



## Analysis and evaluation of hydrological components in a water curtain cultivation site

Chung, Il-Moon<sup>a\*</sup> · Chang, Sun Woo<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Hydrological Sciences and Engineering Dept., Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Paper number: 16-062

Received: 15 July 2016; Revised: 30 July 2016; Accepted: 30 July 2016

### Abstract

This study conducts the hydrological component analysis from 2010 to 2015 at the water curtain cultivation area in Cheongwon-gu, Cheongju-si and investigates the monthly based groundwater recharge variation. It is found that the rates of evapotranspiration, surface runoff and groundwater recharge were varied according to the total annual precipitation and their correlations were also changed annually. Annual recharge rates for annual precipitation ranged from 8.3% to 19%, and their coefficient of determination ranged from 0.39 to 0.94. Especially in 2015, when the severe drought came upon this area, the lack of groundwater recharge made groundwater level decrease consistently. Thus, it is thought that the special method of estimating exploitable groundwater in water curtain cultivation site is to be introduced.

**Keywords:** Water Curtain Cultivation, SWAT, Hydrological Component Analysis, Groundwater Recharge

## 수막재배지역의 수문성분 해석 및 평가

정일문<sup>a\*</sup> · 장선우<sup>a</sup>

<sup>a</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구소

### 요 지

본 연구에서는 청주시 청원군에 위치한 수막재배 소유역을 대상으로 2010년부터 2015년까지의 수문성분 분석을 수행하고 강수에 따른 자연 지하수 함양량의 월별 변화를 살펴보았다. 그 결과 강수량의 크기에 따라 증발산량, 지표유출량, 지하수 함양량의 비율이 다르게 나타나며 강수에 대한 각 요소의 상관성이 해마다 다르게 나타남을 알 수 있었다. 강수량 대비 연 함양률은 최소 8.3~19%까지 나타났으며 강수에 대한 함양량의 결정계수도 0.39~0.94로 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 특히 2015년과 같은 갈수년의 경우 저조한 강수량으로 인해 자연 지하수 함양이 제대로 이뤄지지 않아 지하수위는 지속적으로 하강하는 것으로 나타났다. 따라서 수막재배지역을 대상으로 하는 특별한 지하수 개발가능량 산정방법이 도입되어야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 수막재배, SWAT, 수문성분해석, 지하수 함양

### 1. 서론

국내 수자원의 효율적 관리와 지하수의 지속성 유지를 위해서는 지하수-지표수 상호작용의 기본 원리를 이해하고 지형, 기후 및 지질특성을 고려한 지역적인 지하수-지표수 연계 특성 연구가 필요하다(Moon et al., 2016). 최근 우리나라에서는 농가의 소득증대와 다양한 과수재배를 도모하기 위하여

비닐하우스를 이용한 시설재배가 확대되고 있다. 특히 겨울철 비닐하우스의 보온을 위해 지하수를 이용하는 수막재배단지(water curtain cultivation site)가 늘어나고 있다. 수막재배는 겨울철에도 15°C의 일정한 온도를 유지하는 지하수를 추출, 비닐하우스 지붕에 분사해 수막(水幕)을 형성하고, 물이 방출하는 열을 비닐하우스 보온에 이용하는 재배방식을 뜻한다(Financial News, 2016. 7. 1.). 그런데 이와 같은 수막재배는 겨울철에 많은 양의 지하수 양수가 이루어지고 온도 유지에 사용한 후에는 농수로를 통해 하천으로 배출되는 것이 일반적이다(Chang and Chung, 2015). 따라서 우리나라의 경우

\*Corresponding Author.

E-mail: imchung@kict.re.kr (I. -M. Chung)

강수에 의한 지하수 함양량이 적은 겨울철에 지하수 양수가 장기적으로 계속되면 대수층의 지하수 저류량이 현저히 줄어들고 겨울철에 낮아진 지하수위로 인해 봄철에 하천으로 공급되는 기저유출량이 감소하여 하천을 이용한 용수공급이 어려워지며 극단적으로는 하천 건천화를 유발시킬 수 있다. 실제로 대규모 양수로 인한 하천수 고갈사례는 다양하게 제시되고 있으며(Nyholm et al., 2002; Barlow and Leake, 2012; Kim et al., 2012), 이를 개선하기 위한 지하수 개발가능량 개선방안에 관해서도 기 연구된 바 있다(Chung and Lee, 2013). 또한 지하수 저류량은 강우에 의한 자연 지하수 함양량과도 밀접한 관계가 있으며 강우량이 적어짐에 따라 물수지의 불균형이 심화됨이 증명되었다(Perrin, 2012). 한편 국내에서는 시설재배지역에 대해 지표수에 인접한 비피압 대수층을 중심으로 기온에 변화에 따른 지하수 양수에 따른 지하수위 변화(Chang and Chung, 2014) 및 시설재배지역 대수층의 변화를 실증 모델링을 이용해 지하수위 및 물수지의 시기별 정밀 분석을 수행한 바 있다(Chang and Chung, 2015).

Chang and Chung (2015)은 3차원 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW를 이용하여 대수층 중심의 계절별 물수지 분석을 수행한 바 있는데 본 연구에서는 동일한 시설재배 지역의 소유역을 대상으로 다년간의 장기적인 수문성분 평가를 통해 수막재배로 인해 발생가능한 수문성분 요소의 불균형을 진단하고 지속가능한 지하수 이용이 가능한 지하수 관리방안을 제시하고자 한다.

## 2. SWAT-K모형의 구축

본 연구에서 사용된 SWAT-K (Kim et al., 2009)모형은 미국 농무성에서 개발된 유역수문모형 SWAT을 우리나라 유역 및 수문특성에 맞게 개선한 모형으로 주요 개선내용은 하도추적 모듈의 개선, 시간가중평균 CN방법, SWAT과 MODFLOW의 완전연동형 결합, 우리나라 논농사 패턴을 고려한 SWAT-AGRIMAN 등 다양하다.

미국 농무성에서 개발된 SWAT2000 (Soil and Water Assessment Tool)모형(Arnold and Fohrer, 2005)은 다양한 토양, 토지이용 등을 반영하여 물순환이나, 토사 및 화학물질 이동을 해석할 수 있는 준분포형 장기유출모형이다. SWAT은 유역을 여러 개의 소유역으로 분할하고, 소유역을 동일한 토지 이용도와 토양도를 중첩시켜 만든 다수의 HRU (Hydrologic Response Unit)로 분할하여, 개개의 HRU에 대해 지표면, 지표하, 지하수 등 각각의 수문성분을 산정한다. SWAT에서는

식물의 뿌리깊이까지의 영역인 토양수대, 비포화대, 포화대로 구분하여 다음 Eq. (1)과 같이 토양수를 기준으로 표현된 물수지 식을 기본 개념으로 사용하고 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서  $SW_t$ 는 시간  $t$ 일의 토양수분량,  $SW_0$ 는 초기토양수분량,  $R_{day}$ 는 일강수량을 나타내고 있으며,  $Q_{surf}$ 는 지표면 유출량,  $E_a$ 는 증발산량,  $w_{seep}$ 는 토양층의 특성을 반영한 침투량,  $Q_{gw}$ 는 하천으로의 회귀수이다. 본 연구에서 지표면 유출량 산정을 위해 NRCS-CN 방법을 사용했고, 증발산량은 Penman-Monteith 방정식을 사용했다(Neitsch et al., 2005).

침투량은 저류추적식(storage routing equation), 중간유출량은 운동학적 저류모델(kinematic storage model), 하도추적은 변동저류법, Muskingum 추적법 등이 사용되고 있다. 침투량과 함양량의 관계는 지수형 가중함수(exponential weighting function)로 표현하고 있으며, 지하수 유출량은 HRU별 얇은 대수층을 제어체적으로 하여 저류방정식의 해석해로부터 얻어진 지하수유출량과 함양량간의 관계식을 이용한다(Chung et al., 2011). 그러나, SWAT의 지하수해석모듈은 HRU간에 상호간 연결성이 없어 지하수의 수평흐름에 의한 동적인 거동을 반영하지 못하므로 양수에 의한 지하수리시스템의 변화 등을 모의하는데 어려움이 있는 단점이 있다. MODFLOW는 다공질포화매체내 지하수 흐름을 모사하는 지하수유동모델로 범용적으로 이용되어 오고 있으나, 주요입력변수로 대수층의 상부경계조건으로 부여되는 함양량 결정에 어려움이 있다. 이에 일반적으로 강수량에 유역의 함양계수를 곱하여 균등한 함양률을 적용하여 지하수 모의를 수행하고 있는 게 현실이다. 본 연구에서 사용한 SWAT-MODFLOW 모형(Kim et al., 2008)은 각각의 모형이 가지는 장점은 그대로 유지하면서 단점을 상호 보완한 유역단위의 지표수-지하수 통합모형이다.

대상 유역은 무심천 유역으로 유역면적은 198 km<sup>2</sup>이고, ArcView를 이용한 전처리 작업을 수행하였다. 수치표고모형을 가공하여 100 m격자로 구성하였으며, 지형 고도를 반영하여 총 34개의 소유역으로 구분하였다(Fig. 1). 그림에서 상류부에 별도로 표시한 구역이 수막재배단지 지역이다.

또한 2009년도의 환경부 토지피복도를 이용하여 토지이용도를 작성하고, 농업과학원의 토양통자료를 이용하여 토양분포도를 작성하였다. 이 두 도면의 특성을 혼합하면 하나의 수문응답단위(Hydrologic Response Unit)가 결정되며, 그에 따라 토지 이용과 토양성분이 함께 고려된 수문성분이 결정된다(Fig. 2).

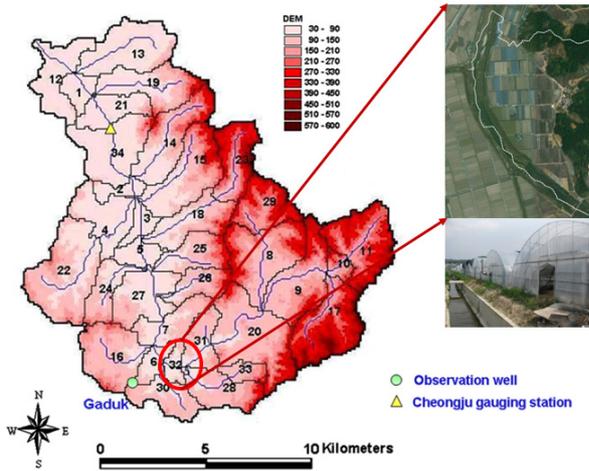


Fig. 1. Watershed subdivision and WCC site

모형의 입력자료인 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등의 기상자료는 무심천 유역 내에 위치한 청주시상대의 자료를 이용하였고, 수문자료로서 하천유출량 자료는 청주수위표 지점의 관측유출자료를 이용하였다. 2001년부터 2015년까지 16년간의 수문자료를 활용하여 모델을 구축하였다. 공인된 유량관측지점이 청주수위표 지점이므로 이 지점에 대해 2011년부터 2013년까지의 월평균유출량에 대한 검보정을 수행하였으며 결정계수( $R^2$ )는 0.93으로 양호한 적합을 나타냈다.

### 3. 수막재배 소유역에 대한 수문성분 분석

수막재배단지가 포함된 청원군 상대리는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 무심천의 상류부에 위치하며(소유역 32) 면적은

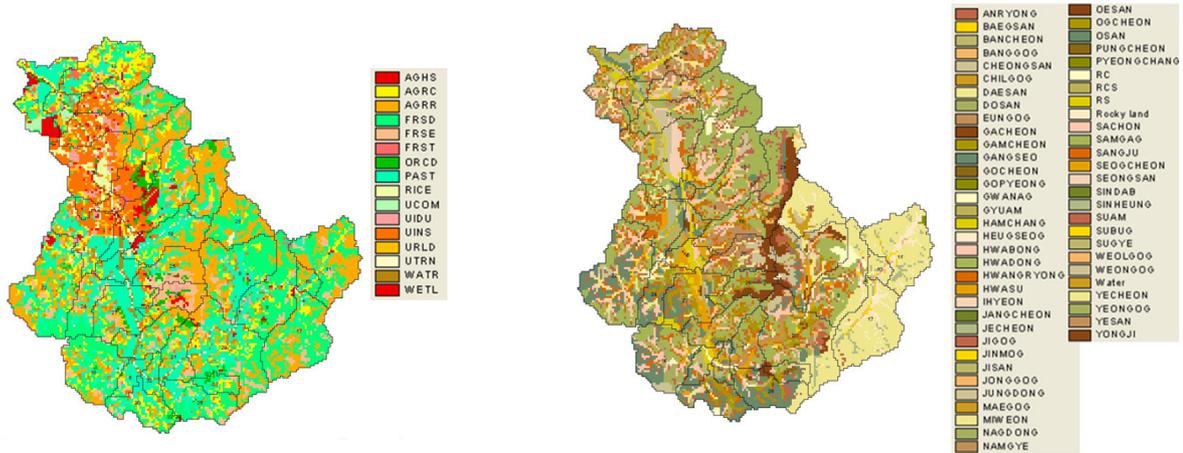
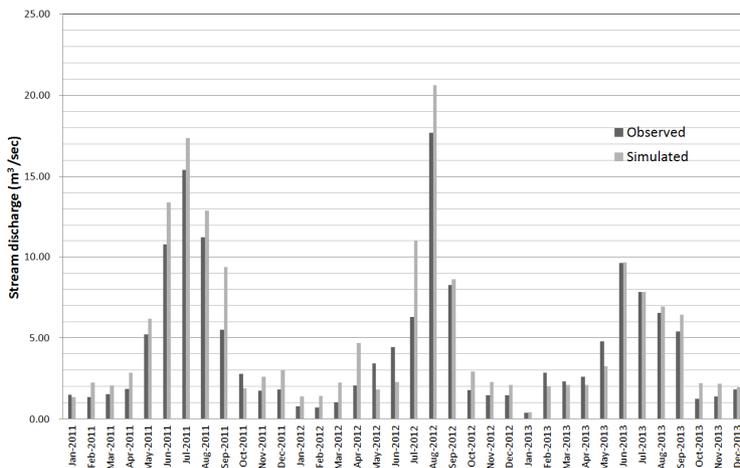
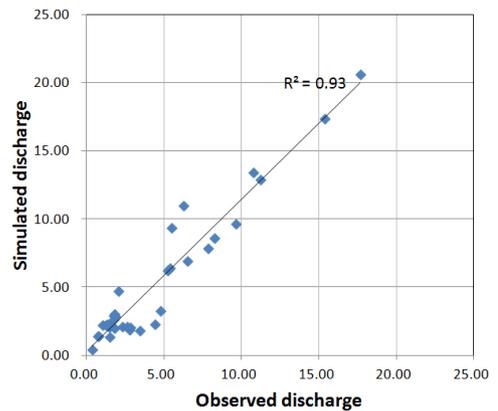


Fig. 2. Land use map and soil association map



(a) Comparison of observed and simulated discharge



(b) Correlation between observed and simulated discharge

Fig. 3. Model calibration and validation result

1.47 km<sup>2</sup>이며 우측에 낮은 구릉성 산지가 분포하고 좌측에는 무심천이 남에서 북으로 흘러가는 형상으로 겨울철 수막재배와 여름철 논농사가 동시에 이루어지고 있다(Moon et al., 2016). 소구역 대부분은 농업활동을 주로 하는 경작지이며 논과 다른 여러 작물을 재배하는 밭이 혼재되어 있다. 이 지역에

는 시설재배를 위한 양수정이 다수 위치하며 재배 작물은 주로 딸기이다(KIGAM, 2013). 겨울철에는 이를 위해 대량의 지하수를 사용하고 있는데 동절기 강수에 의한 지하수 함양율이 매우 낮은 시기이다. 따라서 장기적으로 이와 같은 농업용수를 사용하게 되면 지하수 고갈이 진행될 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 이 지역의 연도별 수문성분 분석을 통해 지하수 함양이 어떻게 변화하는지를 분석하고 수문성분 상호간의 관계를 파악, 향후 지하수 관리에 활용할 수 있는 방안을 살펴보고자 한다.

이와 같은 수문성분 분석은 2010년부터 2015년까지 6년간 수행하였으며, 그 결과는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Computed annual hydrologic components in WCC subbasin

Year	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Recharge (mm)	Surface runoff (mm)
2010	1422.4	581.6 (40.9%)	237.9 (16.7%)	575.8 (40.5%)
2011	1805.6	558.3 (30.9%)	345.8 (19.2%)	863.8 (47.8%)
2012	1387.6	512.8 (37.0%)	197.7 (14.2%)	622.1 (44.8%)
2013	1240.1	622.1 (50.2%)	166.6 (13.4%)	450.7 (36.3%)
2014	913.7	535.0 (58.6%)	87.3 (9.6%)	283.2 (31.0%)
2015	757.9	508.6 (67.1%)	63.1 (8.3%)	179.1 (23.6%)

Table 1에 나타난 바와 같이 연 강수량의 크기에 따라 증발산량, 지표유출량, 지하수 함양량의 비율은 매우 달라지는 것으로 나타났다. 다우년인 2011년의 경우 증발산률은 30.9%, 지하수 함양률은 19.2%, 지표유출률은 47.8%였으나 과우년인 2015년의 경우 증발산률은 67.1%, 지하수 함양률은 8.3%, 지표유출률은 23.6%로 나타났다. 증발산량의 경우는 508.6~622.1 mm의 범위를 나타냈고, 함양량은 63.1~345.8 mm로 큰 폭의 변화를 나타냈다. 지표유출량 역시 179.1~863.8 mm로 강수량의 크기에 따라 연도별로 큰 폭의 변화를 나타냈다.

다음으로 증발산(ET)과 지하수 함양(recharge), 그리고 지

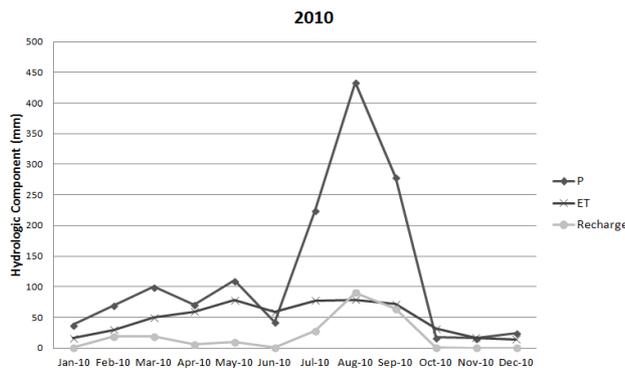


Fig. 4. Monthly based hydrologic components in 2010

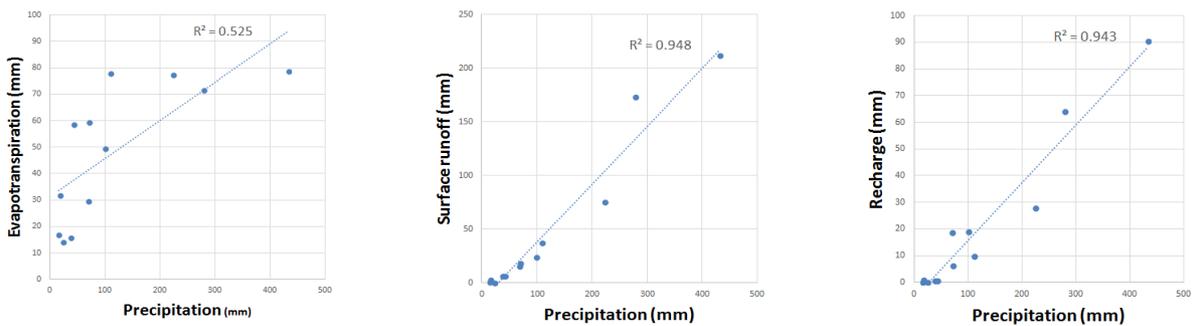


Fig. 5. Correlation between precipitation and each hydrologic component in 2010

표유출량(Surface runoff)은 연간 강수량(P)의 크기와 더불어 월별 강수량에 따라 달라질 것으로 예상되어 연도별 변화와 함께 월별 변화를 살펴보았다.

2010년의 경우 강수량은 1,422.4 mm로 2001~2015년 평균인 1,242 mm에 비해 많은 해이다. 7월부터 9월 사이에 총 강수량의 66%가 내림으로써 우리나라의 전형적인 몬순기후 특성을 잘 나타내고 있다(Fig. 4). 또한 강수에 따른 지하수 함양량, 지표유출량은 결정계수 0.9이상의 높은 상관성을 나타내고 있다(Fig. 5).

2011년의 경우 강수량은 1,805.6 mm로 평균 강수량에 비해 매우 큰 값이다. 6월부터 9월 사이에 총 강수량의 76%가 내림으로써 2010년과 마찬가지로 우리나라의 전형적인 강수특성을 잘 나타내고 있다(Fig. 6). 또한 강수에 따른 지하수 함양량, 지표유출량은 결정계수 0.9이상의 높은 상관성을 나타내고 있다(Fig. 7). 특히 연간 지하수 함양량의 경우 연강수량의 19%인 345 mm로 나타나 이 지역에서 여름철 강수량이 커짐에 따라 지하수 함양량이 증가하는 형태를 보였다.

2012년의 경우 강수량은 1,387.6 mm로 평균을 약간 상회하는 수준이며 2010~2011년과 같이 6월부터 9월 사이에 총 강수량의 72%가 내리는 우리나라의 전형적인 강수특성을 잘

나타내고 있다(Fig. 8). 또한 강수에 따른 지하수 함양량, 지표 유출량은 결정계수 0.9를 상회하는 높은 상관성을 나타내고 있다(Fig. 9). 연간 함양량은 197.7 mm로 강수대비 14.2%의 함양률을 나타냈다.

2013년의 경우 강수량은 1,240.1 mm로 평균값 1,242 mm와 거의 유사하다. 6월부터 9월 사이에 총 강수량의 67%가 내림으로써 역시 전형적인 강수와 함양특성을 나타내고 있다(Fig. 10). 다만 2010~2012년에 비해 강수와 함양량의 상관성은 약간 저조한 것으로 나타났다(Fig. 11). 연간 함양량은 166.6 mm로 강수대비 13.4%를 나타냈다.

2014년의 경우 강수량은 913.7 mm로 평균대비 73.5%로 저조했고, 6월부터 9월 사이에 총 강수량의 62%인 562.7 mm가 내림으로써 2013년 우기시의 830 mm와 비교하면 매우 부족한 것을 알 수 있다(Fig. 12). 연간 함양량은 강수대비 9.6%인 87.3 mm로 2013년 166.6 mm의 절반가량으로 줄었다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 강수량과 함양량의 상관성은 0.699로 다소 낮게 나타났고, 월 강수량이 100 mm 부근에서도 지하수 함양량이 0에 가까운 현상이 나타났다. 이는 SWAT 모형에서 영하의 온도에서 침투가 되지 않게 처리되고 있는 영향(1, 2월)과 강수량에 비해 증발산량이 큰 경우 침투량이 줄어든

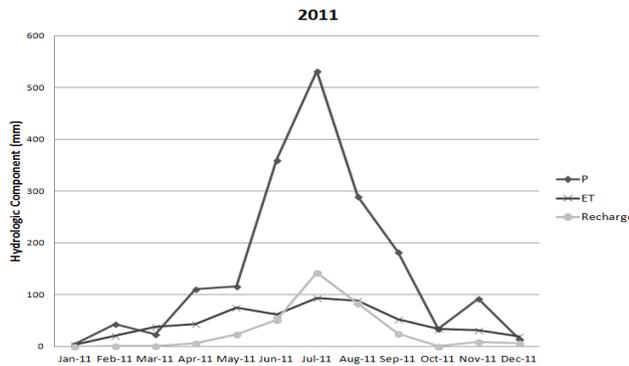


Fig. 6. Monthly based hydrologic components in 2011

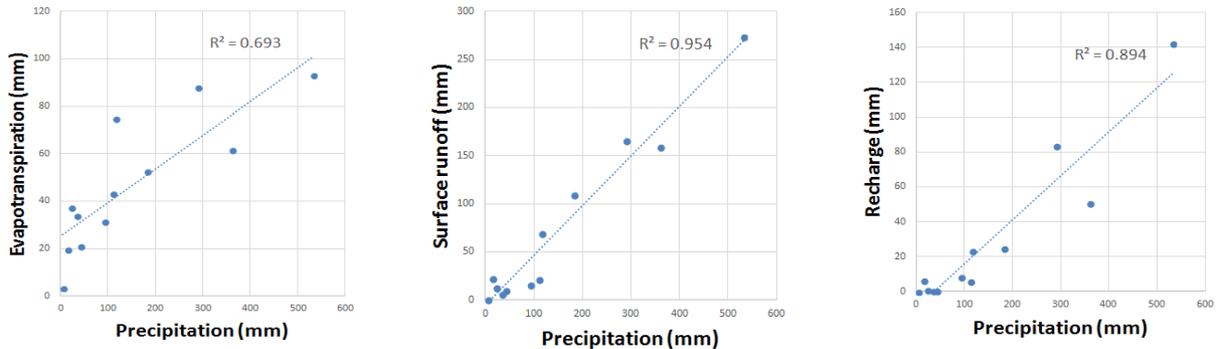


Fig. 7. Correlation between precipitation and each hydrologic component in 2011

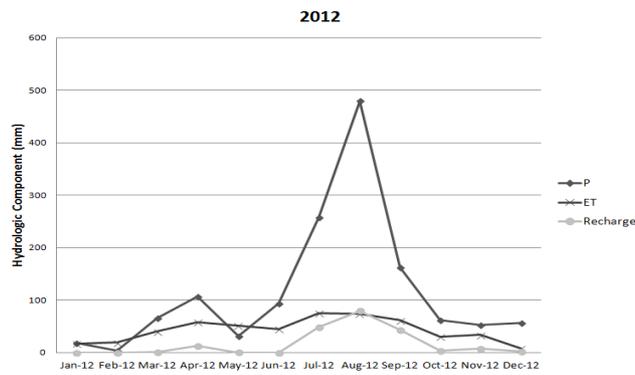


Fig. 8. Monthly based hydrologic components in 2012

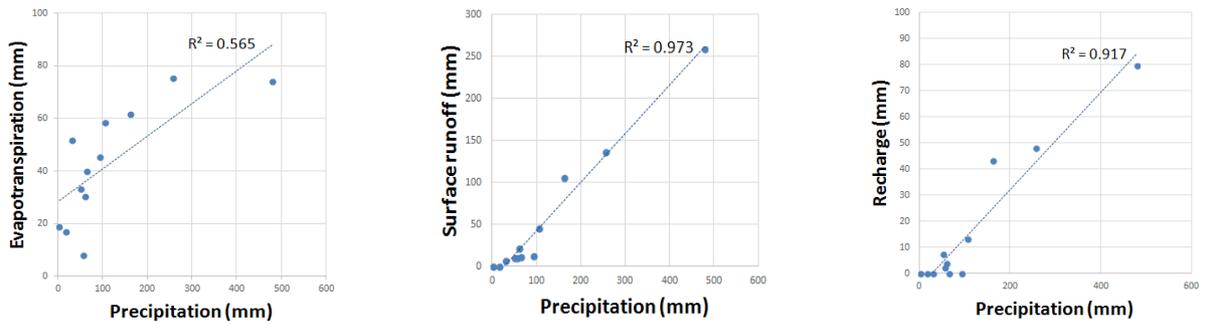


Fig. 9. Correlation between precipitation and each hydrologic component in 2012

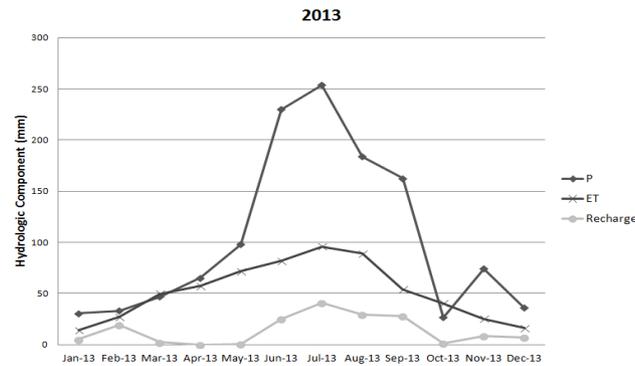


Fig. 10. Monthly based hydrologic components in 2013

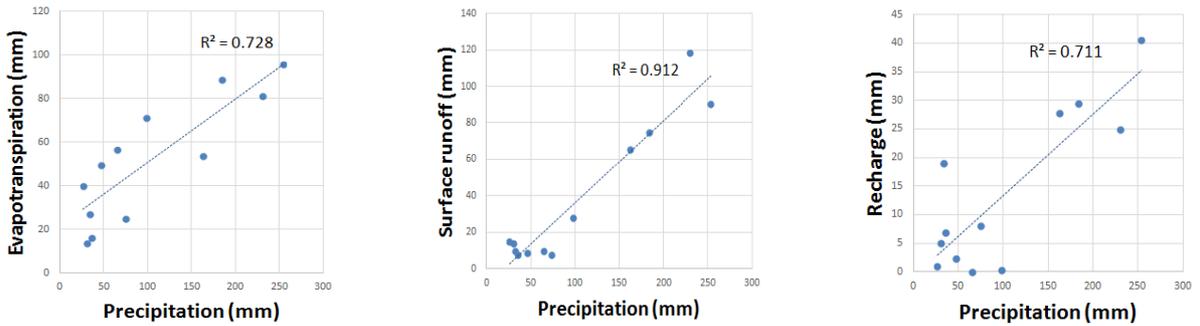


Fig. 11. Correlation between precipitation and each hydrologic component in 2013

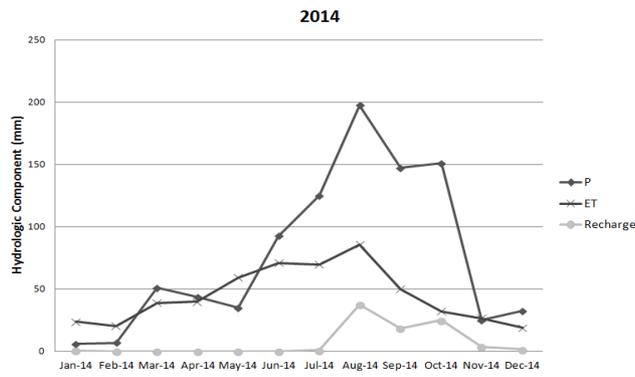


Fig. 12. Monthly based hydrologic components in 2014

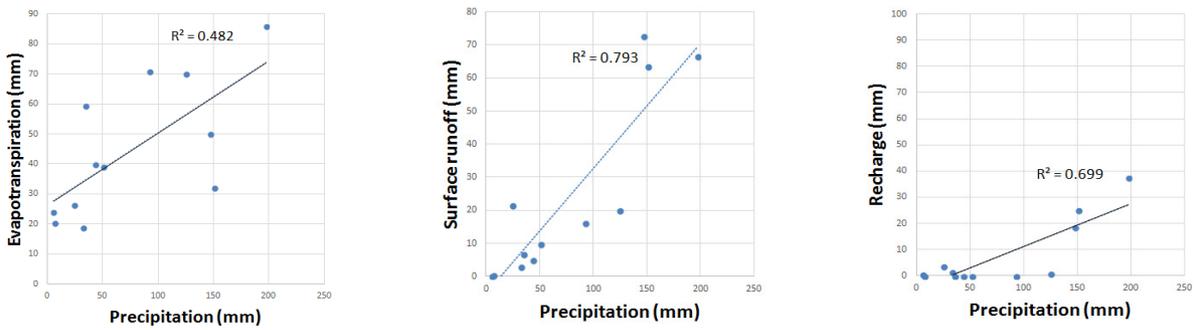


Fig. 13. Correlation between precipitation and each hydrologic component in 2014

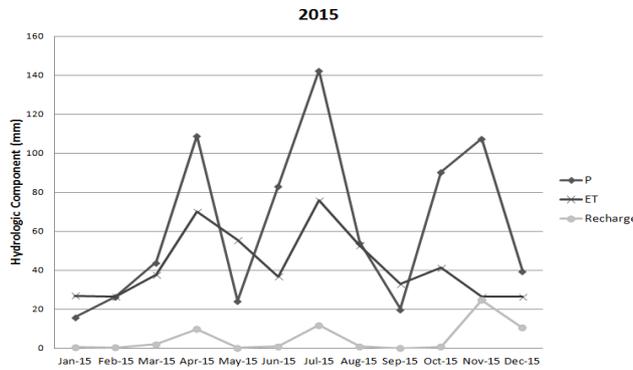


Fig. 14. Monthly based hydrologic components in 2015

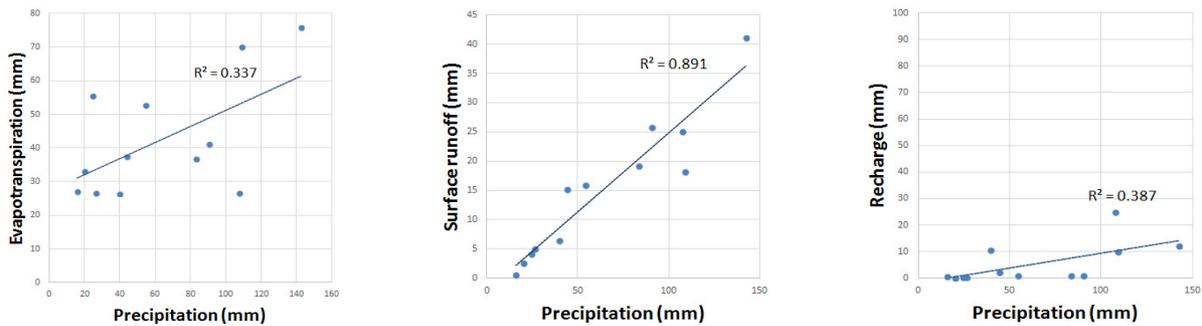


Fig. 15. Correlation between precipitation and each hydrologic component in 2015

영향(6, 7월)도 포함된 것으로 보인다.

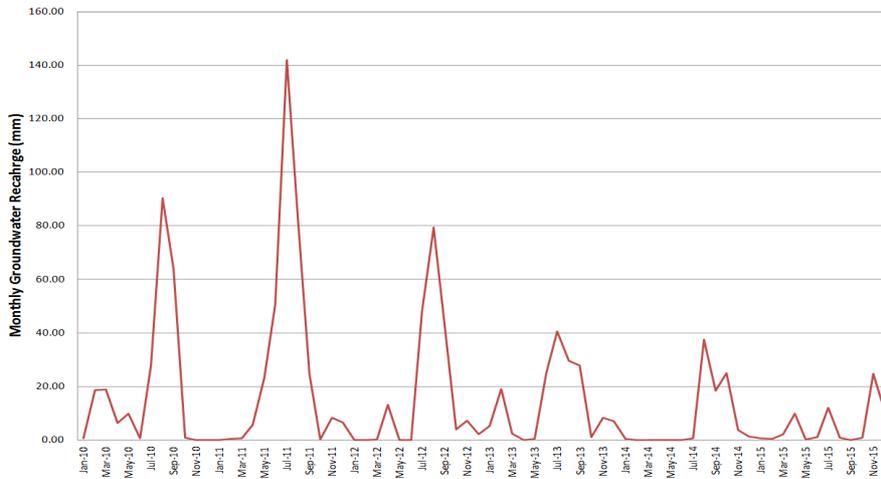
2015년의 연강수량은 특히 757.9 mm로 저조했고, 6월부터 9월 사이의 강수량은 총 강수량의 39.6%인 300.1 mm에 불과한 여름가뭄이 지속되었다. 특히 8, 9월의 강수량이 저조함으로써 수문성분의 균형이 예년과는 판이하게 나타났다 (Fig. 14). 연함양량은 63 mm로 강수대비 8.3%로 저조했고, 우기의 지하수 함양량은 13.8 mm로 전체 함양량의 22%에 불과했다. 강수와 함양의 상관성( $R^2=0.387$ )은 매우 낮은 것으로 나타났다(Fig. 15).

#### 4. 수막재배지역의 지하수 함양의 영향

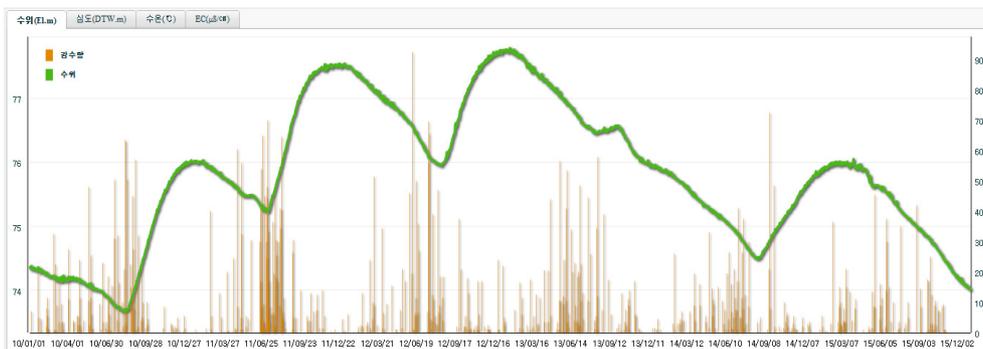
수막재배지역은 농가의 생계를 위한 지하수 활용지역으로 우리나라 타 지역의 지하수 이용과는 다소 특이한 형태를 보인다. 특히 전통적인 농번기가 아닌 겨울철에 집중적인 취수가 이뤄지기 때문에 우기시의 충분한 지하수 함양이 지하수위

유지에 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다. 실제로 본 연구의 실증시설에서는 갈수기라는 계절적 요인 외에 수막재배기간의 집중적인 지하수 이용에 의해 11월부터 3월까지 지속적으로 지하수가 하강하는 추세를 보였다(KIGAM, 2013; Chang and Chung, 2014).

실제로 본 연구에서 분석한 소유역의 월별 지하수 함양량의 시계열을 살펴보면 2010~2012년에 비해 2013년부터 함양량이 줄어들었고, 2014년과 2015년 함양량은 매우 저조한 것으로 나타났다(Fig. 16(a)). 이와 같은 함양량의 감소는 곧바로 지하수위 저하로 나타날 것으로 예상되어 대상유역 인근에 위치한 가덕 국가지하수 관측소의 평균 지하수위를 검토하였다. 이 관측소를 선정한 이유는 2010~2015년까지의 지하수 자료를 보유하고 있으며 비록 대상 소유역에서 2 km 정도 이격거리가 있지만 지하수 함양량에 따른 지하수위 변화를 나타낼 수 있을 것으로 판단했기 때문이다. Fig. 16(b)는 국가 지하수정보시스템(www.gims.go.kr)을 통해 나타난 화면을 캡처한 것으로 강수량과 지하수의 변화를 잘 나타내고 있다.



(a) Monthly groundwater recharge



(b) Groundwater levels at Gaduk station (www.gims.go.kr)

Fig. 16. Groundwater recharge and groundwater levels near WCC site

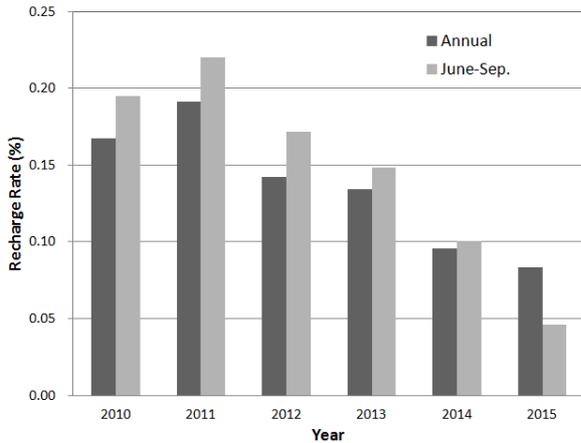


Fig. 17. Groundwater recharge rates at WCC site

지하수위는 2011년과 2012년에 높은 함양량에 비례하여 상승하다가 2013년 후반부터 자연적, 인위적 요인에 의해 지하수위가 전년만큼 회복되지 못하는 것으로 나타났다. 특히 2014년과 2015년의 자연지하수 함양량은 2013년의 166.6 mm를 기준으로 38~52%범위로 낮게 나타나 지하수위는 지속적으로 하강하는 것으로 파악되었다.

한편, Fig. 17에서 보는 바와 같이 연평균 지하수 함양률은 강수량의 연간 변화에 따라 달라지며 우기시의 지하수 함양률이 연평균 함양률보다 큰 것으로 나타났다. 하지만 2015년과 같은 갈수년에 우기시의 강수가 부족할 경우 함양률은 더욱 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서 우기의 집중적인 지하수 함양이 부족하게 되면 대수층으로의 물공급은 크게 줄어드는 것을 지하수위 변화를 통해 알 수 있다. 우리나라의 경우 지하수 개발가능량은 10년빈도 갈수시 강수량에 지하수 함양률을 곱한 값으로 정하고 있으나 일률적인 지하수 함양률을 적용하여 지하수를 관리하게 되면 수막재배시설과 같이 겨울철에 일정한 양의 지하수를 지속적으로 공급해야 하는 경우 궁극적으로 지하수 고갈을 야기시킬 가능성이 있어 주의가 요구된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 충북 청원군 상대리에 위치한 수막재배 소유역을 대상으로 2010년부터 2015년까지의 수문성분 분석을 수행하고 강수에 따른 자연 지하수 함양량의 월별 변화를 살펴보았다. 그 결과 강수량의 크기에 따라 증발산량, 지표유출량, 지하수 함양량의 비율이 다르게 나타나며 특히 강수에 대한 각 요소의 상관성이 해마다 다르게 나타남을 알 수 있었

다. 강수량 대비 연 함양률은 최소 8.3% (2015년)에서 19% (2010년)까지 나타났으며 강수에 대한 함양량의 결정계수도 0.39 (2015년)~0.94 (2010년)로 나타나 갈수년에는 지하수 함양률과 강수에 대한 상관성 모두 저조한 것으로 나타났다.

특히 2015년의 경우 저조한 강수량으로 인해 자연 지하수 함양이 제대로 이뤄지지 않아 지하수위는 지속적으로 하강하는 것으로 나타났다. 그런데 이와 같은 함양률의 변화는 지속 가능한 지하수 관리에 적신호가 될 수 있다. 왜냐하면 우리나라의 경우 지하수 개발가능량은 10년빈도 갈수시 강수량에 지하수 함양률을 곱한 일률적인 지하수 함양률을 적용하기 때문에 수막재배시설과 같은 특수한 지역에 대해서는 궁극적으로 지하수 고갈을 야기시킬 가능성이 있기 때문이다. 이를 극복하기 위해서는 집중 지하수 이용이 이루어지는 지역에 대해서는 별도의 지하수 개발가능량 기준을 설정하는 등 제도적 개선책이 필요하며, 기술적으로는 이용한 지하수를 땅속에 재주입하는 인공함양 시설이 우리나라에서도 본격적으로 도입되어야 할 시기라고 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 물관리연구사업 “수변충적층 지하수위복원기술(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*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Barlow, P.M., and Leake, S.A. (2012). Streamflow depletion by wells-understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow: U. S. Geological Survey Circular 1376, p. 84.
- Chang, S., and Chung, I. (2014). “Analysis of groundwater variations using the relationship between groundwater use and daily minimum temperature in a water curtain cultivation site.” *Journal of Engineering Geology*, Vol. 24, No. 2, pp. 217-225 (in Korean with English abstract).
- Chang, S., and Chung, I. (2015). “An Analysis of Groundwater Budget in a Water Curtain Cultivation Site.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 6, pp. 1259-1267 (in Korean with English abstract).
- Chung, I. M., Kim, N. W., Na, H., Lee, J., Yoo, S., Kim, J., Yang, S. (2011). “Integrated surface-groundwater analysis for the

- pyoseon region, jeju island in Korea." *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 27, No. 6, pp. 875-886.
- Chung, I., and Lee, J. (2013). "A method of estimating the volume of exploitable groundwater considering minimum desirable streamflow." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 4, pp. 375-380 (in Korean with English abstract).
- Financial News (2016). "KICT solves the water scarcity problem in agricultural area." 2016.7.1.
- 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, p. 225.
- Kim, N.W., Chung, I.M., Kim, C., Lee, J., and 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., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M., and Sung, G.Y. (2012). "Analysis of effects of groundwater abstraction on streamflow for Sinduncheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 1259-1273 (in Korean with English abstract).
- Moon, S., Kim, Y., Jeong, Y., and Hwang, J., (2016). "Groundwater-stream water interaction induced by Water Curtain Cultivation activity in Sangdae-ri area of Cheongju, Korea." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 49, No. 2, pp. 105-120 (in Korean with English abstract).
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). Soil and water assessment tool, theoretical documentation, version 2005. Temple, Tex.: Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, USDA. Temple, Tex.: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- Nylholm, T., Christensen, S., and Rasmussen, K.R. (2002). "Flow depletion in a small stream caused by ground water abstraction from wells." *Groundwater*, Vol. 40, No. 4, pp. 425-437.
- Perrin, J., Ferrant, S., Massuel, S., Dewandel, B., Marechal, J.C., Aulong, S., and Ahmed, S. (2012). "Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distribution model." *Journal of Hydrology*, 460-461, pp. 143-155.