

수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가

김규범¹⁾ · 이명재²⁾ · 김정우²⁾ · 이진용*²⁾ · 이강근³⁾

¹⁾한국수자원공사 조사기획처 국가지하수정보센터, ²⁾(주)지오그린21, ³⁾서울대학교 지구환경과학부

Evaluation of Estimating Groundwater Recharge Using Waterlevel Data Obtained from the National Groundwater Monitoring Stations

Gyoo-Bum Kim¹⁾ · Myeong-Jae Yi²⁾ · Jeong-Woo Kim²⁾
Jin-Yong Lee*²⁾ · Kang-Kun Lee³⁾

¹⁾National Groundwater Information Management & Service Center, KOWACO, ²⁾GeoGreen21 Co., Ltd.,

³⁾School of Earth and Environmental Sciences, SNU

서 론

지하수 함양량은 지하수 개발 및 수자원관리에 기초 자료로 사용되고 있어, 여러 학술논문과 보고서를 통하여 여러 가지 추정방법들이 제안되었고 다양한 관련연구가 국내외적으로 진행되어 왔다(최병수·안중기, 1998; 건설교통부·한국수자원공사, 1999; 박재성 외, 1999; 고용권 외, 2001; 문상기·우남철, 2001; 구민호·이대하, 2002; 문상기 외, 2002; Solomon and Sudicky, 1991; Healy and Cook, 2002; Scanlon et al., 2002; Moon et al., 2004). 본 단보에서는 국가 지하수 관측망의 장기 관측자료를 이용하여 지하수 함양량을 추정하는 방법에 대하여 검토하고 실제 자료에 대한 적용 가능성을 살펴보았다. 적용가능성이 있는 방법에 대하여는 현재 구축중인 국가 지하수관측망 관리시스템의 응용분석 프로그램(ProMOD version 1.0)에 포함시킬 예정이며, 이를 통해 각 유역별 함양량의 분포 및 변화 등을 파악하고 향후 지하수 적정개발 및 지하수 자원의 효율적 관리에 필수적인 기초정보를 제공하고자 한다.

지하수위를 이용한 함양량 추정방법의 대표적인 예로 장기 지하수위 관측자료와 강수량 비를 이용한 함양량 산정 방법과 지하수위 강하곡선을 이용한 방법 등이 있다(최병수·안중기, 1998; 건설교통부·한국수자원공사, 1999). 그런데 전자의 방법은 신뢰성 있는 비산출율(specific yield, Sy)에 대한 정보가 필수적이다. 비산출율을 산정하기 위해서는 장기양수시험 등을 수행해야 하는데, 현재 국가 지하수관측망 설치공사시 시행하는 단공 양수시험으로는 적절한 비산출율을 구하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 국가 지하수관측망 설치 당시 보다 정밀한 수리지질조사가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 한편 이 방법은 대상 지역이 지하수 함양지역일 경우에 비교적 잘 맞으며, 그렇지 않은 경우는 지하수 함양이 과다하게 산정될 가능성이 있는 것으로 알려졌다(구민호·이대하, 2002).

본 단보에서는 일반적으로 한정된 특정 수리지질 정보만을 가진 국가 지하수관측소에 대해 보다 현실적인 방법으로 사료되는 지하수위 강하곡선을 이용한 지하수 함양량 추정방법을 검토하고 151개의 국가 지하수관측소로부터 취득한 2000년도 지하수위 관측자료에 대해 이 방법의 적용가능성을 평가하였다.

* Corresponding author : hydrolee@empal.com

지하수위 강하곡선을 이용한 함양을 산정

최병수와 안중기(1998)의 지하수위 강하곡선을 이용한 지하수 함양을 추정방법을 국가 지하수 관측망 지하수위 자료에 적용한 구체적인 절차는 다음과 같다(상세한 이론에 대해서는 해당 논문 참조).

① 지하수위 자료에서 최고수위와 최저수위를 읽어 지하수 최대 수위강하량(s_m)을 구한다. 여기서 관측 정 인근의 양수 또는 인공함양의 영향이 없는 구간의

값을 취하여야 한다. 또한 관측장비의 점검이나 기록의 이상으로 판단되는 값은 분석에서 제외해야 한다. 특히 최저수위의 결정이 강하곡선의 기울기에 가장 큰 영향을 주는 요소이므로 결측자료가 있을 때에는 최저수위 결정에 영향을 주지 않는 범위에서 가장 최근의 관측값이 연속적으로 관측된 것으로 판단하고 입력한다. 예를 들어 Table 1과 같은 수위변동 자료가 있을 때 최고수위와 최저수위는 각각 6.09 m, 1.62 m이다. 따라서 최대지하수위 강하량(s_m)은 4.47 m가 된다.

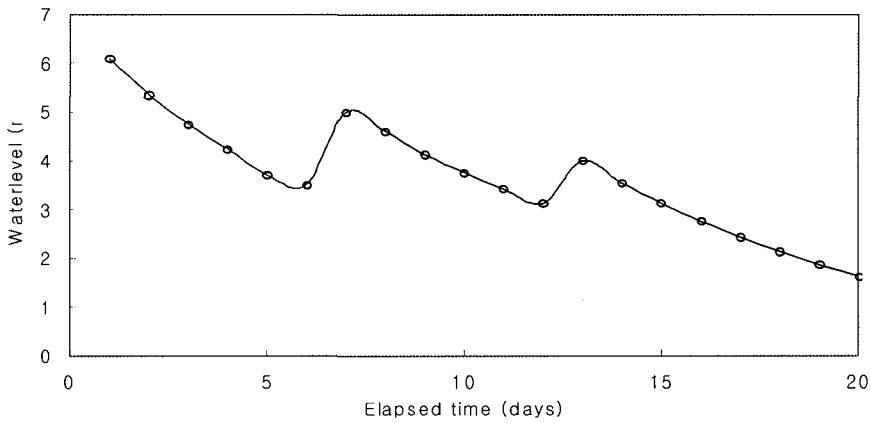


Fig. 1. Times series data of water level.

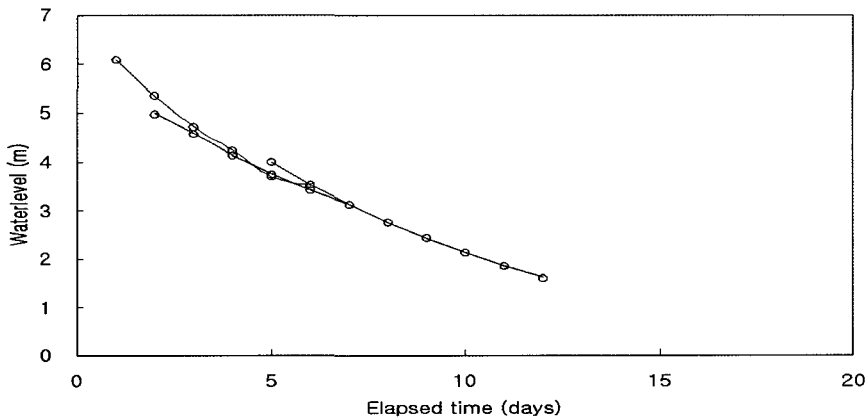


Fig. 2. Superposition of water level decline curves for extracting a mater recession curve.

② 일별 지하수위 자료를 이용하여 수위변동곡선을 작도한다. Table 1의 지하수위 자료를 이용하여 작도한 수위변동곡선은 Fig. 1과 같다.

③ 수위변동곡선에서 지하수 함양을 계산에 필요한 부분은 수위가 강하하는 부분이므로 상승하는 부분은 제외하고 수위가 강하하는 구간들을 서로 평행 이동하여 몇 개의 강하곡선이 서로 연결되거나 또는 중첩되도록 작도한다. 여기서 작도된 곡선을 지하수위강하 대표곡선(master recession curve, MRC)이라고 한다. Fig. 1에서 빨강, 녹색, 파랑색으로 표시된 부분이 수위 강하부분이고 이 부분을 평행 이동시켜 서로 연결 또는 중첩되도록 표현한 것이 Fig. 2이다.

④ 지하수위강하 대표곡선에서 구한 각 시간별 지하수위를 이용하여 최고수위에서 지하수위를 감하여 수위강하량(s)을 계산한다. Table 2에서 지하수위는 지하수위강하 대표곡선에서 작도된 지하수위로서 최고수위(6.09 m)를 이용하여 수위강하량을 구한다.

⑤ 최고수위와 최저수위의 차이인 지하수 최대수위 강하량(s_m)에서 ④과정에서 구한 수위강하량을 감함으로써 $s_m - s$ 를 계산한다.

⑥ 지하수위강하 대표곡선의 수위강하량($s_m - s$)을 자연로그(ln)값을 취하여 반대수(semi-logarithmic)

그래프에 작도한 후 이 값들에 가장 근접하는 직선을 찾고 이 직선의 기울기 k 값을 구한다(Fig. 3).

⑦ 위에서 구한 k 값과 $s_m - s = s_m e^{-kt}$ 식을 이용하여 s_{30} 을 구하고 이를 지하수 함양율(α) 추정식, $\alpha = -(1/\ln \delta) \cdot (s_{30}/s_m)$ 에 대입한다.

국가 지하수관측소 지하수위 자료에의 적용

위에서 설명한 방법으로 2000년도 151개 국가 지하수관측소 지하수위 자료를 이용하여 지하수 함양율을 계산하였다. 특히 151개의 자료마다 각각 하나씩 계산하는 과정은 반복적이며 또한 해마다 갱신되는 수위 자료를 대상으로 수작업으로 새로이 함양율을 계산하는 것은 시간이 많이 소요되는 일이므로 여기서는 이를 자동으로 계산하는 FORTRAN 프로그램을 개발하여 적용하였다.

본 FORTRAN 프로그램은 크게 5개의 단계(부분)로 구성된다. 첫 번째로 지하수위 관측자료를 불러 들어서 일정한 형식으로 인식하도록 하였다. 읽어들이자료를 관정별 자료로 분리하고 각각 관정별 자료에서 최고수위와 최저수위를 찾아내어 최대 수위강하량

Table 1. Waterlevel data for explanation.

Time (days)	Waterlevel (m)	Time (days)	Waterlevel (m)	Time (days)	Waterlevel (m)	Time (days)	Waterlevel (m)
1	6.09	6	3.50	11	3.42	16	2.76
2	5.34	7	4.99	12	3.13	17	2.42
3	4.73	8	4.60	13	3.99	18	2.13
4	4.24	9	4.12	14	3.53	19	1.86
5	3.70	10	3.76	15	3.12	20	1.62

Table 2. Summary of waterlevel decline data.

Time (days)	Waterlevel (m)	Decline, s (m)	$s_m - s$ (m)
1	6.09	0.0	4.47
3	4.73	1.36	2.81
5	3.70	2.39	2.08
7	3.13	2.96	1.51
9	2.42	3.67	0.80
11	1.86	4.23	0.24

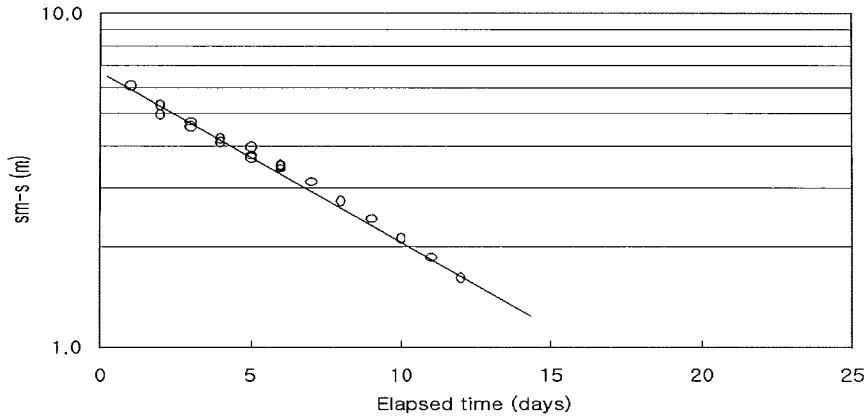


Fig. 3. Interpretation of the master recession curve. The Y axis is expressed as common logarithmic scale instead of natural log scale for convenience of plotting.

(s_m)을 계산한다. 두 번째는 읽어들이 각 관정별 자료에서 함양을 계산에 직접 이용되는 수위강하 부분만을 선택하는 과정이다. 선행 관측 지하수위와 다음의 관측수위를 비교하여 감소한 부분을 찾아서 수위강하구간의 개수와 각 수위강하 부분이 시작되는 날과 끝나는 날이 기록되도록 하였다. 세 번째의 과정은 지하수위강하 대표곡선을 만드는 과정이다. 두 번째 과정에서 구한 여러 구간의 수위강하 시작 일과 종료 일 사이의 수위 관측값을 비교하여 서로 중첩되도록 하는데, 선행 수위강하구간과 다음 수위강하구간의 관측수위가 중복되는 경우가 있을 때에는 선행 수위강하구간의 관측수위가 우선시 되도록 하여 지하수위강하 대표곡선이 생성되도록 한다. 네 번째 과정에서는 지하수위강하 대표곡선의 지하수위를 이용하여 수위강하량(s) 및 최대 수위강하량(s_m)과 수위강하량의 차이($s_m - s$)를 계산한다. 마지막은 네 번째 과정에서 계산한 $s_m - s$ 값들을 반대수 그래프에 도시하였을 때 이것을 가장 잘 구현할 수 있는 직선을 찾아내는 과정이다. 여기서 $s_m - s$ 값과 가장 근접하는 직선을 구하는 것은 $s_m - s = s_m e^{-kt}$ 관계식에 양변에 자연로그를 취하였을 때 나타나는 최적의 회귀직선(regression line)을 찾는 것이다. 이를 통해 Y절편에 해당하는 최대강하수위(s_m)와 기울기에 해당하는 k 를 산정한다. 따라서 최대강하수위(s_m)를 먼저 구하

고 기울기 k 에 변화를 주어 네 번째 과정에서 구한 $s_m - s$ 와 $s_m e^{-kt}$ 의 오차가 가장 작은 경우를 찾는 과정이다.

Fig. 4는 본 프로그램의 실행 예로서 공주반포 국가 지하수 관측소의 2000년 1년간 관측 수위자료를 해석한 결과를 보여준다. 그림에서 첫 번째 열은 지하수위강하 대표곡선(MRC)의 수위를 보여주고 그 시간 간격은 모두 1일이다. 두 번째 열, 세 번째 열, 네 번째 열은 각각 지하수위의 강하량, $s_m - s$, $s_m e^{-kt}$ 의 값을 보여준다. 그 아래에 $s_m - s$ 에 가장 근접하는 직선을 찾은 결과와 무강우 지속시간이 30일이 되었을 때 발생하는 수위강하량(s_{30})의 계산결과를 보여준다. 이러한 결과를 바탕으로 다음의 식을 이용하여 δ 의 변화에 따른 지하수 함양율(α)을 구한다.

$$\alpha = -\frac{1}{\ln \delta} \cdot \frac{s_{30}}{s_m} = C \cdot \frac{s_{30}}{s_m} \quad (1)$$

위 식에서 구하는 함양율(α)은 δ 의 값을 어떻게 취하느냐에 따라 결정된다. 여기서 δ 값을 0.001-0.1 범위로 취하면 C 값은 0.1448-0.4242의 범위를 보인다. 한편 기존의 연구에 의하면 우리나라의 지하수 함양율은 18% 내외로 산정되므로 본 연구에서도 δ 를 0.005-0.01 범위로 선택하여 지하수 함양율을 산정하였다(최병수안중기, 1998; 건설교통부-한국수자원공사, 1999; 박재성 등, 1999). 초기에 최병수와 안중기

gw.level	drawdown	sm - s	sme ^{-kt}
78.470	.000	7.890	6.490
77.270	1.200	6.690	6.279
77.090	1.380	6.510	6.075
76.250	2.220	5.670	5.878
75.830	2.640	5.250	5.687
75.800	2.670	5.220	5.503
75.540	2.930	4.960	5.324
75.250	3.220	4.670	5.151
75.060	3.410	4.480	4.984
74.900	3.570	4.320	4.822
74.760	3.710	4.180	4.666
74.700	3.770	4.120	4.514
74.630	3.840	4.050	4.368
74.520	3.950	3.940	4.226
74.480	3.990	3.900	4.089
74.380	4.090	3.800	3.956
74.300	4.170	3.720	3.828
74.230	4.240	3.650	3.703
74.160	4.310	3.580	3.583
74.100	4.370	3.520	3.467
74.040	4.430	3.460	3.354
73.990	4.480	3.410	3.245
73.900	4.570	3.320	3.140
73.820	4.650	3.240	3.038
73.750	4.720	3.170	2.940
73.710	4.760	3.130	2.844
73.690	4.780	3.110	2.752
73.630	4.840	3.050	2.662
73.510	4.960	2.930	2.576
73.430	5.040	2.850	2.492
s30=	4.958	v= 7.890e ⁻	.0330t
	delta	c	alpha
	.005	.189	.119
	.006	.195	.123
	.007	.202	.127
	.008	.207	.130
	.009	.212	.133
	.010	.217	.136

Fig. 4. Example interpretation of water level data obtained from Kongju Banpo monitoring station.

(1998)는 δ 의 값을 지하수위 강하곡선법외에 다른 함양량 추정법(SCS-CN, 물수지 등)을 통해 역으로 계산하여 검증하였으나 이후 이 방법을 적용한 각종 논문에서는 본 단보와 같이 이 값에 대한 별다른 검토없이 주어진 δ 의 범위를 기계적으로 적용하였다. 국가 지하수관측망 지하수위 자료를 대상으로 $s_m - s$ 에 근접하는 회귀직선을 찾는 과정을 Fig. 5에 나타내었고 함양율의 계산결과는 Table 3에 정리하였다.

표에서 보는 바와 같이 지하수위 강하곡선을 이용하여 국가 지하수관측소 수위자료를 분석한 결과 지하수 함양율은 최소 0.006에서 최고 0.204의 범위를 그리고 평균 0.14, 중앙값 0.151 및 변동계수 0.39를 보였다. 적용한 δ 값에 대한 과학적 타당성에 대한 논의를 별도로 하고 단순히 추정값만 보았을 때에는 받아들일만한 지하수 함양율로 사료된다. 한편 지하수위 감소상수 (k)와 추정 지하수함양율(α)의 관계를 살펴보면 상호 단조증가의 경향을 보이나 비교적 큰 k 값에 대해서는 지하수함양율이 더 이상 증가하지 않고 일정값(여기서는 0.204)에 수렴하는 양상을 보였다(Fig. 6).

함양율 계산과정에 대한 토론

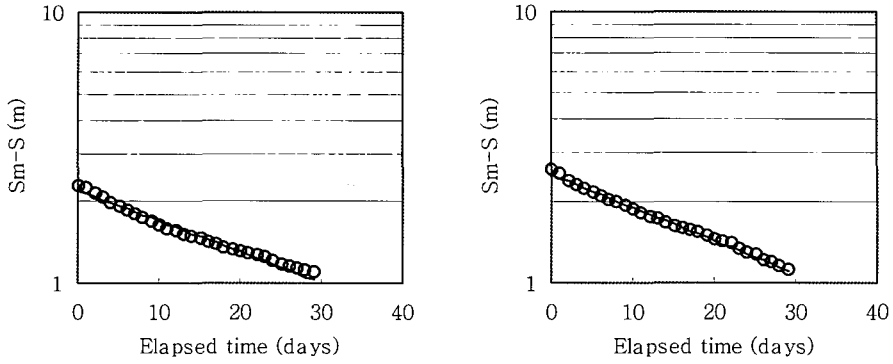
앞서 언급한 바와 같이 $s_m - s$ 값과 가장 근접하는 직선을 찾는 것은 $s_m - s = s_m e^{-kt}$ 관계식에 양변에 자연로그를 취하였을 때 나타나는 직선을 찾는 것으로 Y 절편에 해당하는 최대 강하수위(s_m)와 기울기에 해당하는 k 를 찾는 것이다. 그러나 이 과정(함양율 계산 과정)에서 다음 두 가지의 경우에 한하여 수위강하량을 이용한 함양계수의 산출은 적절하지 않은 것으로 사료된다.

·결정계수 (R^2)가 작은 경우

·계산에 활용할 수 있는 $s_m - s$ 자료의 개수가 3개 이하인 경우

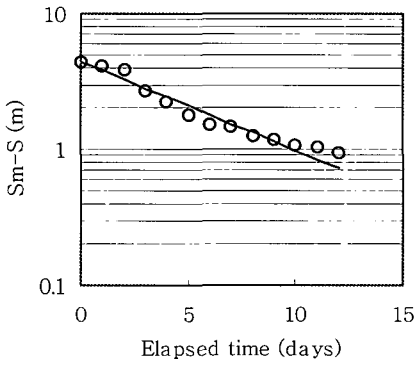
1) 결정계수 (r^2)가 작은 경우

$s_m - s$ 값과 가장 근접하는 $s_m e^{-kt}$ 을 찾는 다음 $s_m - s$ 와 $s_m e^{-kt}$ 의 결정계수값(r^2)를 계산하게 되는데 결정계수가 크다는 것은 $s_m - s$ 와 $s_m e^{-kt}$ 가 서로 근사한 값을 가진다는 의미이다. 따라서 결정계수가 클수록 계산한 결과가 높은 신뢰성을 가진다. 그러나 반대로 결정계수가 작은 경우는 그 신뢰성이 낮다. 결정계수의 최소 한계값을 0.95 미만으로 두고, 0.95 미만으로 나오는 관측소에서는 수위강하량을 이용한 함양계수의 결정은 적절하지 않다고 판단하였다. 계산에 사용된 결정계수는 다음과 정의된다.

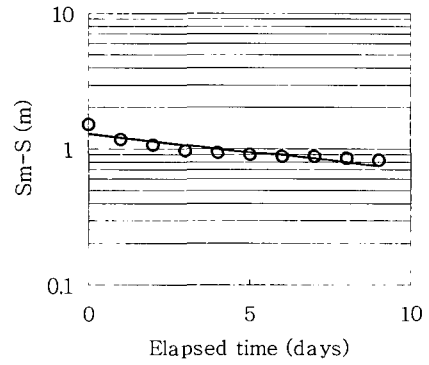


(a) Daejeon Munpyung ($y=2.29 e^{-0.026t}$)

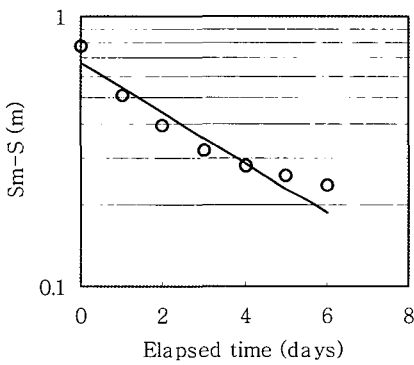
(b) Buyeo Oksan ($y=2.29 e^{-0.028t}$)



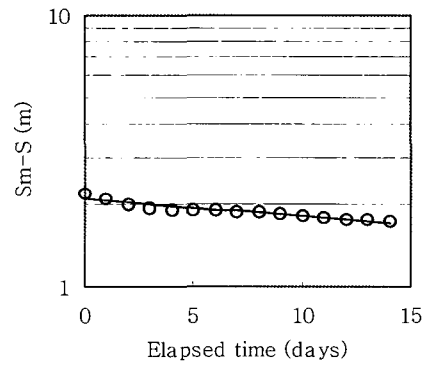
(c) Yungdong Simcheon ($y=4.41 e^{-0.151t}$)



(d) Okcheon Gunbok ($y=1.50 e^{-0.062t}$)

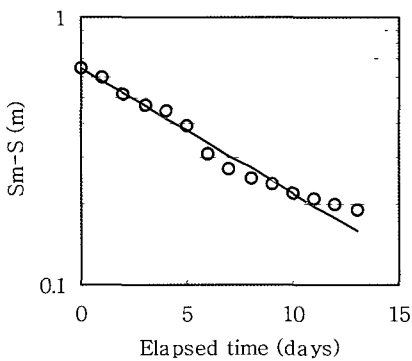


(e) Jangsu Jangsu ($y=0.77 e^{-0.214t}$)

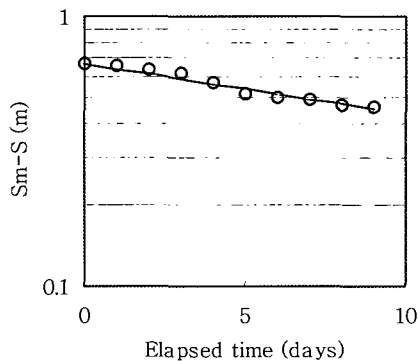


(f) Taean Taean ($y=2.20 e^{-0.014t}$)

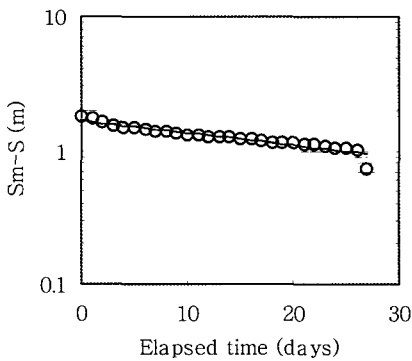
Fig. 5 Fitting a regression line to $s_m - s$. The Y axis is expressed as common logarithmic scale instead of natural log scale for convenience of plotting



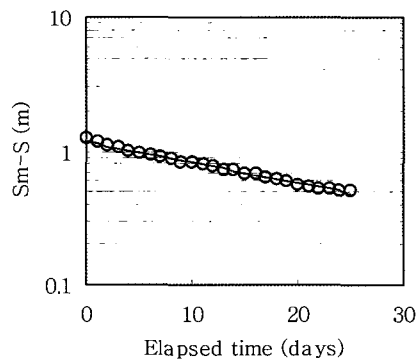
(g) Kyungju Sanae ($y=0.65 e^{-0.108t}$)



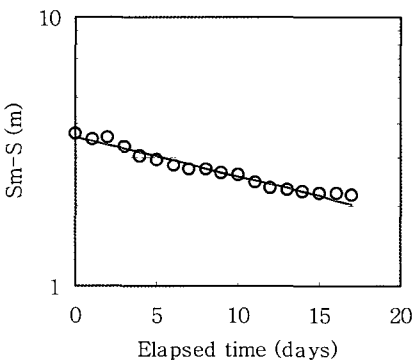
(h) Kimhae Samjung ($y=0.67 e^{-0.043t}$)



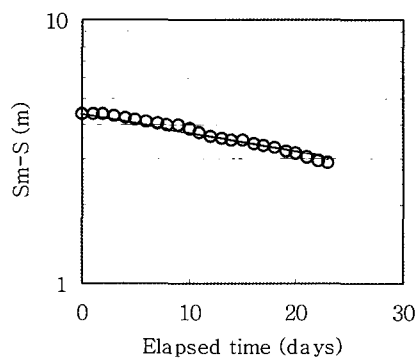
(i) Sangju Seomun ($y=1.79 e^{-0.021t}$)



(j) Andong Taehwa ($y=1.281 e^{-0.035t}$)



(k) Uiryung Bongsu ($y=3.72 e^{-0.034t}$)



(l) Taebaek Hwangji ($y=4.45 e^{-0.017t}$)

Fig. 5 Continued.

Table 3. Estimates of recharge ratio obtained from waterlevel data of national groundwater monitoring stations.

GMS ^a	s_m	k	s_{30}	α_m	GMS	s_m	k	s_{30}	α_m
Kongju Banpo	7.89	0.033	4.958	0.128	Kyungju Sannae	0.65	0.108	0.625	0.196
Kongju Sinpoong	2.34	0.130	2.293	0.200	Kyungju Chonbook	2.18	0.189	2.172	0.203
Goesan Jeungpyung	1.53	0.025	0.807	0.107	Goryung Goryung	1.92	0.106	1.840	0.195
Kumsan Boksu	2.44	0.068	2.123	0.177	Gosung Georyu	6.64	0.016	2.531	0.078
Nonsan Sangwol	2.01	0.018	0.839	0.085	Gumi Wonpyung	1.29	0.070	1.132	0.179
Daejon Munpyung	2.29	0.026	1.240	0.110	Kunwi Uihong	2.09	0.030	1.240	0.121
Daejon Taepyung	2.01	0.060	1.678	0.170	Kimhae Samjung	0.67	0.043	0.486	0.148
Boun Boun	1.25	0.040	0.874	0.142	Daegu Daebong	4.58	0.012	1.385	0.062
Buyeo Gyuam	3.98	0.023	1.984	0.102	Daegu Bisan	2.23	0.045	1.652	0.151
Buyeo Buyeo	8.65	0.099	8.206	0.193	Daegu Hyunpoong	4.17	0.242	4.167	0.204
Buyeo Yanghwa	1.88	0.674	1.880	0.204	Masan Jinjeon	4.23	0.025	2.232	0.107
Buyeo Oksan	2.59	0.028	1.472	0.116	Munhyung Nongam	1.83	0.075	1.637	0.182
Seosan Seoknam	4.78	0.008	1.020	0.043	Munhyung Munhyung	1.39	0.039	0.959	0.140
Asan Dogo	1.62	0.069	1.416	0.178	Milyang Gagok	0.94	0.364	0.940	0.204
Asan Duksan	1.75	0.025	0.923	0.107	Bonghwa Myungho	2.06	0.105	1.972	0.195
Yungdong Simcheon	4.41	0.151	4.362	0.201	Sangju Gongsung	1.12	0.088	1.040	0.189
Yungdong Yanggang	1.95	0.094	1.834	0.192	Sangju Seomun	1.79	0.021	0.837	0.095
Yeasan Duksan	1.75	0.025	0.923	0.107	Sungju Byukjin	1.23	0.097	1.163	0.193
Yeasan Yeasan	3.44	0.201	3.432	0.203	Andong Taehwa	1.28	0.035	0.832	0.132
Okcheon Gunbok	1.50	0.062	1.266	0.172	Yungduk Yunghae	1.30	0.027	0.722	0.113
Okcheon Iwon	0.99	0.020	0.447	0.092	Yungyang Ipam	2.14	0.103	2.043	0.194
Okcheon Cheongsung	1.40	0.111	1.350	0.196	Yungju Munjung	1.44	0.122	1.403	0.198
Eumsung Daeso	1.61	0.005	0.224	0.028	Yeacheon Yeacheon	1.59	0.342	1.590	0.204
Iksan Yongdong	1.97	0.014	0.676	0.070	Ulsan Beomseo	2.88	0.164	2.859	0.202
Jangsu Jangsu	0.77	0.214	0.769	0.203	Ulsan Sangbuk	1.18	0.046	0.883	0.152
Jincheon Jincheon	1.54	0.103	1.470	0.194	Ulsan Onyang	0.61	0.804	0.610	0.204
Cheongyang Jungsan	2.96	0.031	1.792	0.123	Uljin Onjung	1.39	0.067	1.204	0.176
Cheongwon Gaduk	1.72	0.020	0.776	0.092	Uiryung Bongsu	3.72	0.034	2.379	0.130
Cheongwon Gangne	4.56	0.008	0.973	0.043	Uisung Uisung	22.52	0.005	3.137	0.028
Cheongwon Bukil	2.49	0.203	2.484	0.203	Jinju Chojun	2.30	0.016	0.877	0.078
Cheongju Naeduk	1.08	0.044	0.791	0.149	Jinhae Jaeun	2.79	0.008	0.595	0.043
Taeon Wonbuk	2.77	0.178	2.757	0.203	Changnyung Sungsan	2.53	0.001	0.075	0.006
Taeon Taeon	2.20	0.014	0.754	0.070	Changnyung Yungsan	23.75	0.002	1.383	0.012
Hongsung Hongsung	1.72	0.022	0.831	0.098	Cheongsong Pacheon	2.28	0.056	1.855	0.166
Geoje Sinhyun	1.47	0.194	1.466	0.203	Taebaek Hwangji	4.45	0.017	1.778	0.081
Geochang Geochang	1.74	0.061	1.461	0.171	Tongyung Yongnam	2.92	0.010	0.757	0.053
Kyungsan Kyungsan	4.47	0.030	2.653	0.121	Pohang Singwang	11.46	0.010	2.970	0.053

^aName of groundwater monitoring station of KOWACO^bMean of recharge ratios for $\delta=0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009$ and 0.01

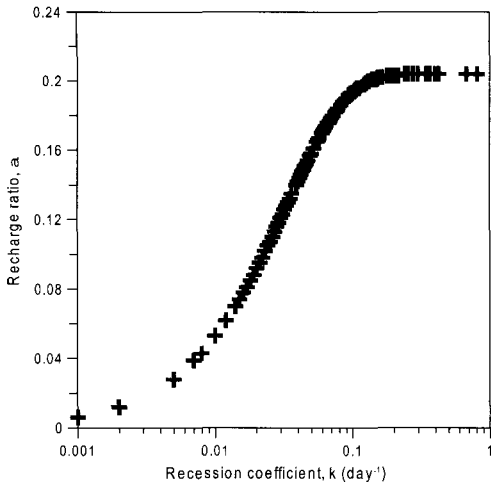


Fig. 6. Relationship between groundwater level recession coefficient and recharge ratio.

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2)$$

여기서 $SSE = \sum [(s_m - s) - s_m e^{-kt}]^2$,

$SST = \sum (s_m e^{-kt})^2 - \frac{(\sum s_m e^{-kt})^2}{n}$, 그리고 n

은 계산에 사용된 자료의 수이다.

위의 식에 따라 계산한 결정계수의 분포는 Fig. 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 계산한 151개의 관측소 중에서 110개소가 0.99이상의 결정계수를 가지는 비교적 정확한 결과를 보여주고 있다. 그리고 0.95이상의 값을 보이는 것은 6개소를 제외한 145개소이다. 0.95미만에 해당하는 관측소중 최소값을 보이는 관측소는 횡성안흥 관측소로서 $r^2=0.8273$ 이다. Table 4는 결정계수가 0.95미만을 보이는 관측소를 정리한 것이다.

2) 계산에 활용할 수 있는 $s_m - s$ 의 자료의 개수가 3개 이하인 경우

만약에 결정계수가 충분히 크다고 하여도 $s_m - s$ 에 가장 근접하는 $s_m e^{-kt}$ 가 적절하지 않을 수도 있다. 왜냐하면 계산에 사용된 $s_m - s$ 의 개수가 충분하지 않은 경우에도 오차가 작고 결정계수가 높을 수 있기 때문이다. 따라서 $s_m - s$ 의 자료의 개수가 3개 이하인 경우에는 수위강하량에 의한 함양량 계산결과에

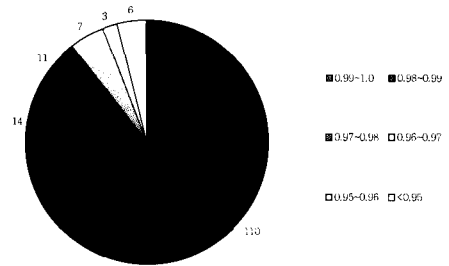


Fig. 7. Distribution of the determination coefficient (r^2).

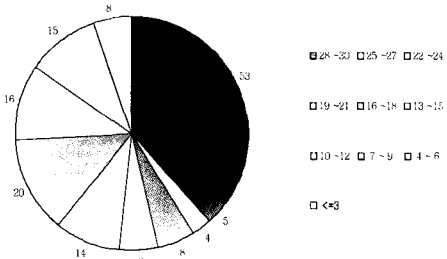


Fig. 8. Distribution of number of the $s_m - s$ data used for calculating recharge ratio.

신뢰성이 낮다. Fig. 8은 각 지하수 관측소에서 계산에 활용한 $s_m - s$ 자료 개수의 분포를 나타낸다.

Fig. 8에서 112개 관측소에서 $s_m - s$ 자료의 개수가 10개 이상을 가지고 있어 충분한 수위강하량의 자료를 제공하고 있다고 판단된다. 그러나 6개의 관측소에서는 3개 또는 2개의 $s_m - s$ 를 구할 수밖에 없기 때문에 계산된 함양율의 적합 여부를 판단하기 어렵다. 따라서 Table 5에 있는 $s_m - s$ 자료가 부족한 관측소는 수위강하량에 의한 함양율 산정결과에 신뢰성이 낮다.

결과적으로 Tables 4와 5에 제시된 부여부여, 태안 원복, 봉화명호, 울산범서, 함천합천, 횡성안흥, 부여양화, 청양정산, 청원가덕, 경주천북, 부산동대신, 예천예천, 포항신광, 영월상동 이상의 14개 관측소에서는 수위강하량을 이용한 지하수 함양량을 계산하는데 한계가 있다고 판단된다. 그러나 이들 결과는 본 연구에 사용된 2000년도 수위자료에만 해당하는 잠정적 판단이다.

Table 4. Groundwater monitoring stations whose determination coefficient (r^2) between $s_m - s$ and $s_m e^{-kt}$ is below 0.95.

GMS	Determination coefficient (r^2)
Buyeo Buyeo	0.9406
Taeon Wonbuk	0.9032
Bonghwa Myungho	0.9261
Ulsan Beomseo	0.9236
Hapcheon Hapcheon	0.9294
Hoengseong Anhung	0.8273

Table 5. Groundwater monitoring stations whose number of $s_m - s$ data is not exceeding 3.

GMS	No. of $s_m - s$ data	GMS	No. of $s_m - s$ data
Buyeo Yanghwa	3	Busan Dongdaesin	2
Cheongyang Jeongsan	3	Yeacheon Yeacheon	3
Cheongwon Gaduk	3	Pohang Singwang	3
Kyungju Cheonbuk	3	Yeongwol Sangdong	2

결 론

지하수위 강하곡선을 이용한 지하수 함양률 추정방법을 2000년도 국가 지하수 관측망 지하수위 자료에 적용한 결과 다음과 같은 결론 및 제언을 도출하였다.

1. 해당 국가 지하수관측소 주변 대수층에 대한 비산출 정보가 없을 경우 지하수위 강하곡선을 이용하여 지하수 함양율을 추정할 수 있으며 다수의 자료에 대해 반복적인 계산은 FOTRAN 프로그램으로 해결할 수 있다.

2. 2000년도 수위자료에 대해 적용한 결과 지하수 함양율은 0.006-0.204의 범위를 그리고 평균 0.14, 중앙값 0.151 및 변동계수 0.39를 보였다. 본 방법의 과학적 타당성에 대한 논의는 별도로 하고 단순히 추정값만 보았을 때에는 적절한 지하수 함양율로 사료된다.

3. 그러나 이 방법의 과학적 엄밀성 및 일반적 적용 가능성(예들 들어 s_{30} 의 사용 및 δ 값의 범위 등)에 대하여 본 단보를 포함하여 전혀 연구 혹은 논의된 바 없으며 또한 추정 지하수 함양율에 큰 영향을 미치는 δ 값의 독립적이고 신뢰할 만한 산정방법이 강구되어야

한다. 그러므로 다수의 지하수 함양률 추정방법이 가지고 있는 개별적 한계에도 불구하고 이 방법을 통한 추정 지하수 함양율을 신뢰성 있는 확정적 결과로 받아들이기는 어려울 것으로 사료된다.

4. 신뢰할만한 비산출물 정보가 있다면 이를 이용한 지하수 함양률 추정결과와 지하수위 강하곡선을 통한 추정 함양율을 비교·검토할 필요가 있다.

사 사

본 단보를 위해 좋은 심사의견을 주신 한국지질자원연구원의 채병곤 박사님께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사, 1999, 지하수위 장기 관측자료를 활용한 함양량 산정기법 연구보고서, 건설교통부-한국수자원공사, 대전, GW-99-2, 165p.
- 고용권, 배대석, 김천수, 김경수, 정형재, 김성용, 2001, 환경동위원소를 이용한 여수지역 소유역에서의 지하수함양특성 고찰, 지하수도양환경, 6(3), 93-106.

구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, 지질학회지, 38(3), 407-420.

문상기, 우남철, 2001, 누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양률 추정 기법, 지하수도양환경, 6(1), 33-43.

문상기, 우남철, 이광식, 2002, 지하수위 유형과 유역별 지하수 함양률의 관련성 연구 : 국가 지하수 관측망 자료의 분석, 지하수도양환경, 7(3), 45-59.

박재성, 김경호, 전민우, 김지수, 1999, 소유역의 지하수함양률 추정기법, 지하수환경, 6(2), 76-86.

최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양률 산정방법 연구, 지하수환경, 5(2), 57-65.

Healy, R.W., Cook, P.G., 2002, Using groundwater levels to estimate recharge, Hydrogeology Journal, 10, 91-109.

Moon, S.K., Woo, N.C., Lee, K.S., 2004, Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge, Journal of Hydrology, 292(1-4), 198-209.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, Hydrogeology Journal, 10, 18-39.

Solomon, D.K., Sudicky, E.A., 1991, Tritium and helium-3 isotopic ratios for direct estimation of spatial variations in groundwater recharge, Water Resources Research, 27, 2309-2319.

투 고 일 2004년 8월 10일
 심 사 일 2004년 8월 14일
 심사완료일 2004년 9월 7일

김규범
 한국수자원공사 조사기획처 국가지하수정보센터
 306-711 대전시 대덕구 연축동 산6-2
 Tel: 042-629-3775
 E-mail: gbkim@kowaco.co.kr

이명재
 (주)지오그린21
 151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교 연
 구공원 본관 519호
 Tel: 02-875-9492
 Fax: 02-875-9498
 E-mail: yimj@geogreen21.com

김정우
 (주)지오그린21
 151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교 연
 구공원 본관 519호
 Tel: 02-875-9492
 Fax: 02-875-9498
 E-mail: jeoungwoo@empal.com

이진용
 (주)지오그린21
 151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교 연
 구공원 본관 520호
 Tel: 02-875-9491
 Fax: 02-875-9498
 E-mail: hydrolee@empal.com

이강근
 서울대학교 지구환경과학부
 151-747 서울시 관악구 신림동 산56-1
 Tel: 02-880-8161
 Fax: 02-874-7277
 E-mail: kkleee@snu.ac.kr