

지하수 함양량 추정시 공간상에서의 자료 Sampling 방법에 따른 Minimum Entropy Deconvolution의 적용성에 관한 검토

김태희^{1*} · 김용제¹ · 이강근²

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²서울대학교 지구환경과학부

The Applicability of Minimum Entropy Deconvolution Considering Spatial Distribution of Sampling Points

Tae-Hee Kim^{1*} · Yong-Je Kim¹ · Kang-Keun Lee²

¹Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

Kim and Lee (2005) suggested Minimum Entropy Deconvolution (MED) to estimate the temporal sequence of the relative recharge. However this study by Kim and Lee (2005) was just related to the verification of the conceptual approach with MED. In this study, we try to characterize the applicability of MED in the case of spatially heterogeneous recharge (distance from recharge area). Simulated results were recorded with some specific sampling points. Estimated results from this study show higher than 0.8 in cross-correlation with the original recharge sequence. In addition, the physical and mathematical meanings of the applied filter length was also investigated. It was revealed that the length of filter is highly related to the spatial distance between recharge area and the monitoring site, and the apparent shape of hydraulic head change.

Key word : MED, Sampling point, Distance from recharge area, Cross-correlation, Filter length

요 약 문

Kim and Lee(2005)는 기존의 지하수위 변동법과는 달리 지진학에서 관측된 지진파 자료로부터 진원에서의 최초 파형을 추정하기 위해 제안된 방법인 Minimum Entropy Deconvolution(MED) 방법을 이용하여 지하수 함양량의 시간적 변화의 추정 가능성을 검토하였다. 하지만, 이 연구는 MED 자체의 적용 가능성에 대한 검토만을 다루고 있을 뿐, 다양한 경우에 대한 고려는 사실상 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 함양지의 공간적 분포 및 함양지와 수위 관측지점 간의 공간적 분포에 따라 MED의 적용성이 어떻게 달라지는가를 살펴보고자 하였다. 이를 위해 전체 수치모의 영역의 일부에만 지하수 함양량을 적용하고, 함양지로부터 거리에 따라 수치모의 결과를 모니터링 하였다. 이 때 적용된 수리전도도 분포는 균질한 경우와, 수리전도도의 난수장의 경우 두가지를 적용하였다. 각각의 수치모의 결과에 MED를 적용하여 상대 지하수함양량의 시계열을 추정하고, 이 결과를 원래 가정한 지하수 함양량의 시계열과 상호상관성을 이용하여 비교하였다. 이 때 거의 모든 추정값은 원래 가정한 함양량의 시계열과 0.8 이상의 상호상관성을 보여 주었다. 이와 함께, 필터 길이의 물리적, 수학적 의미를 함께 살펴보았는데, 이를 통해 필터의 길이는 지하수위 변화의 걸보기 모양과 함양지로부터의 거리와 밀접히 관련되는 것을 확인하였다.

주제어 : MED, 수위관측지점, 함양지로부터의 거리, 상호상관성, 필터의 길이

*Corresponding author : katzura@kigam.re.kr

원고접수일 : 2005. 11. 10 게재승인일 : 2006. 6. 5

질의 및 토의 : 2006. 8. 31 까지

1. 서 론

지금까지 지하수함양량의 추정방법에 관한 연구는 매우 다양한 방법을 통해 이루어져 왔다(Scanlon, 2002). Scanlon(2002)은 이를 관측하고자 하는 장소에 따라 크게 네 가지 카테고리 분류하였는데, 첫 번째가 가장 고전적인 방법이라 할 수 있는 물수지 분석법을 위시한 수계 전체 규모에서의 물수지 균형법이며, 두 번째는 주로 지표에서의 변화를 중심으로 추정하는 방법이며, 세 번째는 불포화대에서, 네 번째는 포화대 하부에서 적용하는 방법이다. 이러한 분류를 그대로 받아들인다면, 본 연구에서 이용하고자 하는 방법은 네 번째 카테고리에 포함되는 방법으로, 흔히들 지하수위 변동법에 해당한다고 할 수 있다.

일반적으로 지하수위 변동법을 적용하는 경우 가장 크게 문제가 되는 것은 강수 혹은 함양에 의해 실제 지하수위의 변동폭이 얼마나 되느냐를 결정하는 문제이다. 즉, 지하수위의 하강 혹은 상승 경향이 존재할 때, 이를 어떻게 제거하느냐가 중요한 문제가 되는 것이다. 이에 대해 일부 연구자들(Scanlon et al., 2002)은 외삽법(extrapolation)을 이용하여 지하수위 변동 경향을 연장하고 이로부터 지하수위 변동폭을 결정하는 방법을 적용하였으나, 어떠한 모델을 통한 외삽법이 합리적인가에 대해서는 아직도 논란의 여지가 남아있다.

이와 관련하여 김태희(2001)와 Kim and Lee(2005)는 시간에 따른 동적인 변화라는 관점에서 상대함양량의 시계열적 추정에 관한 연구를 수행하였다. Kim and Lee(2005)는 Wiggins(1978)에 의해 최초로 제안되고, Carbrelli(1984)에 의해 수학적으로 보다 간소화된 D norm을 이용한 Minimum Entropy Deconvolution(MED)의 개념을 도입하여 지하수 함양량의 시계열적 추정 가능성을 검증하였다. 이 방법은 원래 지진학에서 지진파 진원의 최초 파형(source wavelet)을 추정하기 위한 방법으로 제안된 것으로, 일정한 시간 간격 내 존재하는 지진파의 최초 파형을 특별한 보정 없이 일괄적으로 추정할 수 있는 방법이다. 따라서 이러한 방법을 적용하여 지하수에 대한 함양량을 추정하고자 한다면, 앞서 언급한 지하수위 변동 경향의 보정에 대한 문제를 고려하지 않아도 된다는 장점이 있다. MED의 적용성을 평가하기 위하여 Kim and Lee(2005)는 일정한 지하수 함양량의 시계열을 발생시키고, 발생된 함양량을 이용하여 수치모델링을 수행한 후, 모델링을 통해 형성된 지하수위의 시계열 자료를 이용하여 MED를 적용, 지하수위의 상대함양량 추정의 효율성을 검증하였다. 하지만, Kim and Lee(2005)는 기본적인 개념

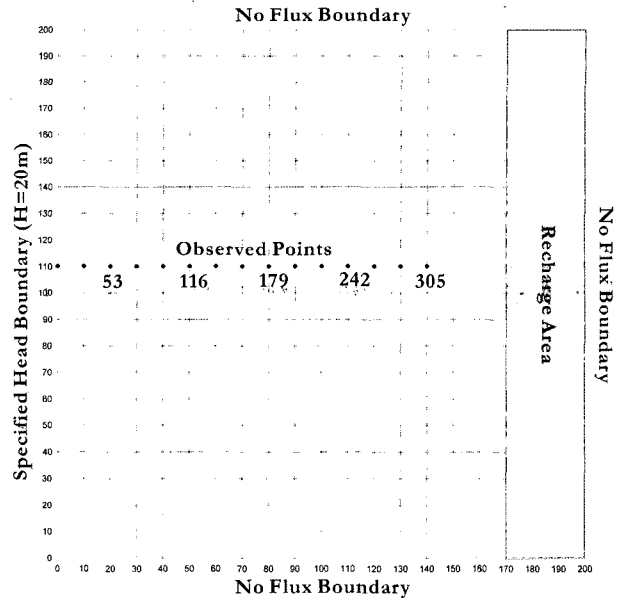


Fig. 1. Boundary Condition for Numerical Modeling.

에 대한 검증 연구를 수행하였을 뿐, 그 적용성의 한계나 실제 모니터링 자료에 적용 시 발생할 수 있는 공간적 분포의 문제나, 시간적 자료 채취 상의 문제 등에 대해서는 검토되지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 강수 패턴의 공간적 분포 문제에 따른 제안된 MED의 적용성을 검토하고자 하는 것이다

2. 연구방법

본 연구에서 Kim and Lee(2005)에서 제시된 MED의 적용성을 범용적으로 평가하기 위해 지하수 자료의 sampling 지점 및 함양지 간의 공간적 거리에 따라 적용 결과의 차이를 검토하기 위한 것이다. 그를 위해 우선 균질한 매질(Fig. 2(a))을 가정하고, 국부적으로만 함양이 될 때(Fig. 1) 모델링 영역 내에서의 수위 변화 양상에 대해 수치 모델링을 수행하였다. 그리고 동일한 개념 모델을 이용하여 불균질 매질(Fig. 2(b))에서의 적용성을 평가하였다. 2개의 경우 모두 Fig. 1에 나타난 바와 같이 총 14 개의 지점에서 시간에 따른 수위변화 양상을 기록하였다.

2.1. 수치모델링(Numerical Modeling)

본 연구에서 MED 적용성을 범용적으로 평가하기 위한 수치모델링을 위해 적용된 지배방정식은 Kim and Lee(2005)가 원론적인 적용성 평가를 위해 이용한 2차원 자유면 대수층에 대한 지배방정식, 즉 선형화된 Boussinesq

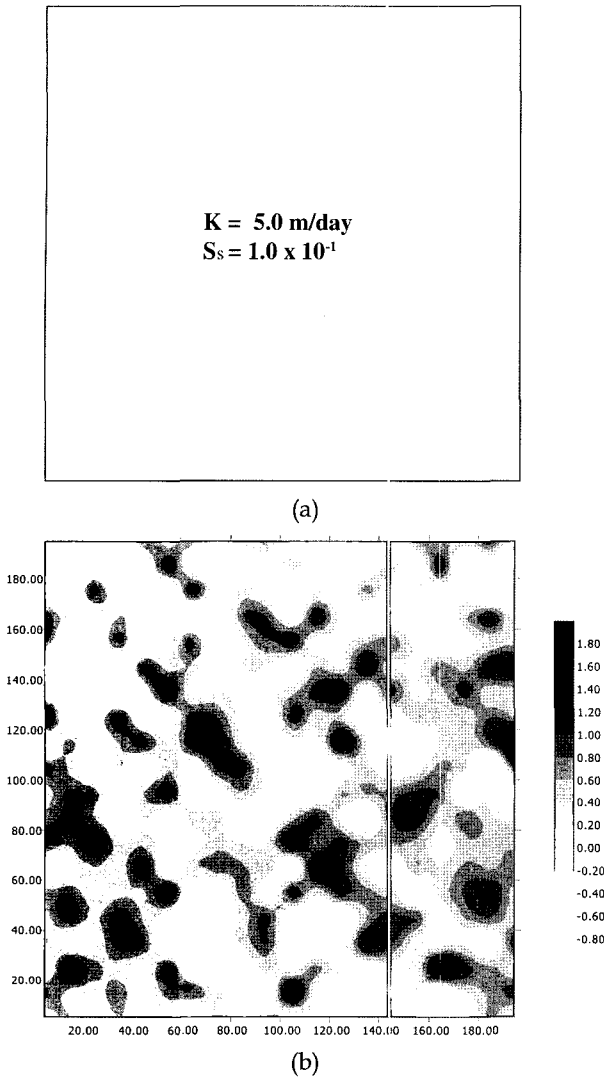


Fig. 2. The distribution of hydraulic conductivity : (a) homogeneous case, (b) random field.

방정식(Linearized Boussinesq equation)이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2q = \frac{S_y \partial v}{\sqrt{v} \partial t} \tag{1}$$

이때, K_x, K_y 는 각각 x-방향과 y-방향의 수리전도도(L/T)를 의미하며, $v = h^2$ (L^2), h 는 지하수위(L), S_y 는 비산출율(specific yield), q (L/T)는 지하수도의 함양량을 의미한다. \bar{v} (L^2)는 통상적으로 v 를 사용하는 것이 해석적으로 엄밀하나(Wang and Anderson, 1982) 수치 계산상의 편의를 위하여 Rai et al. (2006)이 적용한 가중평균의 개념을 이용하였다. 이 때, 주어진 식 (1)과 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 함양량에 따른 수위를 계산하였다.

앞서 언급한 바와 같이 MED의 범용적 적용성 평가를 위한 수치모델링은 두가지의 수리전도도 분포를 이용하였는데, 1) 균질한 경우, 2) 난수장의 경우가 그것이다. 이 때 각각의 경우에 할당된 수리전도도는 다음과 같다.

1) 균질한 경우(Homogeneous Case)

수리전도도 : 5.0 m/day
비산출율 : 0.1

2) 난수장(Random Field)의 경우

통계 모형 : 대수정규분포(lognormal distribution)
수리전도도의 평균값 : 3.0 m/day
대수값에 대한 분산(log10) : 0.4
상관 거리(correlation length : l) : 10 m
적용된 공분산 모형 : 구형 모형(spherical model)

$$C(r) = \begin{cases} 1 - \frac{r}{2l} - \frac{r^3}{2l^3} & 0 \leq r \leq l \\ 1 & r > l \end{cases}$$

비산출율 : 0.1

이와 함께, 함양지로부터 거리에 따라 모델링 영역의 중앙을 따라 총 15개의 지점을 관측점으로 하여 시간에 따른 수위변화를 기록하였다. 이 때 수치모델링에 적용된 함양량의 분포는 Fig. 3(a)와 같으며, 수치모델링 결과 관측된 수위의 변화는 Fig. 3(b), (c)에 제시된 바와 같다.

2.2. Minimum Entropy Deconvolution (MED)

본 연구에서 적용한 방법인 Minimum Entropy Deconvolution은 Cabrelli(1984)에 의해 제안된 D norm을 이용하는 방법으로, 우선 역산에 필요한 필터를 먼저 계산한 후, 관측값에 대해 필터를 적용해 최종적으로 구하고자 하는 상대 함양량의 시계열을 추정하는 방법이다(김태희, 2001; Kim and Lee, 2005). 임의의 시계열 y 에 대하여 D norm, $D(y)$ 는 다음과 같이 정의된다(Cabrelli, 1984; Kim and Lee, 2005).

$$D(y) = \max_{0 \leq i \leq m} (|y_i| / |y|) \tag{2}$$

이 때 $y = [y(t_0), y(t_1), \dots, y(t_m)]$ 는 최종적으로 추정된 지하수 함양량의 시계열을 의미한다. 이 때, D norm이 최대화되도록 하기 위하여 식을 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{y_i}{|y|^2} \mathbf{R} \cdot \mathbf{f} = \mathbf{h}^i \tag{3}$$

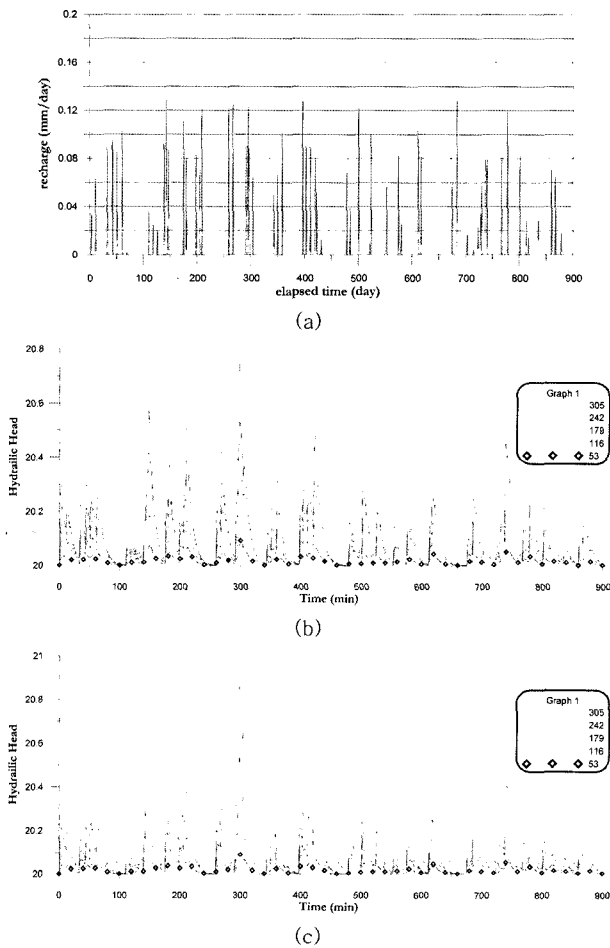


Fig. 3. Applied recharge sequence(a) and results of numerical modeling : (b) homogeneous, (b) random field of hydraulic conductivity.

이 때, \mathbf{R} 은 correlation matrix, $\mathbf{f} = [f_0, f_1, \dots, f_m]$ 는 m 의 길이를 가지는 filter, $\mathbf{h}^i = [h(t_0+i), h(t_1+i), \dots, h(t_m+i)]$ 로 관측 지하수위 값을 의미한다. 위의 식(3)을 풀면 최종적으로 적용할 수 있는 deconvolution filter, \mathbf{f} 를 구할 수 있다. 그리고 \mathbf{f} 를 구하면 다음 식(4)를 통해 최종적인 지하수의 상대함양량을 계산할 수 있다.

$$\mathbf{f} * \mathbf{h} = \mathbf{y} \quad (4)$$

여기서 $*$ 는 convolution 즉, $\mathbf{f} * \mathbf{h} = \int_0^N f(t-\tau)h(\tau)d\tau$ 을 의미한다.

3. MED 적용 결과

Fig 3(a)에 제시된 함양량을 적용하여 수치모델링한 결과로 나타난 지하수위 변동의 시계열에 MED 방법을 적

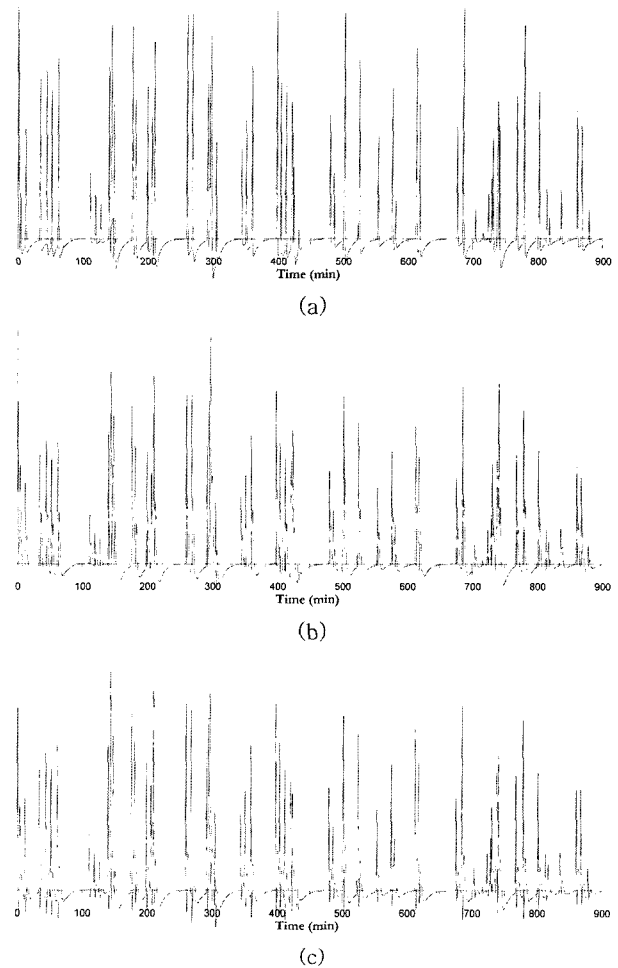


Fig. 4. Results of estimations with MED in homogeneous case : (a) 305, (b) 179, (c) 53.

용하여 상대 함양량의 시계열을 추정하고, 그 결과를 검토하였다. 이 때, 적용되는 필터(\mathbf{f})의 길이, m 은 trial-and-error 방법을 통하여 최적의 상관성을 보여주는 값으로 결정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 목적은 함양지로부터 지하수위 모니터링 지점의 공간적 분포 양상에 따른 MED의 적용성을 살펴보는 것으로 Fig. 1에 표시된 총 15개 지점의 수위변화 자료를 모두 이용하여 상대함양량의 시계열을 추정하고, 이를 수치모델링에서 적용한 함양량과 교차상관계수(cross-correlation)를 이용하여 그 타당성을 검토하였다. 앞서 언급한 두가지의 수리전도도 분포 모형 중 균질한 경우를 통해 함양지로부터 거리의 영향을 검토하였고, 난수장을 적용시킨 경우는 균질한 경우와의 실제적 차이점을 보기 위해 적용한 것이다.

상호상관계수를 이용하여 MED 적용결과의 타당성을 검토한 결과, Fig. 6에서 알 수 있듯이 어떤 경우이건 원

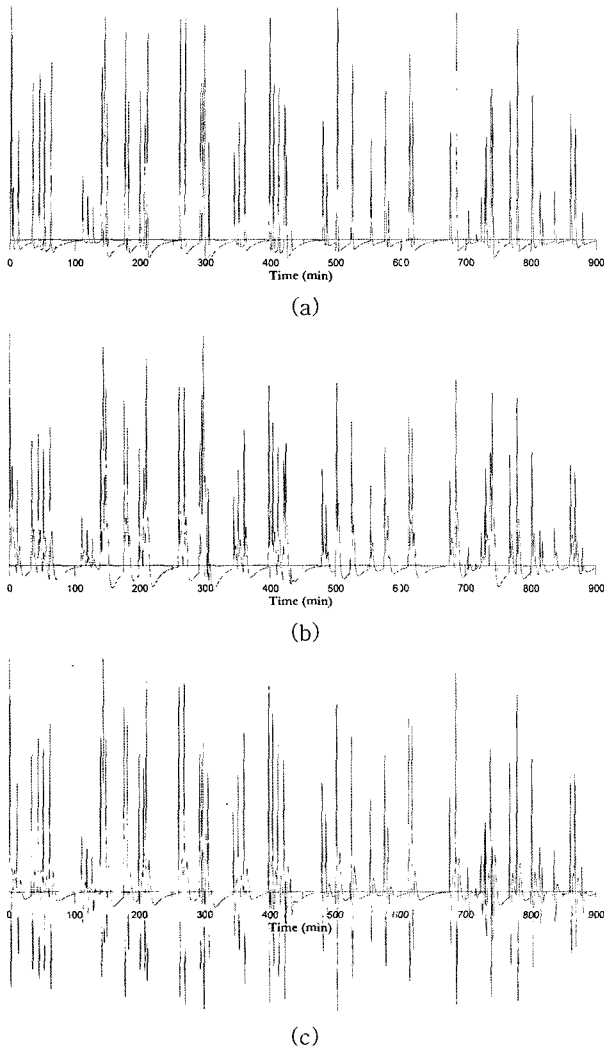


Fig. 5. Results of estimations with MED in random hydraulic conductivity field : (a) 305, (b) 179, (c) 53.

함양량의 시계열과 0.8 이상의 상호 상관성을 보여 줌을 확인할 수 있었다(난수장을 이용한 경우의 90 m 경우 제외). 난수장에서의 90 m 거리 지점에서의 상호상관성은 0.795). 통상적인 상호상관성의 통계적 의미를 고려하여 본다면, wavelet이라는 측면에서 80% 이상의 정확도를 가진다는 의미로 볼 수 있을 것이다. 균질한 경우와 난수장의 경우를 비교하면 전반적인 상호상관성은 균질한 경우가 50 m 거리 이내에서는 0.01~0.02의 차이를, 그리고 100 m 이상 원거리에서는 0.07~0.1 정도 큰 차이를 나타낸다.

함양지로부터 거리에 따라 MED 방법의 적용성 문제를 검토하기 위하여 균질한 수리전도도를 가지는 경우의 결과를 살펴보면 함양지로부터의 거리가 멀어짐에 따라 점

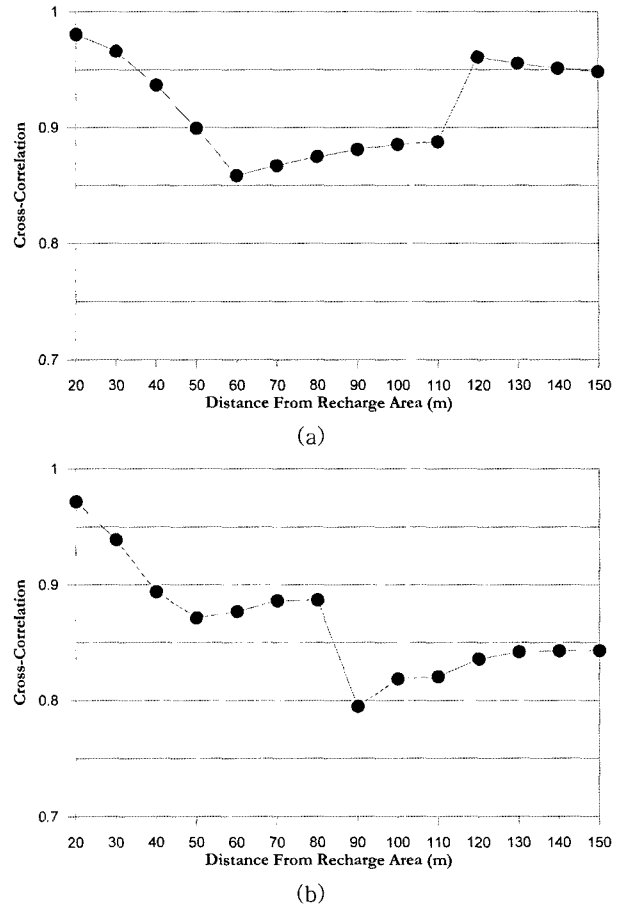


Fig. 6. Cross-correlation between the applied sequence of recharge and the estimated sequence of relative recharge.

차 원 함양량의 시계열과 상관성이 낮아지다가, 60 m 지점에서 가장 낮은 값(0.858)을 기록하고, 이후 서서히 상관성이 다시 높아지는 경향을 보인다. 이러한 경향은 수리전도도의 난수장을 적용한 경우 역시 마찬가지인데, 균질한 경우와의 차이점은 그 경향이 다소 불규칙하다는 것이다. 특히 90 m 지점에서 급격히 상관성이 낮아지는 현상이 나타나고 있다.

이와 함께, 각 지점에서 최대의 상관성을 보여주는 필터의 길이를 살펴보면, 균질한 매질의 경우 함양지로부터 거리가 50 m인 경우까지 2의 길이를 보이고, 이보다 먼 경우 4의 필터 길이를 나타내고 있는 점도 특이한 점이다 (Fig. 7(a)). 이러한 경향은 수리전도도의 난수장을 적용한 경우 역시 마찬가지이다. Fig. 7(b)를 살펴보면 함양지로부터 거리가 40 m인 지점까지 필터의 길이는 2이나, 이보다 멀어지게 되면 필터의 길이는 4로 나타나고 있음을 알 수 있다. 다만, 난수장의 경우 거리 90 m인 지점에서 필터의 길이가 6으로 나타나는 점은 특이한 점이다. 이러

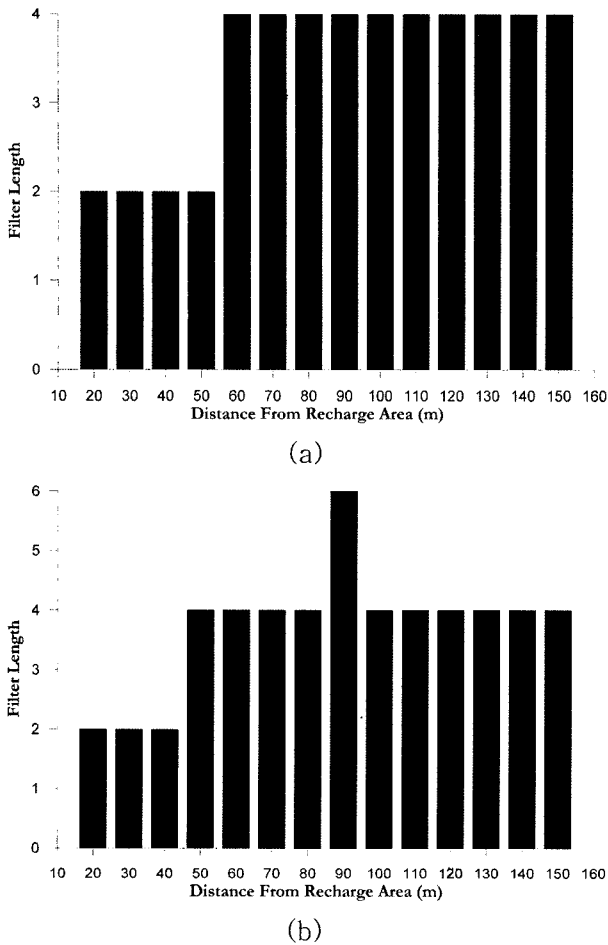


Fig. 7. Length of estimated filter : (a) homogeneous case, (b) random hydraulic conductivity field.

한 필터의 길이는 상호상관성이 감소하는 경향에서 증가하는 경향으로 전환하는 지점의 거리와 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 토 의

본 연구 결과에서 주목할 점은 필터의 길이 변화이다. Kim and Lee(2005)는 MED의 적용성을 검토하는 과정에서 최대의 상관성을 보여주는 필터의 길이는 모든 경우 2였다는 점은 함양 직후 상승했다가 서서히 감소하는 수위 변화의 경향이 수학적으로 지수적 감소(exponential decay) 양상을 의미한다는 점을 지적하였다. 이러한 관점에서 본다면, 함양지로부터 거리가 점차 멀어짐에 따라 상호상관성이 감소하게 되는 경향은 지하수위의 감소 경향이 점차 지수적 감소로 설명할 수 있는 패턴과 차이를 보이게 된다는 것을 의미하며, 이는 통상적인 지하수 유

동에서 함양에 의한 지하수위 변화의 1차원 해석해의 경향과도 매우 잘 부합한다고 할 수 있다. 따라서 일정 정도 거리 이상의 지점에서 지하수위 감소 경향을 지수적 감소가 아닌 다른 형태의 조합으로 설명되어야 할 현실적 필요성이 분명하게 제시될 수 있으며, 이러한 필요성은 필터 길이의 변화로 나타나게 되는 것이다. 그리고 필터의 길이가 4로 나타나는 50~60 m 지점으로부터 상호상관성이 다시 증가하는 경향을 보인다는 것은 4의 길이로 표현할 수 있는 수위의 변화 양상에 보다 유사하게 접근하고 있음을 의미한다고 할 수 있다.

5. 결 론

이상의 과정을 통해 공간 상에서 함양지의 분포와 지하수위 sampling 지점의 차이에 따른 MED 방법의 적용성에 대해 간략히 살펴보았다. 물론 추정 결과의 정확도에 대해 함양지로부터의 거리, 거리에 따른 수위 반응 양상, 그리고 최종 계산에 적용되는 필터의 길이에 의해 좌우되게 된다. 하지만, 이상의 2가지 개념 모델에서는 MED를 이용하여 추정된 함양량의 분포는 원 함양량의 분포와 0.8 이상의 상호 상관성을 가짐을 확인하였다.

사 사

본 연구는 건설기술기반구축사업의 연구비 지원(과제번호 05기반구축A03-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김태희, 2001, An alternative framework for analyzing hydraulic information of the groundwater flow system, PhD. Dissertation, Seoul National University.
- Carbrelli, A.C., 1984, Minimum entropy deconvolution and simplicity: a non iterative algorithm, *Geophysics*, **50**(3), 394-413.
- Rai, S.N., Manglik, A., and Singh, V.S., 2006, Water table fluctuation owing to time-varying recharge, pumping and leakage, *Journal of Hydrology*, **324**, 350-358.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., and Cook, P.G., 2002, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, *Hydrogeology Journal*, **10**(1), 18-39.
- Kim, T.H. and Lee, K.K., 2005, Estimation of relative recharge sequence to groundwater with minimum entropy deconvolution, *Journal of Hydrology*, **311**, 8-19.
- Wang, H.F. and Anderson, M.P., 1982, Introduction to Ground-

water Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods,
W.H. Freeman and Company, p. 87-88.

Wiggins, R.A., 1978, Minimum entropy deconvolution, *Geophysical Research Letters*, **5**, 21-35.