

통합수문해석에 의한 청원 수막재배단지의 장기물수지 분석

장선우^{1,*} · 정일문¹ · 김용철² · 문상호²

¹한국건설기술연구원 수자원하천연구소

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지하수연구실

요 약

충청북도 청원군의 수막재배지역에서는 동절기 지하수를 시설재배에 이용하기 위해 하천변 천부 대수층에서 지하수를 집중 취수하여 지하수자원의 고갈을 초래하고 있다. 지하수위의 관측을 통하여 1차적인 지하수 고갈을 확인할 수 있으나 실증지역 전체의 지하수 고갈 여부 및 수막재배의 지속가능성을 파악하기 위하여 통합수문해석에 의한 물수지를 분석을 수행하였다. 청원군의 수막재배 지역을 중심으로 3차원 유한차분모형인 MODFLOW를 구축하였으며, 지하수모형에 입력할 지하수 함양량 시계열 자료는 유역수문모형 SWAT모형이 제공한 시변성 함양량 자료를 이용하였다. 2012년부터 2014년까지 2년 동안의 모의기간 동안 관측정에서 수집한 지하수위 시계열 관측값과 모의값을 비교하여 모델의 타당성을 입증한 후 대수층 중심의 정량적인 물수지 분석을 구현하였다. 마지막으로 인공함양 시나리오를 주입량을 각각 20, 40, 60%로 구분하여 모의한 결과를 바탕으로, 현 실증부지의 하천변 지하수의 수막 용수활용이 지속가능하도록 적정 인공함양 방식을 제안하였다.

주요어: 수막재배, 지하수, MODFLOW, SWAT, 물수지분석

Sunwoo Chang, Il-Moon Chung, Yongchel Kim and Sang-Ho Moon, 2016, Long-term groundwater budget analysis based on integrated hydrological model for water curtain cultivation site: Case study of Cheongweon, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 201-210

ABSTRACT: Water curtain cultivation (WCC) areas at Cheongweon-gun in Chungcheongbuk-do Province consumes groundwater resources due to intensive withdrawal of groundwater from shallow aquifers in winter season. The massive development of groundwater has resulted in the seasonal depletion of groundwater resources. In addition to observation of groundwater levels, the water balance analysis was performed using integrated hydrologic analysis to determine the substantiality of WCC water use. In this study, a three-dimensional finite difference model using MODFLOW was built to simulate groundwater flow. Groundwater recharge time series data to be entered into the model were acquired by basin hydrological model (SWAT model). Validation process was performed based on water-level observations collected from monitoring wells for two years from 2012 to 2014, then quantitative water balance analysis of the aquifer was tested. Finally, three scenarios for artificial recharge and recovery (ASR) were simulated that injected 20, 40, 60 % of total water use, respectively. This results suggested an appropriate artificial groundwater recharge scheme for sustainable management of WCC near streamflow.

Key words: water curtain cultivation (WCC), groundwater, MODFLOW, SWAT, water budget analysis

(Sunwoo Chang and Il-Moon Chung, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Construction Technology (KICT), 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea; Yongchel Kim and Sang-Ho Moon, Groundwater Department, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 124 Kwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

최근 우리나라의 하천 주변지역에 위치한 대부분의 농경지에서는 비닐하우스로 덮여있는 형태의 시

설재배면적이 폭발적으로 늘고 있다. 이 재배 형식은 겨울철 온실 난방에 지하수를 사용하는 동절기 시설 재배방식으로 현재 우리나라의 많은 농경지에서 채택하고 있다. 수막재배단지는 주로 하천 주변

* Corresponding author: +82-31-910-0278, E-mail: chang@kict.re.kr

에 대규모 단지 형태로 집중되어 있어 제한된 영역에서의 수막용수 과다사용은 지하수위의 고갈을 초래하며 이에 따라 지속적인 수막용수 확보에 어려움을 겪고 있다. 수막재배는 1984년에 한국에 보급된 이후 급속히 확산되어 2006년에는 10,746 ha의 시설에서 사용되고 있는 것으로 추정되었는데(KIGAM, 2013), 한편으로 MAF (2013)는 2012년에 국내 수막재배시설 규모를 5,635 ha로 추정하기도 하였다.

수막재배는 지하수 고갈과 같은 부정적 측면도 있으며 실제 지하수 부족으로 어려움을 겪고 있는 곳이 있어 무조건적인 지하수 개발 대신 적정 지하수 개발에 대한 가이드라인이 필요한 실정이다. 이에 따라 Kim *et al.* (2015)는 순환식 수막하우스 수온에 따른 온도변화를 분석하여 저온성 작물인 딸기재배용 수막시스템의 에너지비용을 절감하고 적정수온을 결정하고자 외부온도, 수온, 수막유량 등에 따른 수막하우스의 환경변화를 종합적으로 분석한 결과, 수막용수의 수온을 획일적으로 15°C 이상으로 설정하기 보다는 야간시간대에 따라 다르게 설정함으로써 순환식 수막시스템의 에너지비용을 절감할 수 있을 것으로 판단하였다.

하천변에 위치한 지하수자원은 기후변화에 따른 강수-자연함양량의 변화와 같은 수문기상적 영향, 주변 토지이용, 각종 하천환경, 하천변시설 등의 정비상태, 농업용수의 취수방식 등으로부터 큰 영향을 받는다. 이처럼 자연과 인공환경으로부터 복잡하게 영향을 받는 하천변 지하수의 물순환 상태를 파악하

고 수자원 고갈 및 수환경 오염에 대비하기 위해서는 각 수문성분의 거동을 파악하여야 하며, 현장에서 수집한 원자료를 이용하여 해당 지하수계에 대해 수문성분별로 왜곡되지 않은 정량적 평가가 가능해야 한다.

본 연구의 선행연구에 해당하는 Chang and Chung (2014)은 수막재배지역에서 일 최저기온과 지하수 이용량의 상관관계를 이용해 수막재배지역의 지하수 양수 패턴을 파악하고 이를 바탕으로 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)와 유역수문모형 SWAT (Arnold and Fohrer, 2005)을 연계한 실증지역 정밀 지하수 모델링을 수행하였다. 또한 Chang and Chung (2015)은 누적물수지 분석 방식을 수막재배 지역 지하수 이용 분석에 처음으로 도입하여 시기별, 경계조건별 정밀 분석을 실시하였다. 이에 본 연구는 물수지 분석 범위를 확장하여 본 실증부지의 장기적 물수지 고갈 여부를 판단하기 위해 2년동안의 물수지 분석을 바탕으로 대수층의 지속성 여부를 증명하고자 하였다. 또한 인공함양 시나리오를 적용하여 지속가능한 수막재배 이용방식에 대해 제안하고자 하였다.

2. 연구부지특성

실증연구지역인 충북 청원군 가덕면 상대리 일대는 금강권역 미호천유역에 해당한다. 본 연구의 대상지역인 청원군 가덕면 상대리는 무심천 중상류에 위치하며 논농사지역과 최근 비닐하우스로 대표되는 시설재배지역이 혼합된 영농지역이다(그림 1). 수막재배 및 기타 농경활동을 위한 관정이 재배지역에 산재하여 있고 비닐하우스에서 주로 딸기를 재배한다. 이 지역의 시설재배지는 겨울철에 지속적인 지하수위 하강으로 인한 일시적 지하수 취수량 감소를 겪고 있다.

청원군 지질은 화성암과 변성퇴적암 그리고 층적층으로 구성되어 있다. 지질시대, 암상, 공극형태, 지하수의 수리적 특성 등을 고려하면 본 연구 부지의 수문지질단위는 관입화성암에 해당한다(KIGAM, 2013). 지질학적 비균질성(heterogeneity)이 존재하지만 평균적으로 지층 구성은 상부로부터 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 분포하며, 연암층은 보통 지하 35 m 아래에 위치에 있다(KIGAM, 2013).



Fig.1. Aerial View of Water Curtain Cultivation area at Cheongweon, Korea (Google Earth, 2016).

지질은 동쪽으로부터 이어져오는 청주화강암 위에 하천의 범람으로 인해 퇴적된 충적층(Alluvial Layer)이 위치한다.

남한 정중앙에 위치한 무심천 유역의 최상류부에 위치한 충북 청원군 가덕면 상대리 일대 수막재배 실증지역은 북동방향에서 흘러내려오는 무심천이 곡류하여 만들어진 하천 흐름의 동쪽 방향 제외지에 위치해 있다. 무심천 근처는 비교적 평탄한 지형이며 시험유역 북쪽은 100 m에 달하는 낮은 산악지형이다. 모델 영역 외부로 하천 상류가 이어지며 하천 최상류에 소규모 저수지가 존재한다.

3. 연구방법

3.1 현장실측에 의한 자료 확보

3.1.1 지하수관측자료

현지 조사 결과 수막재배기간에 모터가 가동중인 지하수 취수정은 56개소이며 지하수위 실측을 위한 관측정들은 주로 모의 지역 중 수막재배 하우스가 집중적으로 배치된 서측과 북측에 위치하고 있다. 관측정은 무심천 제방을 따라 남북 방향으로 5개소

가 설치되어 있으며, 제외지에 해당하는 수막재배 영역에 위치한 관측정들은 7개소가 있다.

3.1.2 지표수관측자료

모의 영역 내에 위치한 상시하천인 무심천은 보의 영향으로 비교적 유속이 느리고 여름 장마철을 제외한 기간에는 수위변화가 미미한 것으로 나타났다. 실증부지를 지나는 하천의 중심에 위치한 보를 기준으로 하천의 특성이 구분되며 보 하류에 위치한 하천수위 측정 시계열 자료(CWR-01)와 상류의 측정자료(CWR-02)가 각각 상하류의 특성을 보여주고 있다(그림 2). 보의 상류는 하천수위가 큰 변동이 없고 호우에 의한 여름철 수위 변동 폭도 하류보다 비교적 작은 것을 시계열 그래프로부터 알 수 있다. 하천 하류의 시계열 자료는 2013년 4월 18일 자료부터 11월 16일까지 측정장비의 손실로 자료를 확보하지 못하였다. 하류의 수위 변동폭이 하절기에 크기 때문에 모의 영역에 가까운 금강 홍수통제소 하천수위 측정자료를 이용해 누락된 자료를 복구하였다.

그림 3의 점선은 모의 영역에서 약 4 km 하류에 위치한 용평교 하천수위 측정자료에서 2012년 7월 9일부터 18일간의 수위자료를 시계열로 표현한 것이며 같은 시간 동안의 수막재배 무심천 하류인 CWR-01 시계열자료를 실선으로 나타내었다. 그래프에서 두 수위 변화 양상이 비슷하였으며 3개의 눈에 띄는 수위 변화 최고점을 비교하였을 때 침두부 발생시각에서 유의미한 지연시간은 나타나지 않았다. 또한 두 침두부 높이의 차이는 ± 0.4 m 범위 이내로 파악하였다. 이와 같은 비교를 바탕으로 용평교 자료를 활

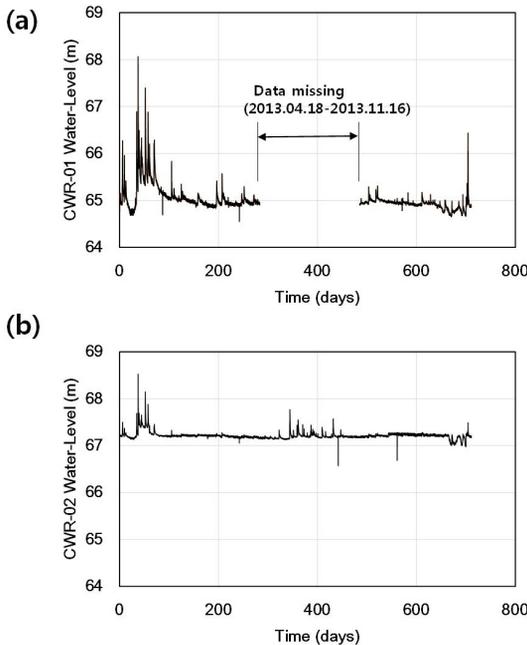


Fig. 2. Water level at (a) lower stage of the river, CWR-01 and (b) upper stage of the river, CWR-02.

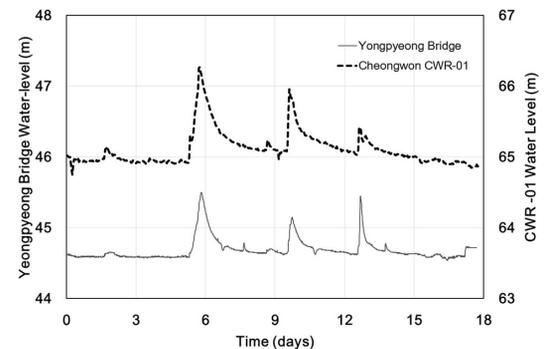


Fig. 3. Comparison with river stage of CWR-01 with water levels transmitted from monitoring station of Geum River flood Control Office.

용가능한 자료로 판단하여, 모의영역의 손실 구간인 2013년 4월 18일부터 11월 16일까지를 용평교의 자료를 대입하여 손실 구간을 복구하였다.

3.1.3 수막재배용 지하수 이용 형태

조사 지역에서 이용되고 있는 지하수공의 굴착심도는 평균 50 m 이다. 조사 지역 내 관정들의 모터는 대부분 농업용 양수를 위한 지상펌프 형식으로 천부대수층의 지하수를 개발하는데 사용되고 있다. Moon *et al.* (2012)는 관측지역 내 지하수 이용량을 추정하여 수막재배용 지하수 사용량 및 배출량 분석을 위해 청원지역 수막지역을 대상으로 대표 관정들의 모터사양, 최저기온 변화에 따른 모터의 가동 상황등을 분석하여 2011년과 2012년 겨울철 수막재배에 이용된 지하수 이용량을 1 ha당 53,138 m³으로 추정하였다. 본 연구에서는 이와 같은 연구방식을 참고해 가동 시간 및 가동 여부가 일 최저기온에 영향을 받는다고 가정하여 개별 관정의 일평균 토출량을 68 m³/day로 가정하고 가동 시간은 대략 일몰 직후부터 다음 날 일출 후 아침까지의 시간에 해당하는 0.68일로 결정하여 모델 입력값으로 반영하였다. 또한 총 56개에 해당하는 관정을 두 그룹으로 구분하였다. 첫 번째 그룹은 기온이 0°C 이하로 내려가면 모터를 가동하고, 두 번째 그룹은 -5°C 이하로 기온이 내려가는 날에 가동을 시작한다. 0°C와 -5°C사이에는 첫 번째 그룹의 모터만 가동한다. 주로 수막재배 시작일에 해당하는 11월 하순은 최저기온이 낮지 않아 일부 모터만이 가동되며 그 외에는 대부분 일일 최저기간이 지속적으로 영하 5°C보다 낮아 실증부지에 설치되어 있는 모터를 모두 가동한다. 또한 수막재배 종료되는 3월 초순은 최저기온이 점차 올라가는 시기이기 때문에 일부 모터만 가동하다가 수막재배 종료에 따라 모든 관정을 사용하지 않게 된다.

3.2 수치모형 구축

3.2.1 유역수문 모형을 이용한 시변성 지하수 함양량 산정

본 연구에서는 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모형(Arnold and Fohrer, 2005)을 이용해 모델 적용 기간 동안의 청원지역 지하수 함양량을 산정하였다. 지하수 함양량은 2012년부터 3년동안

의 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등의 청주 기상대 기상자료를 이용하여 계산하였으며 수문자료로서 하천유출량 자료는 청주수위표의 자료를 이용하였다. 계산한 지하수위 함양량은 지하수 유동모델의 부정류 모의에 사용할 수 있는 일자료로 표현되었으며 해당기간 지하수의 시계열 자료와 비교하여 모델값을 검증하였다(Chang and Chung, 2014, 2015). 본 연구의 시험 부지는 소유역 면적보다 크지 않기 때문에 모델상에서 함양량의 공간분포는 고려하지 않았다. Chang and Chung (2015)는 청원 수막재배 지역의 물수지 특성 분석에서 2013년 8월에서 2014년 2월동안의 지하수 함양량을 SWAT 모형을 이용해 분석한 결과 청원정밀지역의 지하수 함양량은 강수 대비 약 15%에 이르는 것으로 계산하였다.

3.2.2 지하수 유동모형을 이용한 지하수위의 시공간 분포 해석

모의 영역 내의 대수층 내 지하수 부존 상황을 파악하고 국지적 물순환 기작을 해석하기 위하여 분산형 3차원 지하수 흐름 모델을 구축하였다. 모델의 구상하는 경우 해석기반의 모델링 영역의 설정하고, 각종 자료 및 실측으로부터 수리지질학적 매개변수 값과 범위를 결정하며 동시에 각종 수체 및 대수층의 유입/유출 방식을 추론하여 경계 조건을 설정하였다. 특히 대수층의 깊이, 대수층과 가압층의 두께, 지표수와 하천의 위치, 대수층의 경계조건 등을 포함하는 대수층의 물리적 형태와 대수층의 투수량계수 또는 투수율, 대수층의 저류계수, 가압층의 투수율과 비저류계수, 대수층과 지표수간의 수리적 연결성과 같은 수리정보가 필요하다.

MODFLOW에서 사용하는 3차원 흐름 모형은 다음 Eq. (1)과 같은 편미분 방정식을 통해 나타나며 이를 통해 지하수의 공간-시간적 변화 및 하천-대수층의 수리학적 상호작용을 설명하고자 하였다.

$$\frac{\delta}{\delta x} (K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z}) + W = S_s \frac{\delta h}{\delta t} \tag{1}$$

where K_{xx}, K_{yy}와 K_{zz}는 x, y 및 z 방향의 수리전도도값 [L/T]

h는 지하수위 또는 수두 [L]

W 는 함양율
 (음의 값의 경우에는 지하수 양수량) $[T^{-1}]$;
 S_s 는 대수층의 비저류계수 [L]

지하수 유동 모델에서의 하천흐름은 하천으로 대 표되는 수체와 대수층 사이의 지하수흐름을 모사하기 위해 하천패키지(McDonald and Harbaugh, 1988)

를 이용하여 모의할 수 있다. 연구 목적에 따라 하천 경계는 Stream (STR) 패키지 또는 River (RIV) 패 키지로 선택하여 설정할 수 있다. 본 연구에서는 모 델 영역의 서쪽 및 남쪽 영역에 위치한 무심천을 따 라 모의 영역 내에 위치한 보와 같은 여러 개의 하천 인공 구조물로 인해 조도계수 등 하천유속에 상관하 는 인자가 미치는 영향이 크지 않을 것으로 가정하여 River package로 하천 경계를 설정하였다. 경계조건 을 설정할 때는 수리전도능력(Conductance)에 대한 이해가 필요하다. 다른 경계조건과 다르게 하천의 특성에서 기본적으로는 MODFLOW의 기본 원리인 Darcy's law를 이용해 흐름을 반복 계산하여 하천 주변의 지 하수위를 구하는 추정과정이 들어가게 된다. 그림 4 는 하천의 기하학적 변수를 격자규격의 개념적인 모 식도로 표시한 것으로 이에 따른 하천과 대수층 사 이의 지하수흐름은 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있으며 여기서, Q 는 지표수체와 대수층 간 누수량 $[L^3/T]$, C 는 conductance 값, L 은 한 격자 당 하천 지류 길이 [L], W 는 하천 너비 [L], K 는 하천 바닥의 투수계수 $[L/T]$, h_s 는 하천수위 [L], h_a 는 하천 수직 방향으로 아래쪽에 위치한 대수층 내 수두 [L]를 나타낸다. Eq. (2)에서 하천 수위와 하천 바닥 아래 지하수위 차를 제외한 나머지 수리전도도, 하천 길이, 바닥 두께, 하 천 너비는 수리전도능력이라는 변수로 다시 표시될 수 있으며 이 값은 하천과 대수층 사이의 흐름 저항 으로 해석될 수 있다.

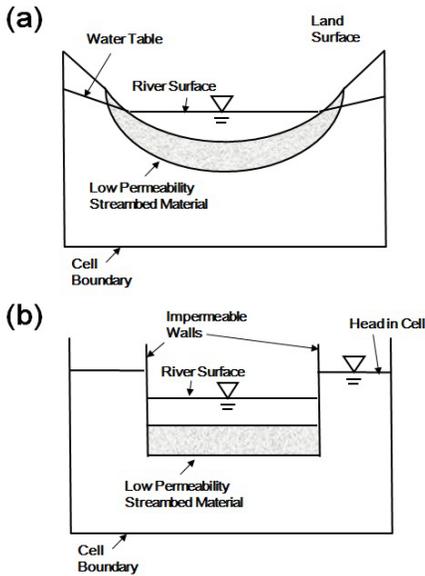


Fig. 4. (a) Cross section of an aquifer containing a stream and (b) Conceptual representation of stream-aquifer interconnection in simulation (modified from McDonald and Harbaugh, 1988).

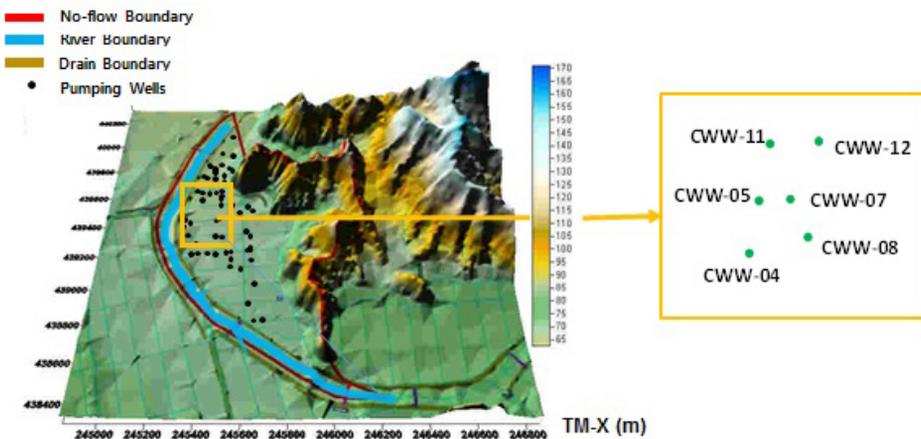


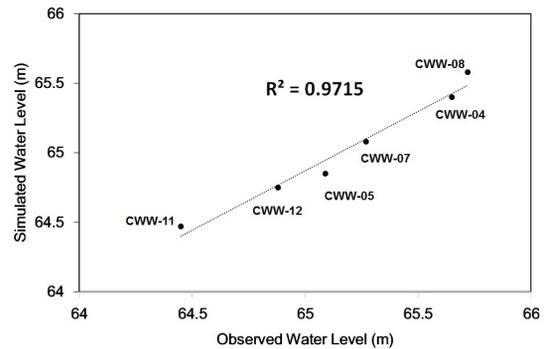
Fig. 5. Boundary conditions for WCC groundwater flow model by MODFLOW (Modified from Chang and Chung (2015)).

Table 1. Model layer properties.

	Thickness	Aquifer type	Hydraulic conductivity (m/sec)		Specific yield	Storage coefficient
Layer 1 (Surface layer)	12	Unconfined	$3.2 \times 10^{-5} \sim 9.1 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5} \sim 9.1 \times 10^{-5}$	0.09	
Layer 2 (Weathered rock)	20	Confined	2.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}		1×10^{-5}
Layer 3 (Soft rock)	50	Confined	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}		1×10^{-4}

$$Q = \frac{KWL}{M}(h_s - h_a) = C(h_s - h_a) \quad (2)$$

연구시설이 위치한 지역의 지형 고도 및 분수령에 의한 경계를 파악하기 위해 수치지형도(30707071_008, 30707071_009)에서 표고별 등고선을 추출하여 격자별 자료로 변환 후 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)을 생성하여 MODFLOW 입력자료로 활용하였다(그림 5). 불투수성 기반암 및 실증부지의 분수령 등 모의영역 외곽은 무흐름 경계(no-flow boundary)로 설정하였고, 토양층의 물이 침투과정을 거쳐 대수층으로 유입되는 함양(recharge boundary)은 SWAT으로 산정한 시계열값을 활용하였다. 대수층의 주변에 발달한 소하천은 MODFLOW의 하천(RIV) 패키지를 이용하여 경계조건을 설정하였다. 모의영역을 1200×1800 m의 면적에 대하여 수렴 시험을 통해 5×5 m 크기의 격자로 360개의 열과 240개의 행으로 구분하였다. 약 80 m 깊이의 모델 지층은 지질학적 성격에 따라 3개의 층으로 구분하고 각 지층의 수리지질학적 매개변수 자료들의 입력값을 표 1에 나타냈다. 지표에 가까운 2-3 m 두께의 표토층은 비포화대수층으로 볼 수 있으나 본 수치모의는 포화대 지하수 흐름 모형을 가정하였다. 따라서 표토층을 개별적인 층으로 나누지 않았고 모델의 첫 번째 층(1st layer)인 비피압대수층에 포함시켰다. 모델의 1층은 풍화토를 대표하는 층으로 현장 실측의 한 방법인 양수 시험으로 얻은 수리전도도 값을 통계적 내삽방식을 이용, 공간분포를 추정하였다. 이 때 양수시험을 수행할 수 없었던 동쪽 야산지대의 수리전도도값들은 지형고도가 높을수록 적은 값을 배당하는 방식으로 할당하였다. 본 연구는 Chang and Chung (2015)가 청원 수막재배 부지를 2012년 7월 10일부터 2014년 3월 2일까지 모의한 결과를 바

**Fig. 6.** Comparison with observed water levels and simulated water levels.

탕으로 모의 기간을 2014년 7월 30일까지로 늘려 모의를 수행하였다. 관측값에 대한 추가적인 보정 과정이 수행되어 Chang and Chung (2015)이 이용한 수리전도도 분포값이 상향 조정되었고 그 결과, 1층의 수리전도도는 $3.2 \times 10^{-5} \sim 9.1 \times 10^{-5}$ m/sec이며, 2층과 3층의 수리전도도는 각각 2.0×10^{-6} m/sec, 1.0×10^{-5} m/sec의 값을 할당하였다. 나머지 수리지질학적 지층 특성에 해당하는 값은 표 1에 표현되어 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 지하수위 분석

모델 보정은 실제 현장 관측치 기준의 등수위선도와 지하수위 시계열, 함양량과 배출량 등의 물수지 모의 결과 등을 바탕으로 대수층 수리특성값이 타당한지를 검토하였고 현장에서 실측한 지하수위 시계열 값이 합리적인 범위 내에서 일치되도록 모델의 수리전도도, 저류계수 등의 입력변수값을 조정하였다. 그림 6은 수막 재배 시작 전 기간인 8월 3일 기준 관측점에서 수집된 자료와 MODFLOW로 모의

한 결과값을 비교한 그래프로 결정계수(R^2)값이 0.97에 해당하는 비교적 좋은 상관관계를 얻을 수 있었다. 하천 하류에 가까울수록 또는 하천에서 거리상 멀어질수록 지하수위 값은 낮아지는 양상을 보였으며 모든 관측정값이 모델 상에서도 유사하게 구현되는 것을 확인할 수 있다.

선행 연구(Chang and Chung, 2014)에서는 2012년 11월에서 2013년 2월까지 수막재배를 위한 지하수 이용 기간인 107일 동안 제외지에 위치한 CWW-11 관측정을 주 논의 대상으로 하며 이 외에 CWW-04, CWW-05, CWW-07, CWW-08, CWW-12 관측값은 모델 보정 과정(calibration)에서 사용하였다. Chang and Chang (2015)이 모의기간 607일을 대상으로 하여 수막재배 기간의 지하수 하강 뿐만 아니라 하절기에 강수에 의한 대수층 지하수위 변화를 포함하여 모의한 결과를 논의하고 각 경계조건의 누적 물수지 분석을 실시하였는데 반해, 본 연구는 모의기간을 791일로 확장하여 모의 기간 중 두 번째 수막재배인 2013년에서 2014년 동절기 이후 지하수위 회복을 모의에 추가하여, 두 번에 걸친 지하수 고갈-회복 패턴 주기를 완성하였고 전·후 년도의 수막재배에 의한 영향을 고려한 물수지 기반 해석 방식을 완성하고자 하였다. 즉, 본 연구는 1) 하절기 강수에 의한 대수층 충전, 2) 수막재배에 의한 지하수 고갈, 3) 수막재배 종료 후 하천에 의한 유도 함양 기간이 일어나는 1년이 수막재배 주기로 인식하였고 분석 시작 시기 및 본 연구의 그래프도 이와 같은 주기를 따른다. 그림 7은 선행연구인 Chang and Chung (2015)에서 해석했던 관측정인 CWW-11의 지하수위 하강-상승 곡선 모

의 결과를 검보정 및 모의 기간 연장 후 다시 표현한 해석이다. 관측 시작일인 2012년 6월 1일부터 약 791일 동안 약 2년간의 지하수위 변화를 모의한 결과 모의 시작 후 두 달 동안은 우기에 비해 상대적으로 적은 강수에 의해 지하수위 변화가 미미하였기 때문에 그래프에서 8월부터 700일 동안의 기간을 집중적으로 조명하였다. 이 기간 동안 두 번의 지하수위 하강 및 회복 사이클을 관측값과 비교한 결과, 본 연구에서 모의한 CWW-11의 시계열값은 선행 연구(Chang and Chung, 2015)에 비해 더욱 모의결과가 관측값에 가깝게 재현되고 있다. 그림에서 점으로 나타나는 것은 관측정에서의 실측 관측에 의한 지하수위이고 실선은 MODFLOW를 이용한 정밀 모델링 결과인데, 수막재배가 시작하면 지하수위 하강 양상은 초반에 급격한 기울기를 보이며 낮아지면서 점차 하강세가 둔감해진다 수막재배가 종료하면 약 3~4달에 걸쳐 수위를 회복한다. 주목할 점은 첫 번째 수막기간과 두 번째 수막기간 동안의 동절기 기온이 크게 차이가 나지 않았음에도 불구하고 두 번째 수막기간에 지하수 하강이 더 큰 폭으로 발생했다는 점이다. Chang and Chung (2015)은 이에 대해 하절기 강수에 의한 대수층 충전 정도의 차이를 지하수 하강폭 변화의 요인으로 지목하고 물수지 분석을 추가로 시행하여 이 가설을 검증하고자 하였다. 또한 물수지 분석이 실증부지의 대수층의 지속가능한 개발여부를 판단할 수 있는 토대가 되며, 모의 기간을 충분히 확장한다면 해당 부지의 지하수 개발의 지속성 여부를 판단할 수 있는 분석방식이라고 판단하였다.

4.2 물수지 분석

대수층 중심의 물수지 개념이란 대수층으로의 유입과 대수층으로부터의 유출에 대한 수지를 분석하는 것으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 물수지 분석을 위한 정량적인 수치들은 특정한 기간 내에 발생한 대수층 내 지하수 유입/유출의 누적 부피 [L^3]로 표현된다. 대수층이 겪게 되는 물수지 유입/유출 변화는 수막재배 기간의 양수 패턴에 영향을 받게 된다. 그림 8은 양수에 의해 고갈된 대수층 지하수가 하천에 의한 유도함양 및 강수에 의한 자연함양으로 충전되는 것을 보여주고 있다. 그림의 가는 점선(Groundwater Out)은 양수에 의해 대수층에서 지하수가 제거되며 수막기간 동안 그 값이 급격히 늘어나는 것을 보여

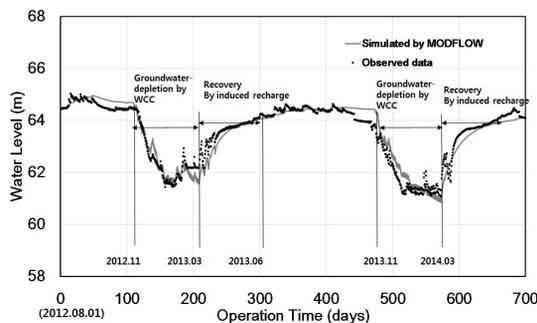


Fig. 7. Comparison of observed and simulated water-level for groundwater drawdown and recovery pattern in monitoring well, CWW-11 (Modified from Chang and Chung (2015)).

주고 있고, 굵은 점선(Groundwater In)은 느린 충전속도로 대수층의 지하수 자원이 다시 회복되는 양상을 보여주고 있다. 얇은 유출/유입의 차를 표현한 값은 실증부지의 상대적 지하수 부존량(Net storage)로 해석되며 검은색 실선으로 나타나 있다. 이 값은 2012년 7월 1일 기준으로 수막재배 전까지 강우에 의해 대수층이 충전되어 있는 것을 양(+)의 값으로,

수막재배에 의해 대수층이 고갈된 것을 음(-)의 값으로 표현하면서 대수층의 고갈과 회복패턴을 명료하게 보여주고 있다. 또한 이 패턴의 형태가 앞서 그림 7에서 제시한 지하수위의 하강-회복 곡선과 유사한 것도 흥미로운 지점이다. 2012-2013년 수막재배로 인한 상대 부존량의 최저점은 -140,000 m³인데 반해 2013년 우기에 전년도만큼 대수층이 충전되었지 않음을 보여주고 있다. 이 값은 2013년 우기에 강수량이 적어서 생긴 현상이 아니라 1년 해석 주기완료 시점인 2013년 7월 1일까지 하천에 의한 유도함양으로 충전되는 지하수 부존량이 전년 수준을 회복하지 못하였기 때문이다. 결국 전년도에 수막재배에 의한 지하수 고갈이 1년 동안의 대수층 충전으로도 회복되지 않았기 때문에 2013-2014년 수막재배 기간 종료 시점의 상대 부존량 값은 -184,000 m³으로 전년도 최저점보다 낮아졌다. 두 최저점을 비교할 때 대수층이 고갈이 하천이나 강수에 의한 함양으로 완전히 회복되기 어렵고 고갈 정도가 해마다 심화될 수 있음 정량적으로 확인할 수 있었다. 이 패턴이 지속된다면 실증부지 고갈의 형태가 장기적이고 비가역적인방

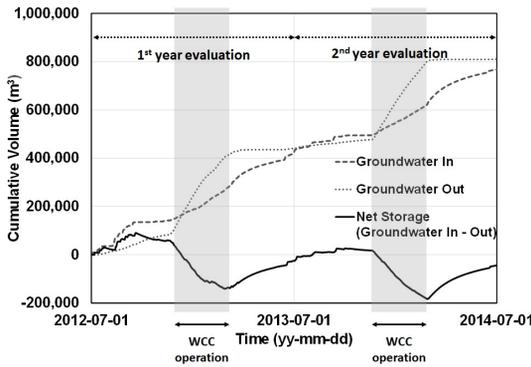


Fig. 8. Cumulative volume change and the corresponding net storage in the shallow aquifer of WCC area.

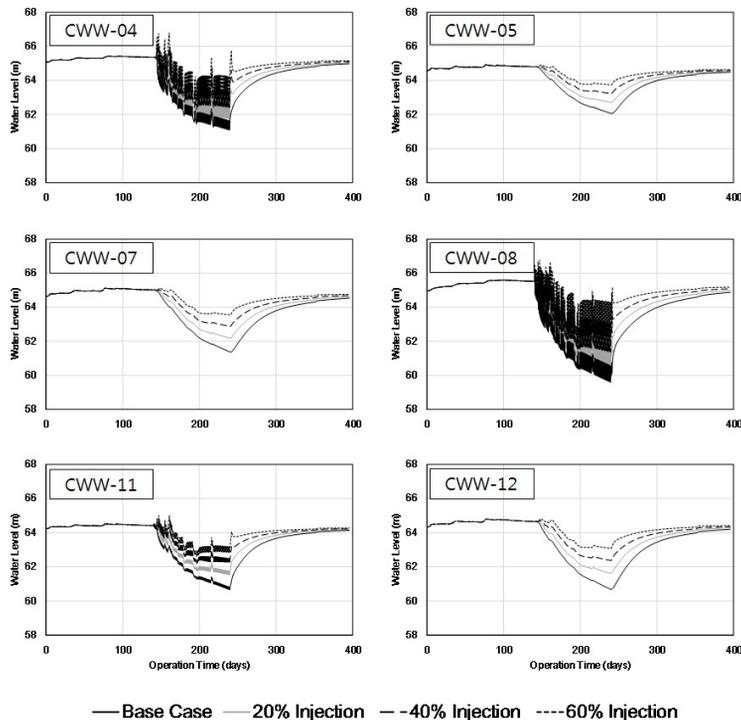


Fig. 9. Temporal variation of simulated groundwater level (m) for artificial recharge scenarios.

향으로 갈 수 있음을 짐작할 수 있다.

4.3 인공함양 시나리오 적용

정밀 모델을 이용하여 시설 부지에 인공함양을 모의하였고, 이 때 재주입율을 달리해 3가지 시나리오를 구축하였다. 두 번의 수막재배 기간이 있는 전체 모의 기간에서 두 번째 수막재배 기간에 해당하는 2013-2014년을 대상으로 인공함양을 실시하였으며 주입 기간은 2013년 11월 수막재배 기간과 동일하다. 지하수 주입은 양수 위치에서 양수가 진행되지 않는 동안 주입되는 것으로 시나리오를 구성해 모의를 수행되었다. 20% 재주입 시나리오는 2013년 11월 20일이 첫 수막재배 시작일이었으며, 수막재배에 의한 양수 시간인 평균 0.68일(16시간)을 제외한 나머지 시간인 0.32일 동안 40 m³/day의 유량을 재주입하여 인공함양을 실시하였다. 기온에 따라 양수를 적게 하거나 양수하지 않는 기간 동안은 같은 유량으로 재주입 시간을 늘려 실시하였으며, 수막재배 시작 하루전일인 19일에도 재주입을 15.6시간을 실시하여 전체 수막재배 용수의 20% 재주입 시나리오를 완성하였다. 40%, 60% 재주입 시나리오는 주입 시간이 20% 재주입 시나리오와 동일하고 주입유량을 80, 120 m³/day로 늘려서 시나리오를 구축하였다.

그림 9는 수막재배를 시작한 시점에 인공함양에 의한 양수 주입을 시행했을 경우의 수위상을 나타내는 그래프이다. 6개의 그래프에서 각각 앞서 소개한 6개의 관측정 위치에서 모의한 지하수위를 볼 수 있다. 2013년의 7월 1일을 기준일로 삼아 지하수위 하강 및 회복이 일어나는 1년 동안의 지하수위 변동을

Base-Case인 설정하였으며 그래프에서 검은색 실선으로 보여진다. 주입율이 증가할수록 하천의 하강 규모가 작아지며, 하강 폭이 컸던 위치일수록 지하수위 회복이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 수위 회복에 의한 지하수 함양 효과는 국지적 지역에서도 관측 위치에 따라 다른 값을 보여주고 있으므로 물수지 분석을 통해 시변성 대수층 부존량 분석을 추가로 실시하였다.

부존량 분석 방식은 앞서 소개한 지하수 대수층의 물수지 분석 방식을 이용한 예측 방식이다. 그림 10은 2013-2014년 수막재배 기간에 적용한 인공함양 시나리오에 의한 정밀모델 모의 결과를 각 시나리오별 부존량 변화로 표현한 것이며, 재주입을 실시하지 않은 2013-2014 수막재배 실제 사용 패턴(검은색 실선)을 상대적 부존량으로 구현한 후 용수의 20, 40, 60% 재주입을 실시하였을 때의 대수층의 물수지 특성 변화를 각각 비교하였다. 상대적 부존량은 앞서 그림 8에서 보인 바와 같이 대수층의 누적 유출, 유입량의 차에 해당하는 대수층의 지하수 저장량으로 해석할 수 있다. 각각의 시나리오에 따라 인공함양 기법을 적용했을 경우, 수막기간 종료 직후 상대적 부존량의 최저점이 -142,000 m³, -106,000 m³, -71,000 m³로 상승한다. 전년도인 2012-2013년 수막재배 기간의 지하수 손실 최저점인 -141,000 m³와 비교해보면 20% 주입 시나리오가 전년도의 대수층 수준으로 유지시켜 주는 것을 알 수 있다. 주입량을 늘여갈수록 대수층의 교란 정도가 적어지기는 하나 인공함양을 위해 투입하는 최적 에너지 소모량을 고려한다면 무조건 주입량을 늘여가는 것은 좋은 방식으로 보기 힘들 것이다.

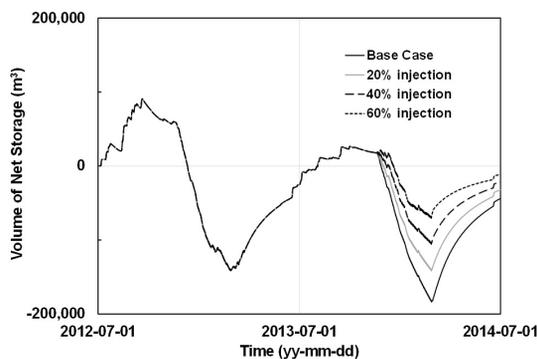


Fig. 10. ASR Scenario-based WCC operation compared to water budget for net storage of the model aquifer.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 계절적인 지하수 이용 형태로 인해 장기적인 지하수 고갈이 예상되는 청원군의 수막재배 실증지역의 정밀 물수지 분석 방식을 확립하여 정량적인 해석 방식을 도입하고 지속가능한 물관리 방향을 제시하고자 하였다.

선행연구에서 수막 재배 시설에 의한 대수층 교란 및 회복을 일별 유입/유출량 및 누적물수지 분석 방식을 도입하여 시기별 정밀 분석을 실시하고 대수층 및 모델 경계조건의 계절별, 시기별 특징을 구분

하였던 방식을 바탕으로 본 연구에서는 장기적 관점에서의 실증부지의 대수층의 지속가능한 개발 여부를 판단하는 정량적 방식을 제시하고 2년간의 수막 재배 기간 동안의 실제 관측 및 모의 연구를 이용해 본 연구의 정밀 물수지 해석 방식을 검증하였다. 또한 정밀 물수지 해석 방식을 이용해 20, 40, 60%의 수막재배 용수를 재주입하는 시나리오를 적용해 인공함양으로 장기적인 대수층 고갈을 방지할 수 있는 적정 주입 범위를 탐색하였으며 그 결과 인공함양에 의한 주입량이 증가할수록 교란 정도는 적어지나 현재 실증부지 상황에서는 20% 정도의 주입으로도 전년도 수준의 대수층 환경으로 유지할 수 있음을 증명하였다. 그러나 기후 변화 등에 의한 극한 가뭄을 고려하여 지하수 자원 이용계획을 수립하는 경우에는 더욱 보수적인 인공함양 운영이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부의 물관리연구사업 “수변 충적층 지하수위 복원기술(11기술혁신 C05-2)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arnold, J.G. and Fohrer, N., 2005, SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563-572.
- Chang, S.W. and Chung, I.M., 2014, Analysis of groundwater variations using the relationship between groundwater use and daily minimum temperature in a water curtain cultivation site. *The Journal of Engineering Geology*, 24(2), 1-9 (in Korean with English abstract).
- Chang, S.W. and Chung, I.M., 2015, Analysis of groundwater budget in a water curtain cultivation site. *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(6), 1259-1267 (in Korean with English abstract).
- Google Earth, 2016, <http://google.com/earth/index.html> (April 14 2016).
- KIGAM, 2013, Groundwater restoration technology for riverside area. Report on the advanced technology for groundwater development and application in riversides (Geowater+) in water resources management program, MOLIT, 225 p (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Jeon, J., Paek, Y., Pyo, H., Jeong, J. and Kim, Y., 2015, Analysis of temperature changes in greenhouses with recirculated water curtain system. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(2), 93-99 (in Korean with English abstract).
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey, techniques of water-resources investigations, book 6, chapter A1, 586 p.
- Moon, S., Ha, G., Kim, Y. and Yoon, P., 2012, Analysis of groundwater use and discharge in water curtain cultivation areas: case study of the Cheongweon and Chungju areas. *The Journal of Engineering Geology*, 22(4), 387-389 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAF), 2013, The status of vegetable greenhouse facilities and vegetables production in 2012. MAF, Sejong, Korea, 72 p (in Korean).

Received : May 28, 2016

Revised : June 17, 2016

Accepted : June 20, 2016