

장기 관측 지하수위 결측자료 보완

Interpolation of Missing Groundwater-Level Data at the National Groundwater Monitoring Wells

정상용 · 심병완 · 강동환 · 원종호* · 김규범*

부경대학교 환경지질과학과* 한국수자원공사 조사기획처
(e-mail: sychung@dolphin.pknu.ac.kr)

ABSTRACT

Long ranged groundwater-level data often have the missing intervals because of the trouble of monitoring systems at the national groundwater monitoring wells. Geostatistical methods are very useful for the supplement of the missing data. Ordinary kriging was applied for the interpolation of the missing groundwater-level data with a smooth sinusoidal variation. Conditional simulation was used for the reproduction of the missing data with high fluctuations. Two geostatistical methods produced the very accurate estimates at the missing intervals and reproduced their original variations. This fact is proved by the cross validation test and graphical method, respectively.

I. 서론

건설교통부와 한국수자원공사는 우리나라 지하수의 부존 및 유동특성과 수질변화를 파악하기 위하여 국가 지하수관측망을 1995년부터 운영·관리하고 있다. 그런데, 지하수위 장기관측자료는 관측기기의 이상으로 지하수위가 간헐적으로 측정되지 않는 경우가 발생한다. 측정이 되지 못한 결측자료는 장기관측자료의 연속성을 떨어뜨리기 때문에, 적절한 통계기법을 사용하여 보완될 필요가 있다(건설교통부·한국수자원공사, 1999). 지하수위 장기관측자료는 시계열자료로서 그 변화가 다양하고 또한 불규칙한 양상을 나타내기 때문에, 이 자료의 재현을 위해서는 지구통계학적인 기법이 필요하다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 지구통계학적인 기법은 크리깅(kriging)과 조건모사(conditional simulation)이다. 크리깅은 연속적인 자료의 변화가 비교적 완만한 경우에 합리적인 결측자료의 보완을 할 수 있으며, 조건모사는 연속적인 자료의 변화가 다양하고 불규칙한 경우에 오차가 적은 보완

을 할 수 있다(Journel and Huijbregts, 1978). 각 기법들의 이론과 특성은 다음과 같다.

II. 보완기법

1. 크리깅(Kriging)

크리깅은 최선의 선형불편 추정자(Best Linear Unbiased Estimator: BLUE)이며, 그 공식은

$$Z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (1)$$

여기서 Z_i 는 공간상에 분포하는 자료 값이고, λ_i 는 Z_i 에 배당되는 가중치(weight), Z_k^* 는 크리깅에 의한 추정치이다. 크리깅의 가중치는 추정치가 불편(unbiased)이고, 추정분산(estimation variance)이 최소가 되도록 결정되어야 한다. 즉, 크리깅의 불편조건은

$$E[Z_v - Z_k^*] = 0 \quad (2)$$

여기서 Z_v 는 미지의 참값이며, Z_k 는 추정치이다. 그리고 그 크리깅의 추정분산은

$$E\{[Z_v - Z_k^*]^2\} = E[Z_v^*] - 2E[Z_v Z_k^*] + E[Z_k^{*2}] \quad (3)$$

로서 최소가 되어야 한다.

2. 반베리오그램(Semivariogram)

크리깅에 의한 추정치의 결정을 위해서는 실험 자료들 간의 공분산(covariance)의 결정이 요구되는데 이는 실험 자료의 반베리오그램의 결정으로부터 얻어진다. 즉

$$C(h) = sill - \gamma(h) \quad (4)$$

여기서 $C(h)$ 는 거리 h 떨어진 자료들간의 공분산이고, $\gamma(h)$ 는 거리 h 떨어진 자료들간의 반베리오그램, sill은 일정한 범위(range)를 넘어서 반베리오그램간의 상관관계가 없어지는 안정된 상태의 반베리오그램 값이다. sill을 갖는 경우의 반베리오그램 모델은 수문지 질학적 자료분석에 많이 이용되고 있다. 이 경우에는 구상형모델(spherical model), 지수형 모델(exponential model), 가우시안모델(Gaussian model) 등이 있다.

3. 조건모사(Conditional simulation)

크리깅은 최선의 불편추정자(Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)이므로 그 추정치들의 공간적 분포는 변화가 적은 부드러운 곡선(smooth curve)을 이룬다. 따라서 지하수위 장기관측자료가 불규칙하고 변화가 심한 경우에 크리깅은 그 복잡성을 재현할 수 없고, 조건모사를 이용해서 지하수위 변동자료의 불규칙성을 만들어 낼 수 있다.

조건모사의 공식은 다음과 같다.

$$Z_{sc}^*(x) = Z_{ok}^*(x) + [Z_s(x) - Z_{sk}^*(x)] \quad (5)$$

여기서 $Z_{sc}^*(x)$ 는 점 x 에서의 조건모사에 의한 추정치이며, $Z_{ok}^*(x)$ 는 점 x 에서의 크리깅에 의한 추정치이고, $Z_s(x)$ 는 미지의 확률함수 $Z_o(x)$ 에 대한 비조건모사에 의한 추정치이고, $Z_{sk}^*(x)$ 는 $Z_s(x)$ 의 크리깅에 의한 추정치이다.

비조건모사(nonconditional simulation)에서는 Turning bands method(TBM)를 이용하여 비조건적 추정치(nonconditional realization)를 만들어낸다. TBM은 Matheron(1973)에 의해 개발되었으며, Journel(1974)에 의해 실제적인 문제에 이용되기 시작하였다. TBM의 특성은 다음 공식으로 표현된다.

$$Z_s(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N Z_i(x) \quad (6)$$

여기서 $Z_s(x)$ 는 고차원의 비조건모사이고, $Z_i(x)$ 는 1차원의 비조건모사, N 은 turning band line의 수이다.

4. 결측자료 보완

한국수자원공사에서 관리하고 있는 국가 지하수관측망의 지하수위 장기 관측자료의 유형은 사인곡선(sinusoidal curve)을 나타내는 것과 변화가 매우 불규칙한 peak를 나타내는 것, 그리고 사인곡선과 peak의 혼합형들로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 대표적인 사인곡선형의 충주 가금 관측소의 지하수위 자료와 peak 유형의 대구 비산 자료들에 대하여 결측된 부분을 크리깅과 조건모사를 이용하여 보완하였다.

Figure 1(a)와 (b)는 각각 충주 가금 관측소와 대구 비산 관측소의 지하수위 자료 중에서 결측 보완이 필요한 부분을 점선의 사각형으로 구분하여 나타내었다.

4.1. 통계분석

(1) 일반통계분석

충주 가금 관측소와 대구 비산 관측소의 총적층 및 암반층 지하수위 결측 보완 연구 대상 자료의 일반통계분석이 Table 1 과 Table 2 에 각각 정리되어 있다.

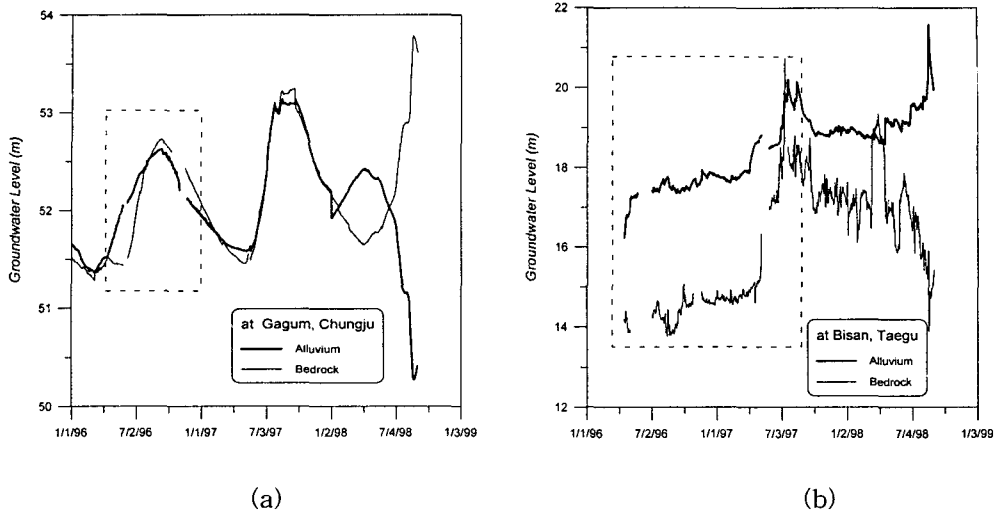


Figure 1. Missing intervals of groundwater level data at the national groundwater monitoring wells in (a) Gagum, Chungju and (b) Bisan, Taegu.

Table 1. General statistics of groundwater level data measured at Gagum, Chungju

Statistics	Alluvium	Bedrock
Number of Data	229	202
Mean	52.24	51.16
Median	52.32	52.29
Standard Deviation	0.30	0.47
Variance	0.09	0.22
Skewness	-0.56	-0.40
Kurtosis	2.27	1.58
Minimum	51.53	51.43
Maximum	52.63	52.73

Table 2. General statistics of groundwater level data measured at Bisan, Taegu

Statistics	Alluvium	Bedrock
Number of Data	383	409
Mean	17.77	15.32
Median	17.72	14.71
Standard Deviation	6.48	2.02
Variance	0.23	4.08
Skewness	0.50	-2.47
Kurtosis	3.97	24.26
Minimum	16.24	0.14
Maximum	19.31	20.74

(2) 베리오그램분석

지구통계기법을 적용하기 위해서는 먼저 표본자료의 베리오그램분석이 필요한데, 충주 가금 관측소와 대구 비산관측소의 결측자료 보완을 위한 표본자료의 베리오그램분석 결과가 Table 3과 Table 4에 각각 있다.

Table 3. Variogram parameters of groundwater level data measured at at Gagum, Chungju

parameter model	Nugget		Sill		Range	
	Alluvium	Bed rock	Alluvium	Bed rock	Alluvium	Bed rock
Exponential	0	0	0.11607	0.3749	38.158	61.278
Spherical	0	0	0.12178	0.35504	12.044	134.82

Table 4. Variogram parameters of groundwater level data measured at Bisan, Taegu

parameter model	Nugget		Sill		Range	
	Alluvium	Bed rock	Alluvium	Bed rock	Alluvium	Bed rock
Exponential	0	1.35	0.4	6.45	200	325

4.2. 충주 가금 관측소 지하수위 결측 보완 및 검증

충주 가금 관측소의 장기 지하수위 결측자료를 보완하기 위하여 정규 크리깅을 이용하였다. 크리깅을 이용하여 보완된 충적층의 결측자료 분포는 Figure 2(a)에 있으며, 암반층의 결측자료 분포는 Figure 2(b)에 있다. 동 그림에서 보는 바와 같이 크리깅에 의해서 만들어진 지하수위는 표본 원시자료(original data)와 약간만의 오차를 갖고 거의 완벽하게 일치하고 있다. 크리깅에 의해 보완된 결측자료는 가는 점선으로 나타나 있다. 크리깅에 의해서 생산된 추정치들의 정밀성에 대한 검증을 위하여 교차타당성시험(cross validation test; Davis, 1987)을 실시하였다.

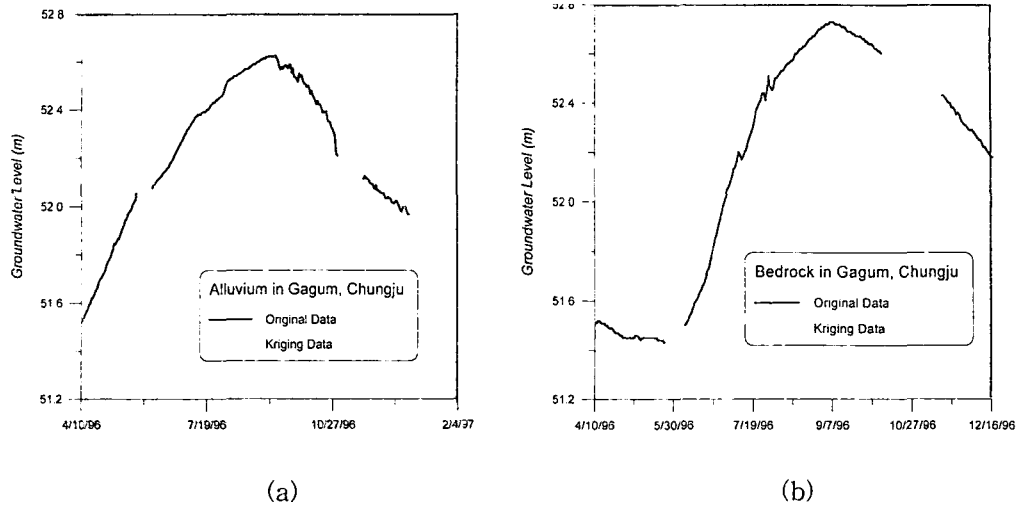


Figure 2. Interpolation of missing data using kriging for the monitoring wells of (a) alluvium and (b) bedrock in Gagum, Chungju.

(1) 교차타당성 시험

충주 가금 관측소의 크리깅 추정치에 대한 교차타당성 시험결과는 Table 5에 있다. 그리고 각 항목별 결과치는 거의 0에 가까우며, 감소오차의 표준편차는 0.1에 가깝다. 따라서 교차타당성 시험 결과 크리깅에 의한 추정치들은 그 정밀성이 검증되었다.

Table 5. The results of cross validation tests

Tests	Alluvium	Bed rock
Number of Data	229	202
ME	-0.720×10^{-4}	-0.105×10^{-3}
MSE	0.684×10^{-4}	0.541×10^{-4}
SRMSE	0.827×10^{-2}	0.736×10^{-2}
MKV	0.628×10^{-2}	0.630×10^{-2}
MRE	-0.406×10^{-3}	0.583×10^{-3}
VE	0.687×10^{-4}	0.544×10^{-4}
SDRE	0.104	0.0934

4.3. 대구 비산 관측소의 지하수위 결측 보완 및 검증

대구 비산 관측소의 장기 지하수위 결측자료를 보완하기 위하여 조건모사를 이용하였다. 증적층의 결측자료 보완은 Figure 3(a)에, 암반층의 결측자료 보완은 Figure 3(b)에 각각 나타나 있다. 조건모사에 의한 추정치들은 원래의 값들과 완전하게 일치하고 있으며, 결측

된 부분에서 보완된 자료는 지하수위의 복잡한 변화를 잘 반영하고 있다.

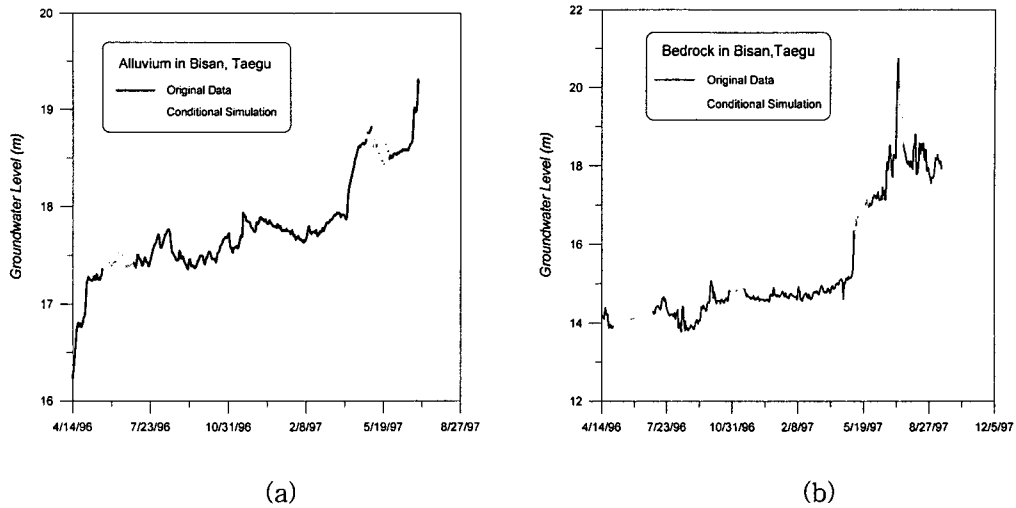


Figure 3. Interporation of missing data using conditional simulation for the monitoring wells of (a) Alluvium and (b) Bedrock in Bisan, Taegu.

(1) 그래프 검증

조건모사에 의한 추정치들의 정밀성을 검증하기 위하여 그래프 검증 방법을 이용하였다. 충적층 지하수위 추정치와 원시값(original values)들의 그래프는 Figure 4(a)에 있으며, 암반층 지하수위에 대해서는 Figure 4(b)에 각각 나타나 있다.

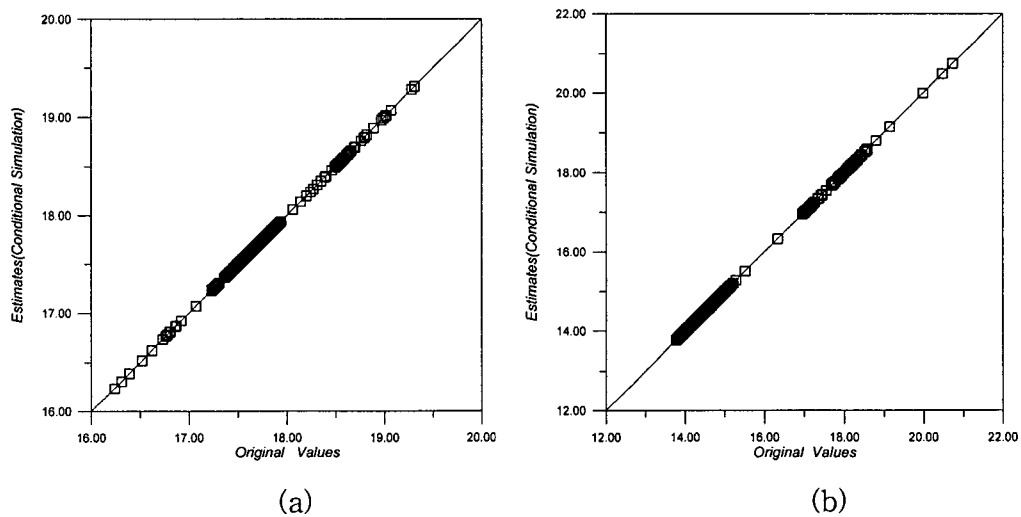


Figure 4. Graphical validation of estimates using conditional simulation versus original data for the monitoring wells of (a) alluvium, (b) bedrock in Bisan, Taegu.

추정치와 원시값들이 이루는 점들의 그래프는 모두 기울기가 1.0이고 원점을 통과하는 직선을 형성하였다. 즉,

$$Y = X$$

따라서 조건모사는 원시값들과 완전하게 일치하는 추정치들을 만들어 내었으며, 또한 지하수위의 복잡한 변동도 똑같이 재현할 수 있었다.

III. 결론

장기관측 지하수위 자료중에서 결측된 부분을 보완하기 위하여 크리깅과 조건모사의 지구통계기법이 이용되었다. 장기 지하수위 자료의 유형이 사인곡선(sinusoidal)을 나타내는 충주 가금관측소의 경우에는 정규크리깅을 적용하여 오차가 적은 결측자료를 만들었다. 장기 지하수위 자료의 유형이 peak를 이루며 변동이 심한 대구 비산관측소의 경우에는 조건모사를 이용하여 관측자료의 변동을 재현하면서 오차가 적은 결측자료들을 만들었다. 충주 가금관측소의 지하수위자료에는 교차타당성검증이 그리고 대구 비산관측소의 지하수위 자료에는 그래프 검증이 각각 실시되어 크리깅과 조건모사에 의한 추정치들은 오차가 아주 적다는 것이 입증되었다.

참 고 문 헌

건설교통부·한국수자원공사, 1999, 지하수위 장기관측자료를 활용한 함양량 산정기법 연구보고서.

Matheron, G., 1973, The Intrinsic Random Functions and their Applications, Advanced Applied Probability, Vol.5.

Journel, A.G., 1974, Geostatistics for Conditional Simulation of Ore Bodies, Economic Geology, Vol.69

Journel, A.G. and Ch.J. Huijbregts, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press.

Davis, B.M., 1987, Uses and Abuses of Cross-Validation in Geostatistics, Mathematical Geology, 19(3), p.241-248.