

강수에 의한 지하수함양량의 산정

배상근*, ○김용호**

1. 서론

지하수개발량을 평가하거나 지표수와 지하수와의 교류관계를 검토하거나 지표유출이나 지하수 유출을 산출하기 위해서는 지하수함양에 대한 양적인 검토가 반드시 있어야하며 산정된 함양량의 정도가 구하고자하는 결과의 정도에 직접적으로 영향을 미치므로 정확한 함양량의 추정이 요구된다. 지하수를 함양시키는 함양원은 다양하나 일반적으로 강수에 의한 함양이 가장 큰 역할을 한다. 그러나 우수의 지하수 함양에는 여러가지 요소가 영향을 미침으로 이에 대한 규명은 쉽지 않다. 지하수함양량을 산정하기 위하여 많은 기법들이 개발되어 있으며 이들 기법들을 이용하여 여러지역에서 함양량이 산정되었다. 지하수의 함양원인 강수의 침투는 토지이용상태에 크다란 영향을 받는다. 본 연구에서는 강수에 의한 지하수 함양량 산정기법에 대하여 검토하고 토지이용상태에 따른 추정된 함양량에 대하여 살펴보고 실험을 통하여 산정한 토지이용상태별 지하수함양량을 제시하고 고찰한다.

2. 물수지에 의한 방법

물수지방법은 물의 순환과정에서 수문제량을 평가하여 지하수의 함양량을 추정하는 방법으로 장기간에 걸친 평균적 수문평형상태를 가정하기 때문에 중간과정에서의 동적인 수문순환의 변화를 고려하지 못하는 결점이 있다. 물수지방법은 유역내의 강수량과 직접유출, 증발산량, 지하수 함양량 간에 수문평형이 유지된다는 가정 하에 식 (1)로 표시된다.

$$I=P-DR-ET\pm IU \tag{1}$$

여기서, I : 지하수 함양량, DR : 지표수의 직접유출량,
P : 총강수량, ET : 증발산량,
IU : 타수역으로부터 지하수유·출입량

위의 식에서 타 유역으로부터의 지하수의 유입·유출량이 없다고 가정하면, 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$I=P-DR-ET \tag{2}$$

이들 식의 구성요소들에 대한 값을 구하여 지하수함양량을 구할 수 있으며 이 방법을 적용한 연구 결과는 표 1 및 2에 나타내었다.

* 계명대학교 공학부 토목공학과 교수

** 계명대학교 공학부 토목공학과 시간강사

표 1. 물수지법을 이용한 지하수함양량 산정값(국내)

연구자 또는 기관	추정량 (억톤/년)	연평균 강우량에 대한 비율(%)
선우중호(1992)	100~150	7.9~11.8
한정상(1995) 이천복(1994)	228	18
최병수(1992)	205	16
강장신(1997)	247	20.1

표 2. 물수지법을 이용한 지하수함양량 산정값(국외)

연구자 또는 기관	연평균산정량 (mm/year)	연평균 강우량에 대한 비율(%)
R. G. Taylor et al.(1996)	110~240	12.7
J. W. Finch(1998)	96.4~290.5	16.4~49.5

3. 기저유출분리에 의한 방법

흐름방정식을 이용하는 본 기법은 물리적 특성이 단순화된 대수층에 흐름방정식을 적용하여 해석적으로 기저유출 곡선을 산출하는 방법이다. 이 방법에 의한 대표적 결과로는 시간 t에서 기저유출 $Q_b(t)$ 가 식 (3)과 같이 표시된다.

$$Q_b(t) = Q_0 \cdot K_r^t \tag{3}$$

여기서 Q_0 는 감수초기의 유량이고, K_r 은 감수계수이다. 다른 형태로는 식(4)와 (5) 등이 있다.

$$Q_b(t) = Q_0 \cdot K^t \tag{4}$$

$$Q_b(t) = Q_0 / (1 + \sigma t)^2 \tag{5}$$

여기서, K와 σ 는 감수계수이다. 위의 식을 이용한 방법으로 추정된 지하수함양량의 값이 표 3에 나타나있다.

표 3. 기저유출 분리법을 이용한 지하수함양량 산정값

연구자 또는 기관	추정량 (억톤/년)	연평균 강우량에 대한 비율(%)	추정방법
수자원공사(1993)	134.3	10.6	지하수자원 기본조사 보고서(1993), 물수지, 유역별 적정개발 가능량 분석, 대상지역 : 5대강 유역
수자원공사(1994)	193.9	15.3	지하수자원 기본조사 보고서(1994), 다목적댐유입량(갈수시3개월)→기저유출량산정
수자원공사(1995)	186.3	14.7	지하수자원 기본조사(1995) 1994년 자료이용
이동률(1995)	72.0	7.8	지하수감수곡선 이용, 5대강 유역, 지하수 감수기간의 지하수 유출량 고려
박창근(1996)	93.0	10.07	기저유출분리방법, 5대강 유역

4. 동위체에 의한 지하수함양량의 추정

물순환에서 물분자와 그 자체와 같이 행동하는 물의 동위체를 이용함으로써 동위체가 가진 Dating능과 Tracer능을 활용하여 수문순환의 각 과정에서의 물의 거동의 실태를 상세히 파악할 수 있다. 이와같은 동위체로는 수소의 방사성동위체인 트리티움과 수소 및 산소의 안정동위체인 중수소와 중산소가 있으며 자연계에 보편적으로 존재하고있기 때문에 환경동위체로 불린다. 이런 환경동위체를 이용하여 지하수함양량을 평가하는 연구에는 대수층중의 지하수를 채수하여 동위체 농도의 분포상황을 파악함으로써 대상으로하는 대수층으로의 지하수함양량을 구하는 방법과 지하수유동의 지하수함양역에서의 지표면으로부터 지하수면까지의 불포화대의 토양수를 채취하여 동위체농도의 심도방향의 분포상황으로부터 지하수함양량을 추정하는 방법이 있다.

동위체 프로파일을 이용하여 지하수함양량을 평가한 연구는 표 4에서와 같이 1970년대부터 함양량이 적은 건조지역에 적용되었으며 그 후 점차적으로 상대적으로 많은 함양량을 가진 습윤지역으로 이 방법의 적용지역이 확대되었다. 사용되는 환경동위체는 주로 트리티움이며 안정동위체를 이용하여 지하수함양량을 평가한 연구에는 드물다.

표 4. 동위체를 추적자로 이용한 지하수 함양량

실시장소	대상토양	지하수함양량 (mm/yr)	년간강우량 (mm)	연구자
독일 (Giessen, Speyer)	로움질토양 사질토양	200	.	Zimmermann et al. (1967)
덴마크 (Gronhoj)	빙하퇴적물	358	780	Andersen · Sevel (1974)
영국 (Berkshire)	초크	334	.	Smith et al. (1970)
인도 (Gujarat)	조사, 로움 점토질토양	15~56	700	Sukhija · Shah (1976)
남아프리카 (Kalahari)	칼라하리사	10	500	Vogel et al. (1974)
오스트레일리아 (Gambier Plain)	사질로움~점토	40~140	750	Allison et al. (1974)
일본 (武藏野台地)	관동로움	885	1550	梶根 · 田中 · 嶋田 (1980)
일본 (相模原台地)	관동로움	913	1670	Shimada, J., (1983)

5. 염소이온에 의한 방법

강수 내에 함유된 염소이온 농도와 인공오염이나 광화수에 의해 영향을 받지 않는 지하수 내에 함유된 염소이온농도를 이용해서 지하수의 함양량을 산정할 수 있다. 즉 지하수와 강수의 염소이온농도 사이의 상관관계를 이용해서 함양량을 산정할 수 있는 식은 아래와 같다.

$$I = \frac{Cl_p}{Cl_n} \quad (6)$$

여기서, Cl_p : 관측지점에 내리는 강수의 평균 Cl 함양, Cl_n : 지하수 내 염소이온의 평균농도,
I : 함양률

표 5 Pondicherry의 Cuddalore 사암지역의 염소이온 농도를 이용한 지하수함양량 산정

Site	Steady state chloride conc. in the profile(ppm)		Recharge(%)		Mean recharge(%)
	6/1984	3/1985	6/1984	3/1985	
L. R. Palayam	31.2	34.7	27.5	23.7	25.6
Murattandi	46.3	61.3	17.7	13.4	15.5
Idayandhavadi	72.1	53.3	11.4	15.3	13.4

6. 수치모형에 의한 방법

이 방법은 강우의 침투, 지하수의 흐름, 증발산량 등을 수치모형으로 표현하고 개념모형을 설정한 후 수치해석방법으로 지하수의 함양량과 대수층에서 지하수의 유출량을 산정한다. 그러나 복잡·다양하며 불확실성이 많은 자연현상을 정확하게 표현한다는 것은 거의 불가능하기 때문에 이러한 복잡·다양한 자연현상을 단순화시킬 수 있는 경우에 한해서만 해석이 가능하다. 이러한 수치모형을 적용하려면 해당지역의 다양한 실측자료가 필요하다. 수치모형으로는 PLASM, ASM, FLOWTRANS, MODFLOW, FEFLOW 및 SWAT 등이 있으며 이 방법으로 산정한 지하수함양량의 결과 중 하나는 표 6과 같다.

표 6 Illinois의 3구역에 SWAT모형을 이용하여 산정한 지하수함양량과 실측치

	SWAT 07130009 (average annual)	Measured Goose Creek (1957)	SWAT 07130011 (average annual)	Measured Hadley Creek (1957)	SWAT 07130001 (average annual)	Measured Panther Creek (1952)
Recharge (mm)	217	264	151	99	120	204
ET (mm)	552	536	632	604	561	557
Revap (mm)	48	81	52	22	42	51

7. 침투실험을 이용한 방법

침투에 관한 연구는 Horton(1933, 1937, 1939)이 제창한 침투능의 개념 및 침투방정식으로부터 시작된다. Horton의 연구는 실내 및 현지에서의 실험을 기초로 경험적인 식을 유도하였다. 본 연구에서는 침투실험을 통하여 지하수함양량을 산정하기 위하여 그림 1과 같이 강우발생 장치를 설치하여 토지이용 특성별 지하수함양량을 산정하였다.

그 결과 산지사면의 종기침투능이 110mm/hr이었고 초지에서의 종기침투능이 90mm/hr였다.

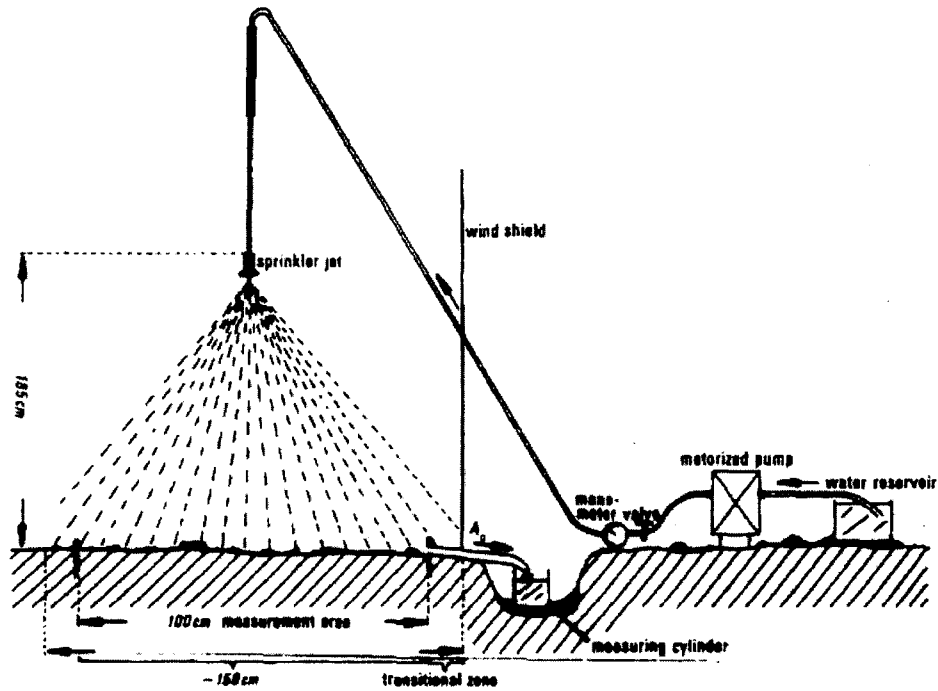


그림 1 침투실험을 위한 강우발생 장치의 모식도

8. 결론

본 연구에서는 강수에 의한 지하수함양량 산정방법에 대하여 살펴보고 우수의 침투실험에 의한 지하수함양량을 산정하기 위한 실험을 하였다. 그 결과 다양한 지하수함양량 산정방법이 있으나 특정 지점의 지하수개발량 산정에 필요한 함양량을 구한 연구는 드물며 지하수함양에 영향을 크게 미치는 토지이용상태별 지하수함양량 산정의 어려움을 알 수 있다. 침투실험결과 종기침투능의 값으로 부터 우리나라의 토지이용상태특성상 강수에 의한 지하수함양량이 기존에 산정된 값보다 상당히 클 것으로 판단된다.

9. 참고문헌

- 강장신 (1997). 지하수 수량의 평가, 지하수 자원의 개발 보전관리심포지엄, 한국자원공학회, pp. 127~184.
- 박창근, 신현민, 김성탁, 김남종 (1996). “우리나라 5대강 유역 지하수 함양량 추정” 대한 지하수 환경학회 1996년도 정기총회 및 학술발표회, pp. 54~59.
- 선우중호 (1992). 우리나라 지하수 개발의 필요성, 물관련 정책토론회, 건설부·한국수자원공사, pp. 99~119.
- 수자원공사 (1993). 지하수자원 기본조사 보고서
- 수자원공사 (1994). 지하수자원 기본조사(2차) : 지하수 이용관리법안수립 및 대체용수원 개발지역 산정조사 보고서
- 수자원공사 (1995). 지하수자원 기본조사(3차) : 지하수 관리조사 보고서
- 이동률 (1995). “지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기갈수량 예측” 고려대학교

박사학위논문

- 이천복 (1994). 한국의 지하수자원과 개발방향, 지하수개발과 농어촌용수, 농어촌진흥공사, pp. 133~164.
- 최병수 (1992). 지하수 개발의 현황과 문제점, 물관련 정책토론회, 건설부·한국수자원공사, pp. 157~170.
- 한정상 (1995). 지하수개발과 관리대책, 수자원개발과 보존대책, 한국수자원공사 1995, pp. 39~103.
- B. S. Sukhija, D. V. Reddy, P. Nagabhushanam, Syed Hussain (1996). "Environmental and injected tracers methodology to estimate direct precipitation recharge to a confined aquifer" *Journal of Hydrology*, Vol.177, pp. 77~97
- Horton, R. E. (1933) "The Role of Infiltration in the Hydrological Cycle" *Trans. Amer. Geophys. Union*, 14, pp. 446~460.
- Horton, R. E. (1937) "Determination of Infiltration Capacity for Large Drainage-Basins" *Trans. Amer Geophys. Union*, 18, pp. 371~385.
- Horton, R. E. (1939) "Analysis of Runoff-Plat Experiments with Varying Infiltration-Capacity" *Trans. Amer. Geophys. Union*, 20, pp. 693~711.
- J. G. Arnold, R. S. Muttiah, R. Srinivasan, P. M. Allen (2000) "Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin" *Journal of Hydrology*, Vol.227, No.1-4, pp. 21~40.
- J. W. Finch (1998) "Estimation direct groundwater recharge using a simple water balance model-sensitivity to land surface parameters" *Journal of Hydrology*, Vol.211, pp. 112~125.
- R. G. Taylor, K. W. F. Howard (1996) "Groundwater recharge in the Victoria Nile basin of east Africa: support for the soil moisture balance approach using stable isotope tracers and flow modelling" *Journal of Hydrology*, Vol.180, pp. 31~53.