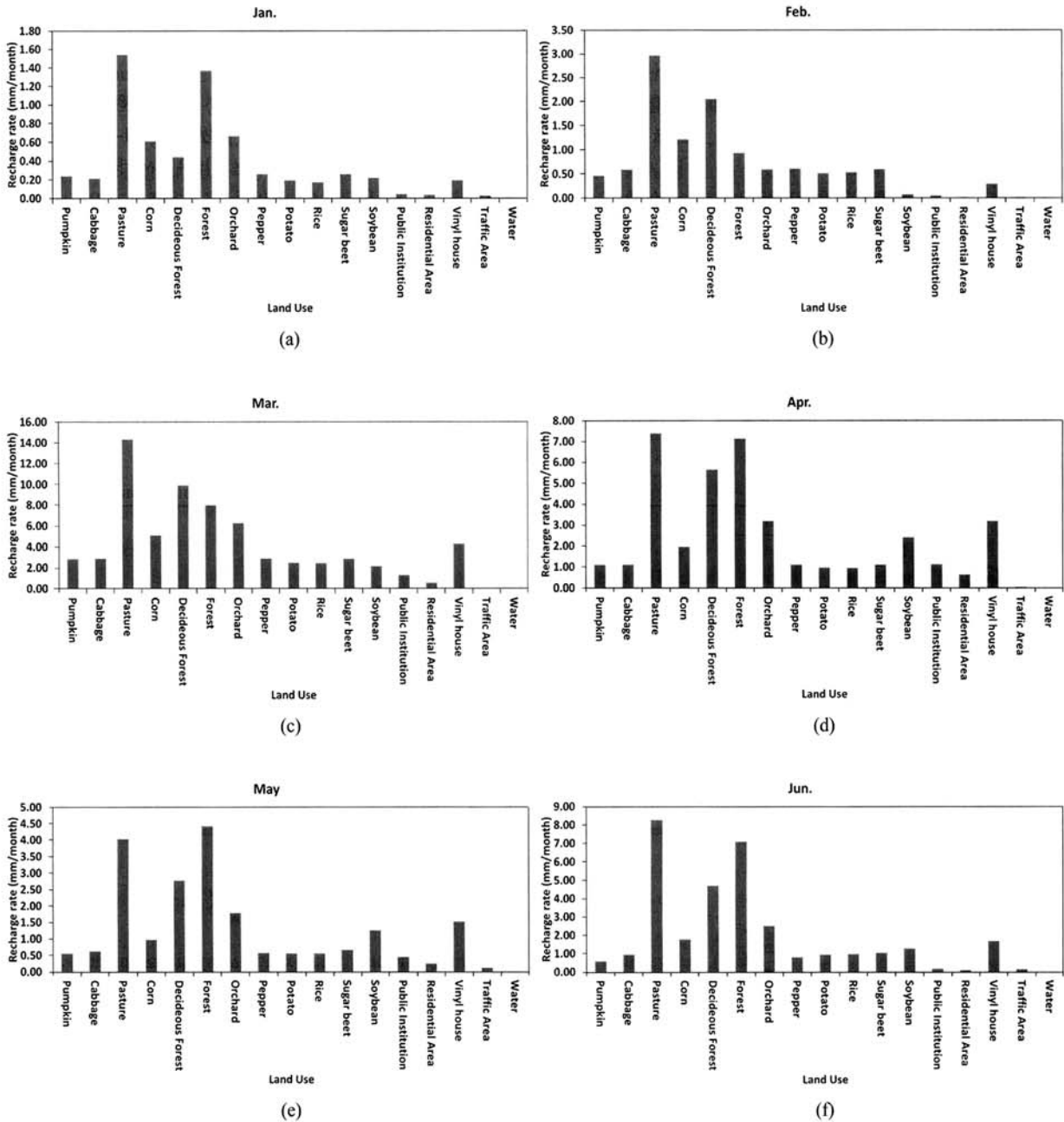


Fig. 12. Recharge rate (mm/month) in 2009.

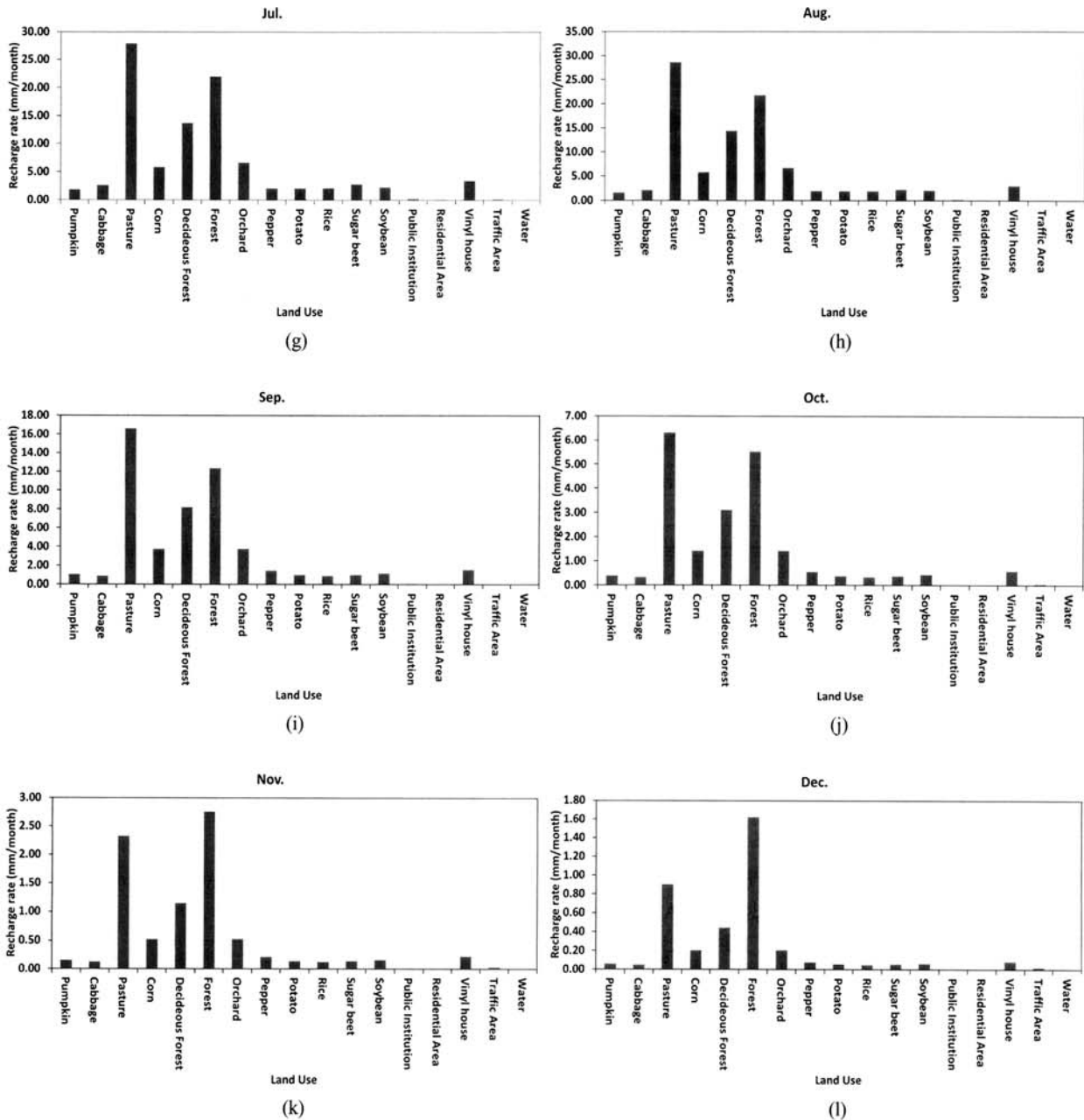


Fig. 12. Recharge rate (mm/month) in 2009. (continued)

함양량이 상대적으로 매우 적은 것으로 나타났다(Fig. 12). 하지만 이와 같은 결과는 토지이용별 토양특성에 따라서도 지하수함양량에 영향을 주기 때문에 토지이용뿐만 아니라 토양특성과 같은 다양한 유역특성 인자도 지하수 함양량 분석에 같이 반영되어야 하며, 풍수기, 갈수기에 따른 작물별 토양특성별 적절한 지하수량 관리가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SWAT HRU Mapping module을 사용하여 2009년 해안면의 월별 토지이용에 따른 지하수 함양량을 산정하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 해안면은 다른 달에 비해 7, 8월 여름철에 지하수 함양

량이 많은 것으로 판단되며 12월에는 지하수 함양량이 제일 적은 것으로 판단되었다. 이와 같은 이유는 지하수 함양량이 유역 특성 뿐 아니라 강우특성에도 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

- 2) 주거지역이나 도시화가 진행된 지역일수록 지하수 함양량이 크게는 200배 이상 차이가 있는 것으로 판단되었으며 이에 관련하여 농촌지역에서는 토지이용 및 토양특성에 따라 차등된 지하수 관리 계획이 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 해안면 만대천 유역의 작물별 지하수 함양량은 월별마다 각각 다르게 나타났으며, 파종이 시작되거나 작물 수확 후, 상대적으로 강수량 및 지하수함양량이 적은 갈수기인 봄과 겨울철에 본 연구의 결과를 바탕으로 한 작물별 적절한 지하수함양량 관리를 시행해야 할 것으로 판단된다.

- 4) 기존의 지하수 함양량을 산정한 방식들에 비해 본 연구에서 산정한 지하수 함양량 산정 방식은 지하수 함양량을 Map으로 제시 할 수 있으며, 연구구역에서 실측된 작물지도 및 영농방법을 바탕으로 HRU별 지하수 함양량을 추정하였기 때문에 보다 정확하고 시공간적인 지하수 함양량을 분석 할 수 있다고 판단된다.
- 5) 지하수 함양량은 절대적으로 해당되는 월의 강수량에만 영향을 받는 것이 아니라 이전에 함양되어 있던 지하수의 수량 및 용설 등 다양한 요인에 영향을 받을 수 있으며, 특히 용설이 지하수 함양량에 크게 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 향후 용설 장기 모니터링 자료와 지하수 함양량이 좀 더 정확하게 분석해야 될 것으로 판단된다.
- 6) 본 연구에서는 SWAT 2005 버전의 제한점으로 인해 지하수위에 대한 실측 자료와의 보정 없이 하천 유량에 대해서만 모형을 보정 하였으며, 향후 SWAT2009 버전으로 SWAT HRU Mapping module을 개발 및 적용 하여 실측 지하수위에 따른 모형의 보정을 실시한 후 지하수 함양량을 평가하는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 토양지하수오염방지기술개발사업 과제번호 C1008680-01-01(120120292) 식생조절방안/공학적이감공법/토지개발사업토양침식지감공법 개발의 연구비지원을 받아 수행하게 되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2006). 수자원장기종합계획, GOVP1200721496, pp. 36-69.
- 고용권, 배대석, 김천수, 김경수, 정형재, 김성용(2001). 환경동위원소를 이용한 여수지역 소유역에서의 지하수함양 특성 고찰, *한국지하수토양환경학회지*, 6(3), pp. 93-106.
- 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기(2009). 제주 지역 지표수-지하수 연계 해석, *한국환경과학회지*, 18(9), pp. 1017-1026.
- 김성준, 채효석(2000). 격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수함양량 추정기법 개발, *한국수자원학회논문집*, 33(1), pp. 61-72.
- 김진호, 이종식, 김복영, 홍승길, 안승구(1999). 경기도 지방 농업용 지하수 수질 현황, *한국환경농학회지*, 18(2), pp. 148-154.
- 김희원, 신연주, 최정현, 강현우, 류지철, 임경재(2011). 효과적인 유역관리를 위한 CN기법 기반의 침투량 산정 및 기저유출량 분석, *한국물환경학회지*, 27(4), pp. 405-413.
- 농림부(2007). 보성군 농촌지하수관리보고서, GOVP1200810808, pp. 11-13.
- 류지철, 문유리, 문종필, 김익재, 옥용식, 장원석, 강현우, 임경재(2010). SWAT HRU별 지하수 오염부하량 산정을 위한 SWAT HRU Mapping Module 개발 및 적용, *환경정책연구*, 10(1), pp. 49-70.
- 문상기, 우남철(2001). 누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양량 추정 기법, *한국지하수토양환경학회지*, 6(1), pp. 33-43.
- 박창근(1996). 우리나라 지하수 개발가능량 추정 : 2. 5대강 유역에서의 적용, *한국지하수토양환경학회지*, 3(1), pp. 21-26.
- 배상근, 김용호(2006). NRCS-CN방법과 기저유출 분리법을 이용한 지하수함양량 산정, *한국환경과학회지*, 15(3), pp. 253-260.
- 안승섭, 이병철, 최윤영, 박동일(2009). 지표수와 지하수 연계를 이용한 양수기간에 따른 지하수 유동특성 분석, *한국수처리학회지*, 17(3), pp. 127-139.
- 안정훈, 함세영, 이정환, 김남훈, 양대복, 황지광(2008). 물수지 및 수리지질 분석을 통한 울산광역시 중래천-보은천 지역의 지하수 함양량 산정, *자원환경지질*, 41(4), pp. 427-442.
- 안중기, 최무용(2006). 지하수위를 이용한 물수지분석법의 매개변수추정과 함양량산정, *한국수자원학회논문집*, 39(4), pp. 299-311.
- 유동선, 김기성, 장원석, 전만식, 양재의, 김성철, 안재훈, 임경재(2008) 실측 경사장 및 경사도를 고려한 양구 해안면 유역의 유사량 평가, 수질보전 *한국물환경학회지*, 24(5), pp. 569-580.
- 이도훈, 김남원, 정일문(2010). HELP 모형과 SWAT 모형의 지하수 함양량 비교, *한국수자원학회논문집*, 43(4), pp. 383-391.
- 이승현, 배상근(2004). SCS-CN방법을 이용한 평창강 유역의 강수 함양량 산정, *한국환경과학회지*, 13(12), pp. 1033-1039.
- 이지원, 엄재성, 김범철, 장원석, 류지철, 강현우, 김기성, 임경재(2011). 양구 해안면 만대천 유역의 실측 유량 및 수질 자료를 이용한 SWAT 모델 적용성 평가 및 초생대를 이용한 수질저감 효과분석, *한국농공학회논문집*, 53(1), pp. 37-45.
- 정영훈, 김경호(2000). SCS-CN 방법에 의한 미원면의 지하수 함양량 추정, *건설기술연구원*, 19(2), pp. 181-190.
- 최병수, 안중기(1998). 지역단위 지하수 자연함양을 산정방법 연구, *한국지하수환경학회지*, 5(2), pp. 57-65.
- 최윤영, 최정우(2010). 토지이용변화에 따른 유사량 특성분석을 위한 SWAT모형의 적용, *한국수처리학회지*, 18(1), pp. 59-72.
- 최해진, 조남규, 유기억, 최봉수, 김성문(2009). 양구군 해안면 친환경농업 경작지의 잡초 발생 실태, *한국잡초학회지*, 29(1), pp. 32-38.
- 허성구, 김기성, 김남원, 안재훈, 박상현, 유동선, 최중대, 임경재(2008). 토지피복도 정확도에 따른 SWAT 예측 오류 평가, 수질보전 *한국물환경학회지*, 24(6), pp. 690-700.
- Andres, G. and Egger, R. (1985). A New Tritium Interface Method for Determining the Recharge Rate of Deep Groundwater in the Bavarian Molasse basin, *Journal of Hydrology*, 82, pp. 27-38.
- Arnold J. G., Mutiah, R. S., Srinivasan, R., and Allen, P. M. (2000). Regional Estimation of Base Flow and Groundwater Recharge in the Upper Mississippi river basin, *Journal of Hydrology*, 227, pp. 21-40.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). "Large area Hydrologic Modeling and Assessment: part I: Model Development," *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Coffey, R., Cummins, E., Bhreathnach, N., Flaherty, V. O., and

- Cormican, M. (2010). Development of a Pathogen Transport Model for Irish Catchments using SWAT, *Agricultural Water Management*, 97, pp. 101-111.
- Donigian, A. S. and Love, J. T. (2003). Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling, *WEF Specialty Conference Proceedings*, pp. 16-19.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., and Still, D. A. (1987). GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, *American Society of Agricultural Engineers*, 30(5), pp. 1403-1418.
- Rao, M. N. and Yang, Z. (2010). Groundwater Impacts Due to Conservation Reserve Program in Texas County, Oklahoma, *Applied Geography*, 30, pp. 317-328.
- Solomon, D. K., Schief, S. L., Poreda, R. J., and Clarke, W. B. (1993). A Validation of $3\text{H}/3\text{He}$ Method for Determining Groundwater Recharge, *Water Resource Research*, 29, pp. 2951-2962.
- Water Resources Research Institute of the University of North Carolina. (1978). *A Water Management Model for Shallow Watertable soils*, pp. 1-24.