

모형을 이용한 농촌 소유역 지하수 적정개발량 평가

Evaluation of Optimal Yield Using the Groundwater Model for a Small Rural Watershed

박기중*, 정상옥**

Ki Jung Park, Sang Ok Chung

Abstract

The purpose of this study is to determine the optimal groundwater yield for a small rural watershed, which is necessary for effective groundwater management. The study area(3.89 km²) is located in Kyungpook Sangju Yangchon-dong and hourly groundwater level in an observation well is observed and the data are used to verify the visual MODFLOW model.

The groundwater model is applied in the same area to obtain optimal yield for 1992 and 1994, 1982. The optimal yield in this experimental watershed ranged 12.5 % to 14.0 % of the annual infiltration rate.

Key words : optimal groundwater yield, effective groundwater management, visual MODFLOW model, model efficiency, annual infiltration rate

1. 서 론

수자원장기종합계획(건교부, 2001)에 따르면 전국 용수수요는 꾸준히 증가하여 2020년에는 약 11.9억 m³/year 용수가 부족할 것이나, 지표수자원 개발이 한계에 도달함으로써 수자원 이용에 대한 경쟁의 심화 및 용수 확보에 어려움이 따를 것으로 전망하였으며, 이에 대한 대안으로 안정적인 수자원 공급을 위한 신규 수원으로써 지하수자원의 개발을 제시하였다. 그러나 지하수자원은 수문 순환의 한 축을 이루는 중요성뿐만 아니라 지표수와 비교하여 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 과소평가됨으로써 합리적이고 체계적인 개발과 관리가 이루어지지 않고 있으며, 지역 특성을 고려하지 않은 무분별한 지하수 개발은 지하수의 고갈 및 해수 침입 등과 같은 지하수 장애를 발생시켰다.

건교부는 이러한 현안에 대하여 지하수법뿐만 아니라 타법에 의한 지하수 관리를 통합하는 법정계획으로서 지하수 개발·관리에 관한 국가의 정책방향을 담고 있는 지하수에 관한 우리나라 최상위 계획인 『지하수관리 기본계획』(2002)을 수립함으로써 종합적인 지하수 관리체계를 구축하였으며, 특히 기존의 우리나라 전체 또는 대규모 유역을 대상으로 하는 광역적인 지하수 적정개발량 평가와 연계하여, 2001년 개정된 지하수법 제6조의 2항에 근거한 강우분포, 토지이용현황 및 대수층 특성 등의 다양한 자연적, 인위적인 여건에 따라 부존 및 산출 양상에 영향을 받는 지하수자원의 특성에 맞는 『지역지하수관리계획』을 수립토록 규정하고 있다.

본 연구에서는 실제 소유역을 선정, 지하수위를 관측하고, 관측한 수위자료와 유역특성 자료를 모형에 적용하여 시험기간에 대하여 지하수 거동을 시뮬레이션 하였으며, 평년 빈도 한발년 및 이수 안정측면에서 수자원시스템 설계에 사용하는 10년 빈도 한발년과 수자원 계획의 목표수준인 30년 빈도 한발년에 대하여 각각 용수수요량을 충족하면서 지하수의 고갈 등이 발생하지 않는 범위 내에서의 시험유역의 지하수 적정개발량을 추정함으로써 지역 특성을 고려한 지하수 관리계획 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

* 정회원 · 경북대학교 농업토목공학과 박사수료 · E-mail : kjpark0@knu.ac.kr

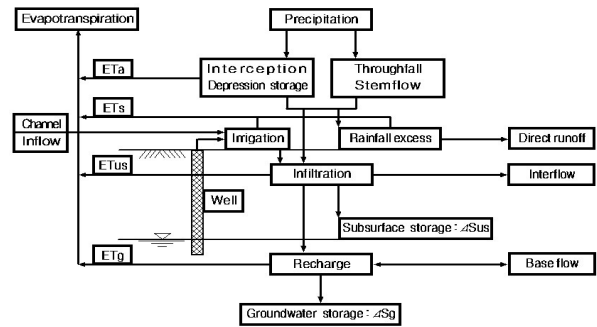
** 정회원 · 경북대학교 농업토목공학과 교수 · E-mail : sochung@knu.ac.kr

2. 지하수 물수지

지하수량 평가에 사용되는 용어로는 안전채수량(safe yield), 지속가능개발량(sustained yield or perennial yield) 및 적정개발량(optimal yield) 등이 있다. 안전채수량이란 연간 함양량에서 자연적으로 배수되는 양은 무시한 채 지하수량 고갈, 지반 침하, 지하수질 오염 및 해수 침입 등의 「undesirable results」 (Domenico, 1972)를 발생시키지 않고 양수할 수 있는 양(Todd, 1980, Sophocleous, 1998)을 말하며, 지속가능개발량이라 함은 장기간에 걸쳐 지하수 장애를 발생시키지 않고 양수할 수 있는 양을 말한다. 지하수 적정개발량이란 사회-경제적인 목적에 가장 적합한 개발량(Freeze and Cherry, 1979)으로 정의한다.

지하수 적정개발량 평가를 위하여 농촌 소유역의 수문순환과정을 살펴보면 Fig 1과 같다. Fig 1에서 물수지 방정식을 도출하면 강우량과 타수역에서의 지표수 유입량의 합은 식 (1)과 같이 지표유출량, 중간유출량, 기저유출량, 증발산량 및 저류량의 변화량으로 표현할 수 있다. 이 식에서 타수역에서의 지표수 유입이 없으며, 지하수자원이 개발되지 않은 상태의 경우 장기간에 지하수체는 유입과 유출이 평형을 이루는 정상상태에 도달하므로 $\Delta S_{us} = \Delta S_{g} = 0$ 이 될 것이며, 따라서 물수지 방정식은 식 (5)와 같이 간단히 나타낼 수 있다(Freeze and Cherry, 1979).

그러나 농촌 소유역의 경우 함양과 배수가 수시로 변화하는 비정상상태를 유지하고 일부 경작지는 지표수와 연계되어 운영되며, 지표하의 증발산 또한 무시할 수 없으므로 식 (5)를 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서 본 고에서는 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 농촌 소유역의 비정상상태하의 물수지 방정식인 식 (6)을 도출하였다.



ETa	evapotranspiration in the air
ETs	evapotranspiration in the surface
ETus	evapotranspiration in the unsaturated zone
ETg	evapotranspiration in the saturated zone
ΔS_{us}	change in the storage of the unsaturated zone
ΔS_{g}	change in the storage of the saturated zone

Fig 1. Schematic diagram of the Hydrologic Cycle

$$Precipitation + Channel\ inflow = (Direct\ runoff) + (Interflow) \pm (Base\ flow) \pm \Delta S_{us} \pm \Delta S_{g} + (ET_{total}) \quad (1)$$

$$ET_{total} = (ET_a) + (ET_s) + (ET_{us}) + (ET_g) \quad (2)$$

$$Infiltration = (Recharge) + (Interflow) + (ET_{us}) \pm \Delta S_{us} \quad (3)$$

$$Recharge = (ET_g) \pm (Base\ flow) \pm \Delta S_{g} \quad (4)$$

$$Recharge(steady\ state) = (Precipitation) - (Direct\ runoff) - (ET_{total}) \quad (5)$$

$$Recharge(transient) = (Precipitation) + (Channel\ inflow) - (Direct\ runoff) - (Interflow) \pm \Delta S_{us} - ((ET_{total}) - (ET_g)) \quad (6)$$

3. 시험유역

시험유역은 부족한 지표수자원을 보완하기 위하여 생활용 및 일부 농업용으로 지하수를 연계 운영하고 있는 지역을 선정하였으며, 시험기간은 지하수위 관측자료가 있는 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지와 1973 ~ 2002년까지 문경기상대의 강우자료를 기초로 한발년에 대한 빈도분석을 통하여 평년 빈도 한발년인 1992년과 10년 빈도 한발년인 1994년, 그리고 수자원 계획의 목표수준인 30년 빈도 한발년인 1982년을 선정하였다.

시험유역은 행정구역상 경북 상주시 신흥동 양촌리 일대로 상주시내와 청리면의 경계에 위치하며(Fig 2), 생활용수 및 밭과 과수원, 그리고 일부 논외 용수공급원으로 지하수를 이용하고 있다. 유역내

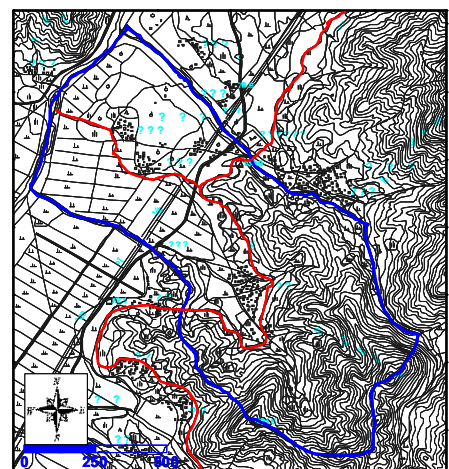


Fig 2. Watershed map of experimental area

평야부의 경사도는 동서방향 1/200 ~ 1/300, 남북방향 1/300 ~ 1/400 정도이며, 갑장산, 남산, 원장산, 묘산 등으로 둘러싸여 있는 남동쪽 산지부의 경우 1/4 정도의 경사를 띤다. 유역의 크기는 길이 3.12 km, 폭 1.25 km로 유역면적은 약 3.89 km²이다.

시험유역의 토지이용은 전체면적의 52%를 임야가 차지하며, 논 23%, 과수원 11%, 밭 10%, 그리고 대지 4%의 순으로 나타났다. 시험유역의 토성은 논은 clay loam과 clay, 밭은 sandy loam, 과수원은 sandy clay loam, 그리고 임야는 loam 질로 나타났다.

시험유역은 대륙성 기후를 띄며, 연평균 기온은 11.7 °C, 연평균 풍속은 1.5m/s 이며, Table 1은 평년 빈도 한발년인 1992년과 10년 빈도 한발년인 1994년, 30년 빈도 한발년인 1982년, 그리고 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지의 월별 강우량을 나타낸다.

Table 1. Monthly precipitation of experimental periods (unit : mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1982	9.0	18.1	50.9	21.2	88.2	37.3	163.7	213.6	4.1	12.9	95.1	29.8	743.9
1992	6.0	4.2	37.9	100	68.8	42.0	291.8	216.2	200.6	56.1	18.3	42.7	1,084.6
1994	5.8	5.8	37.6	46.5	156.0	145.0	60.0	211.0	1.5	159.0	20.5	9.1	857.8
2003	-	-	3.0	180.3	218.0	196.8	512.0	330.4	240.6	18.3	40.0	16.2	1,755.6
2004	6.5	23.2	29.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58.8

함양량 산정을 위한 주요 인자인 직접유출량의 산정은 SCS-CN 방법을 이용하였다. SCS-CN 방법의 기본 이론은 AMC II 상태하에서의 유출곡선지수인 CN을 면적가중법으로 산정하고 매 강우사상별 선행토양수분상태에 따라 아래 식 (7)에 적용, 최대잠재저류량 S를 계산하였으며, 이 값에 0.2를 곱하여 초기손실량(Ia)을 구한다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (7) \quad I_a = 0.2 \times S \text{ (mm)} \quad (8)$$

직접유출은 초기손실량을 초과한 강수량에 의해 발생하는 것이므로 초기손실량보다 적은 강수에 대해서는 직접유출이 발생하지 않는 것으로 보았으며, 초기손실보다 큰 강수에 대해서는 식 (10)을 적용하여 지표유출량(Q, mm)을 계산하였다.

$$Q = 0 \quad (P \leq I_a) \quad (9) \quad Q = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{P + 0.8 \times S} \quad (P > I_a) \quad (10)$$

증발산량의 산정은 1990년 Utah State University의 Allen에 의하여 개발된 9가지 잠재증발산량 추정공식이 포함된 REF-ET 모형을 1994년 개선한 REF-ET v2.15을 이용하였으며, 본 고에서는 논에 대해서는 수정 Penman 법을, 그리고 밭 및 과수원, 임야에 대해서는 FAO Penman-Monteith 방법을 적용하여 계산한 값에 농촌용수 수요량 조사 종합 보고서(농림부, 1999)의 작물계수를 곱하여 실제 증발산량을 추정하였다.

Table 2은 시험기간 직접유출량, 증발산량 및 침투량을 나타낸다. 직접유출량은 1982년 총강우량의 11%, 1994년 21%, 1992년 19%, 그리고 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지는 총강우량의 39%로 나타났다. 증발산량은 10년 빈도 한발년이 30년 빈도 한발년 보다 높게 나타났으며, 두 해 모두 강수량을 초과하는 것으로 나타나, 정상상태의 물수지식 (5)에 적용할 경우 함양량 산정시 부(-)의 값이 발생한다.

시험유역은 자유 대수층으로, 평균 대수층의 두께는 10 m로써, 양수시험을 통한 투수계수는 0.0000128 m/s, 비산출율은 0.102이고, 비저류계수 0.0003 m⁻¹로 조사되었다.

양수량은 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지는 실제 양수량을 적용하였으며, 적정개발량 산정을 위한 1982년과 1992년 및 1994년의 양수량은 농업·농촌용수 종합이용계획(농림부, 1999) 상의 2011년 이후 용수수요량을 기초로 하여, 생활용수용(385명)으로는 농촌 인구 1인당 수요량인 0.35 m³/day를 적용하였으며, 재배기간 경북지역 논용수 수요량인 0.010 m/day와 밭용수 수요량인 0.003 m/day를, 지하수를 이용하고 있는 일부 논(9 ha) 및 밭(40 ha)과 과수원(42 ha)의 기본 양수량으로 하여 지하수 고갈 및 관측정의 수위 저하가 발생하지 않는 범위 내에서 증감시켜 적정개발량을 추정하였다.

Table 2. Runoff and infiltration of experimental periods

Experimental periods (Drought Frequency)		Precipitation	Run-off	Infiltration	Evapotranspiration
2003/03/19	mm	1,814	711	1,103	734
~	m ³	7,058,016	2,767,471	4,290,584	2,856,427
2004/03/18					
1992	mm	1,085	203	882	742
(2.33 years)	m ³	4,218,705	788,372	3,430,333	2,884,552
1994	mm	858	176	682	939
(10 years)	m ³	3,336,842	684,333	2,652,509	3,652,204
1982	mm	744	84	660	900
(30 years)	m ³	2,893,771	325,555	2,568,216	3,499,211

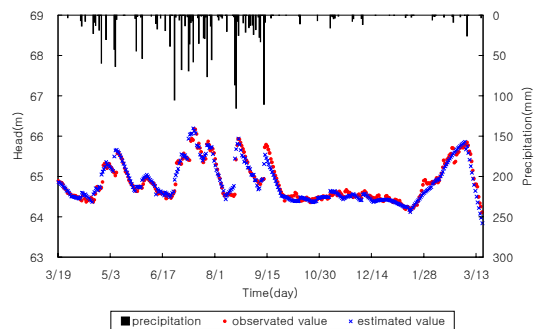
4. 모형의 적용 및 결과

시험유역의 지하수 거동분석은 visual MODFLOW v2.6을 이용하였다. 모형에 적용한 기본적인 입력 자료는 양수량, 대수층 수리상수, 하천수위, 증발산 및 침투량 등이며, 일별 지하수위 및 물수지를 시물레이션 할 수 있도록 시간간격을 설정하였다.

모형에서 침투량은 크게 논지대와 논을 제외한 기타 지역으로 나누어 적용하였다. 재배기간 논지대의 침투량은 농촌용수 수요량 조사 종합 보고서(농림부, 1999)의 경상북도 상주시 일평균 침투량인 0.0034m/day를 적용하였으며, 비재배기 논 및 기타 지역은 자연 강수량에서 직접유출량을 뺀 나머지를 침투량으로 적용하였다.

Visual MODFLOW v2.6에서는 지하수면이 증발산 표면(ET surface) 보다 높거나 같은 지점에 위치할 경우 증발산되는 손실량은 사용자가 지정한 증발산이 발생하며, 지하수면의 심도가 고엽깊이(extinction depth) 이하로 하강하면 지하수면으로부터 증발산은 발생하지 않는다는 기본 개념을 사용하였다. 따라서 모형에서는 지표면 상에서의 증발산량과 지표면 하에서의 증발산량을 따로 분리하지 않고 적용가능하다.

지하수위를 관측한 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지 실제 양수량을 적용하여 시물레이션 한 결과는 Fig 3과 같으며, 시물레이션 전 기간에 걸쳐 고갈 셀은 나타나지 않았다. 관측값과 모형 추정값을 분석한 결과 잔차의 평균은 0.0009 m, 잔차 제곱합은 7.245 m², 절대평균오차는 0.094 m, 제곱근오차는 0.141 m로 나타났다. 모형 추정값의 정확도를 평가하기 위해 모형의 효율을 식 (11)을 이용하여 구한 결과 92%로 나타났다.



(11) Figure 3. Comparison of observed and simulated water table

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{av})^2 - \sum_{i=1}^n (X_i' - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{av})^2}$$

여기서, X_i 는 모형 추정값, X_i' 는 관측값, X_{av} 는 모형 추정값의 평균이다.

시험유역 적정개발량의 평가는 지표수자원이 부족한 평년, 10년 및 30년 빈도 한발년에 대하여 수행하였다. 시물레이션 결과는 Table 3와 같으며, 시물레이션 전반에 걸친 수위 변동을 살펴보면, 수위의 안정적인 측면에서 잦은 강우가 내린 10년 빈도 한발년인 1994년이 평년 빈도 한발년인 1992년 보다 더 안정적인 것으로 나타났다. 이는 1994년 5~6월 사이의 빈번한 강우가 지하수위 상승에 기여한 것으로 판단된다.

시물레이션 종료 후의 추정 수위가 초기 수위를 회복하며, 시물레이션 전기간에 걸쳐 고갈셀이 나타나지 않도록 양수량을 조절한 결과, 농업·농촌용수 종합이용계획(농림부, 1999)을 기초로 한 2011년 이후 시험유역의 용수 수요량인 456,889 m³/year에 대하여 평년 빈도 한발년의 경우에는 용수 수요량을 충족하는 것으로 나타났으나, 10년 빈도 및 30년 빈도 한발년에 대해서는 용수 수요량에서 각각 108,422 m³/year 및 68,062 m³/year이 부족한 것으로 나타났다.

Table 3. Results of simulation using visual MODFLOW

Experimental periods (Drought Frequency)	In (m ³)			Out (m ³)			
	Storage	River	Infiltration	Storage	Wells	River	ET
2003/3/19 ~ 2004/3/18	2,926,487	6,946	4,163,572	4,732,561	616,657	183,948	1,563,818
1992(2.33 years)	2,551,307	7,457	3,581,403	4,159,953	500,059	143,714	1,336,422
1994(10 years)	2,724,735	8,611	2,747,010	3,460,936	342,627	94,059	1,582,714
1982(30 years)	2,548,415	8,160	2,773,893	3,373,360	388,827	98,502	1,469,755

5. 결론

농촌 소유역의 지하수 이용 특성은 지표수와 연계되어 운영되며, 함양과 배수가 수시로 변화하는 비정상 상태를 유지한다는 것이다. 본 고에서는 지하수 유동모형인 visual MODFLOW v2.6을 이용하여 시험기간의 지하수 적정개발량을 평가하였다.

시험은 부족한 지표수자원에 대하여 생활용 및 일부 농업용으로 지하수를 연계 운영하고 있는 실제 유역을 선정하여 수행하였으며, 시험기간은 지하수위 관측자료가 있는 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지와 1973 ~ 2002년까지의 강우자료를 기초로 한발년에 대한 빈도분석을 실시, 평년과 10년 및 30년 빈도 한발년을 채택하였다. 지표유출은 초기손실량을 초과한 강수량에 의해 발생하는 것이므로 초기손실량보다 적은 강수에 대하여는 직접유출이 발생하지 않는 것으로 보았으며, 초기손실보다 큰 강수에 대해서는 SCS-CN 방법의 지표유출량 추정식을 적용하여 산정하였다. 증발산량의 추정은 수정 Penman 법 및 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하였으며, 양수량은 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지의 경우 실제 양수량을, 그리고 1982년과 1992년 및 1994년의 경우에는 농업·농촌용수 종합이용계획(농림부, 1999)의 2011년 이후 농촌 용수수요량을 기초로 하여 적용하였다.

지하수위를 관측한 2003년 3월 19일부터 2004년 3월 18일까지 실제 양수량을 적용하여 시뮬레이션 한 결과, 시뮬레이션 전 기간에 걸쳐 고갈 셀은 나타나지 않았으며, 모형 추정수위와 관측수위를 분석한 결과 잔차의 평균은 0.0009m, 잔차 제곱합은 7.245m², 절대평균오차는 0.094m, 제곱근오차는 0.141m로 나타났으며, 모형의 효율은 92%로 나타났다.

시뮬레이션 종료 후의 추정 수위가 초기 수위를 회복하며, 시뮬레이션 전기간에 걸쳐 고갈셀이 나타나지 않는 범위내의 시험유역 침투량에 대한 적정개발량의 비는 평년 빈도 한발년의 경우 14.0%, 10년 빈도 한발년의 경우 12.5%, 30년 빈도 한발년의 경우에는 14.0%로 각각 나타났다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(3-3-1)에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. 건설교통부(2001). 수자원장기종합계획(WATER Vision 2020).
2. 건설교통부(2002). 지하수관리기본계획, 건설교통부, pp. 112.
3. 농림부(1999). 농업·농촌용수 종합이용계획, 농림부, 농어촌진흥공사, pp. 104 - 145.
4. 정상욱, 이영대, 민병형(1994). MODFLOW 모형을 이용한 부곡온천지역 지하수 유동해석, 한국수문학회지, 제26권 제5호, pp. 79 - 87.
5. Waterloo Hydrogeologic Inc, Visual MODFLOW User's Manual.