



## Estimation of delay time between precipitation and groundwater level in the middle mountain area of Pyoseon watershed in Jeju Island using moving average method and cross correlation coefficient

Shin, Mun-Ju<sup>a\*</sup> · Moon, Soo-Hyoung<sup>b</sup> · Koh, Gi-Won<sup>c</sup> · Moon, Duk-Chul<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Researcher, Water Resources Research Team, Jeju Province Development Corporation, Jeju, Korea

<sup>b</sup>Principal researcher, Water Resources Research Team, Jeju Province Development Corporation, Jeju, Korea

<sup>c</sup>Director, Research and Development Center, Jeju Province Development Corporation, Jeju, Korea

<sup>d</sup>Researcher, Water Resources Research Team, Jeju Province Development Corporation, Jeju, Korea

Paper number: 20-045

Received: 13 May 2020; Revised: 4 June 2020; Accepted: 4 June 2020

### Abstract

In order to provide information for proper management of groundwater resources, it is necessary to estimate the rise time of groundwater level by calculating the delay time between the time series of precipitation and groundwater level and to understand the characteristics of groundwater level variation. In this study, total delay time (TDT) and cross correlation coefficient between the moving averaged precipitation generated by using the moving average method to take into account the preceding precipitation and the groundwater level were calculated and analyzed for the nine groundwater level monitoring wells in the Pyoseon watershed in the southeast of Jeju Island. As a result, when the moving averaged precipitation was used, the correlation with the groundwater level was higher in all monitoring wells than in the case of using the raw precipitation, so that it was possible to more clearly estimate the delay time between precipitation and groundwater level. When using the moving averaged precipitation, it had cross correlation coefficients of up to 0.57 ~ 0.58 with the time series data of the groundwater level, and had a relatively high correlation when considering the preceding precipitation of about 24 days on average. The TDT was about 32 days on average, and it was confirmed that the consideration of preceding precipitation plays an important role in estimating the TDT because the days of moving averaged precipitation greatly influences the calculation of the TDT. In addition, through the use of moving averaged precipitation, we found an error in estimating the TDT due to the use of raw precipitation. Through the method of estimating the TDT used in this study and the use of the R code for estimating the TDT presented in the appendix of this paper, it will be possible to estimate the TDT for other regions in the future relatively easily.

**Keywords:** Delay time, Moving average method, Cross correlation coefficient, Hydromad, Pyoseon watershed in Jeju Island

## 이동평균법과 교차상관계수를 이용한 제주도 표선유역 중산간지역의 강수량과 지하수위 간의 지체시간 추정

신문주<sup>a\*</sup> · 문수형<sup>b</sup> · 고기원<sup>c</sup> · 문덕철<sup>d</sup>

<sup>a</sup>제주특별자치도개발공사 수자원연구팀 선임연구원, <sup>b</sup>제주특별자치도개발공사 수자원연구팀 수석연구원,

<sup>c</sup>제주특별자치도개발공사 품질연구본부 본부장, <sup>d</sup>제주특별자치도개발공사 수자원연구팀 선임연구원

### 요 지

지하수자원의 적절한 관리를 위한 정보제공을 위해서는 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 지체시간 계산을 통한 지하수위 상승시기 추정 및 지하수위 변동특성 파악이 필요하다. 본 연구에서는 제주도 남동쪽 표선유역 중산간지역에 위치한 9개 지하수위 관측점 지점을 대상으로 선행강수를 고려하기 위해 이동평균법을 활용하여 생성한 이동평균 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 간의 일단위 총 지체시간 및 교차상관계수를 계산하고 추정결과를 비교분석 하였다. 분석결과 이동평균 강수량 시계열자료를 사용시 원시 강수량 시계열자료를 사용한 경우보다 모든 관측점에서 지하수위 시계열자료와의 상관성이 증가함으로써 보다 명확한 강수량-지하수위 지체시간 추정이 가능하였다. 이동평균 강수량 시계열자료 사용시 지하수위 시계열자료와 최대 0.57~0.58 까지의 교차상관계수를 보였으며 평균적으로 약 24일의 선행강수를 고려할 경우 상대적으로 높은 상관성을 보였다. 총 지체시간은 평균적으로 약 32일 이었으며 이동평균 강수량이 총 지체시간 계산에 큰 영향을 미침으로써 선행강수의 고려가 총 지체시간 추정시 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다. 또한 이동평균 강수량 시계열자료 사용을 통해 원시 강수량 시계열자료 사용에 의한 총 지체시간 추정오류를 발견하였다. 본 연구에서 사용한 총 지체시간 추정방법과 본 논문의 부록에 제시된 총 지체시간 추정용 R 코드의 활용을 통해 향후 다른 지역에 대한 총 지체시간을 비교적 쉽게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 지체시간, 이동평균, 교차상관계수, Hydromad, 제주도 표선유역

\*Corresponding Author. Tel: +82-64-780-3751

E-mail: munjushin@jpdco.kr (M.-J. Shin)

## 1. 서론

제주도의 지질은 화산섬 특성상 투수성이 좋은 매질로 형성되어 있는 관계로 지하수 함양률이 높아 건철을 발달시켜 지표수의 개발을 어렵게 하며 지하수의 의존도를 높이는 원인이 된다(Kim *et al.*, 2014c; Kim *et al.*, 2018). 제주도의 지하수는 전체 수자원 이용량의 81%를 차지하는(JSSGP, 2018) 매우 중요한 수자원이기 때문에 현재 지하수자원의 적절한 관리와 기후변화에 따른 지하수량의 변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 제주도 지하수의 과학적 조사 분석 및 이해가 반드시 필요하다. 지하수자원 관리에 있어서 중요한 요소 중 하나는 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 지체시간 산정이다. 지체시간이란 지표에 도달한 강수가 지표하로 침투되어 침투나 우회흐름(bypass flow) 과정에 의해 비포화토양 및 지층을 통과하여 대수층에 도달하는데 걸리는 시간을 의미하며, 이는 대수층의 깊이와 지질구조의 수리학적 특성에 영향을 받는다(Chung *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2015). 따라서 대상지역의 강수량-지하수위 지체시간을 계산할 수 있다면 강수 발생시 지하수위 상승시기 추정 및 지하수위 변동특성 파악에 활용될 수 있으며 또한 지하수 관리에 활용할 수 있다.

강수량과 지하수위 간의 지체시간에 대한 다양한 연구가 수행되었는데, 대부분의 연구들은 원시 강수량 및 지하수위 시계열자료와 교차상관함수를 사용하여 최대 교차상관계수를 도출할 때의 시간 차이를 지체시간으로 추정하였으며, 전반적으로 지체시간은 짧고 강수량과 지하수위 간의 상관성은 낮다고 보고하였다. Moon and Woo (2001)는 충주, 진주 및 광주지역에 대한 강수량-지하수위 지체시간은 1~2일의 범위였으며 대부분의 경우 상관성이 낮았지만 비포화대의 두께가 얇은 지역에 강수량이 많은 계절의 경우에는 상관성이 높아진다고 보고하였다. Kim and Yum (2007)은 군집특성이 명확한 국가지하수관측망 84개소에 대해 분석한 결과 지체시간은 평균 1.4일이었으며 교차상관계수는 평균 0.393을 보여 상관성이 낮다고 보고하였으며, Yoon *et al.* (2015)은 경북 고령군 낙동강 수변 축적층에 대해 분석한 결과 지체시간은 2~3일의 범위를 보였고 교차상관계수는 0.20~0.21의 범위를 보여 상관성이 낮다고 보고하였다. 예외적인 경우로써 Jang *et al.* (2015)은 경기도 안성시 고삼저수지 하류 관개지역의 9개 관측정에 대해 시간단위 강수량 및 지하수위 자료를 이용하여 분석한 결과 지체시간이 24시간일 때 0.22~0.85(평균 0.59) 범위의 교차상관계수를 도출하여 상대적으로 높은 상관성을 보인다고 보고하였으나 이 지역은 지하수위가 최대 지하 2.5 m 이내로 얇게 형성된 관계로 강우가 지하수위 상승에 신속하게 영향을 미쳐 상관성이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

하지만 제주도의 경우는 화산섬의 두꺼운 비포화대층으로 인해(Kim *et al.*, 2015) 강수량과 지하수위 간의 지체시간은 비포화대층이 상대적으로 얇아 지체시간이 비교적 짧은 내륙 지역의 경우와 다르며, 해안가에서 한라산 방향으로 고도가 높아질수록 비포화대의 두께가 두꺼워져 지체시간이 증가하는 경향이 있다(Kim *et al.*, 2014a; Kim *et al.*, 2014b). 제주도에 대한 지체시간 연구로써 Choi *et al.* (2011)은 연구에 사용된 제주도의 113개 지하수 관측정 중 대부분(108개 관측정)은 지체시간이 50일 미만이었으며 104개 관측정은 교차상관계수가 0.25 미만으로 계산됨으로써 상관성이 낮다고 보고하였다. Park *et al.* (2011)은 태풍 “나리”의 강한 호우가 제주도의 지하수위 변동에 미치는 영향을 분석한 결과 지체시간은 평균 9.2일이었고 교차상관계수는 평균 0.47로써 예상외로 상관성이 높지 않다고 보고하였는데, 그 이유는 강우강도가 아무리 크더라도 지표하로 침투되는 수량은 일정한 한계가 있어(Kim *et al.*, 2013) 침투되지 못한 수량은 지표면 위를 통해 바다로 유출되기 때문인 것으로 판단된다. Song *et al.* (2013)은 제주도 82개 관측정에 대해 분석한 결과 지체시간은 0~20일, 교차상관계수는 0.04~0.58의 범위를 보였으며 지체시간과 교차상관계수의 평균은 각각 2.9일과 0.28로 보고함으로써 제주도 전체적으로 볼 때 상관성이 높지 않았다. 이처럼 제주도 지역에 대한 기존의 지체시간 산정결과는 비포화대 두께의 증가로 인해 내륙지역에 비해 증가하였으나 상관성은 여전히 낮은 것을 확인할 수 있는데 이것은 원시 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료간의 상관성을 분석하였기 때문으로 판단된다. 다시 말해 지하수위의 변동은 선행토양함수 즉 선행강수의 영향을 최종적으로 고려하지만 원시 강수량 시계열자료 자체에는 선행토양함수에 해당하는 선행강수를 고려할 수 없기 때문이다. 따라서 명확한 지체시간 산정을 위해서는 이동평균법을 활용하여 선행강수를 고려할 수 있는 강수량 시계열자료를 생성하고 지하수위 시계열자료와 교차상관함수를 사용하여 지체시간을 추정해야 할 것으로 판단된다. 이에 대한 선행연구로써 Yang and Kim (2011)은 이동평균법을 활용하여 10일에서 360일까지 10일 단위로 증가된(예로 10일, 20일 등) 이동평균 강수량 시계열자료를 생성하고 교차상관함수를 사용하여 전국 164개 지점에 대한 지체시간을 산정한 결과 제주도 위미 지점의 경우 지체시간은 90일, 교차상관계수는 0.71로서 비교적 높은 상관성을 도출하였다. 하지만 이 연구에서 사용된 이동평균일수의 단위는 상대적으로 크므로 따라서 보다 상세한 이동평균 강수량 시계열자료를 사용한 자세한 분석이 필요하다.

본 연구의 목적은 선행강수의 영향을 고려하기 위해 이동평균법을 활용하여 이동평균 강수량 시계열자료를 생성하고

교차상관함수를 활용하여 제주지역 강수량-지하수위 간의 보다 명확한 지체시간 추정 및 상관성 분석에 있다. 본 연구에 적용된 방법은 강수량 시계열 자료를 1일 단위로 이동평균하고, 최대 365일 까지 지하수위 시계열자료 지체에 대한 최대교차상관계수를 추정한다는 점과, 지하수위 상승구간만 추출하여 지체시간 추정 및 상관성 분석에 사용한다는 점에서 Yang and Kim (2011)이 적용한 방법과 차이점이 있다. 자세한 연구방법은 본 논문의 2.2절 및 2.3절에 기술하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 연구대상 지역 및 자료

연구대상지역은 제주도 남동쪽 표선유역의 중산간지역에 위치한 9개 지하수위 관측정 지점이며, 인근의 성판악 및 교래 강우관측소 일단위 강수량자료와 일단위 관측정 지하수위 자료를 사용하였다(Table 1). 기상청에서 운영중에 있는 (<http://www.weather.go.kr/>) 성판악 강우관측소(자동기상관측소; Automatic Weather Station) 자료와 제주도 재난안전대책본부(<http://bangjae.jeju119.go.kr/>)에서 운영중에 있는

교래 강우관측소 자료는 해당 웹사이트에서 제공하고 있으나 제주특별자치도개발공사에서 관측 및 관리하는 지하수위 자료는 공개적으로 제공되지 않는 자료이다. 대상지점의 강우관측소와 지하수위 관측정의 위치는 Fig. 1과 같이 모식도로 나타내었으며, 2개 강우관측소의 강수량과 관측정 지하수위는 각각 Figs. 2 and 3과 같이 도시하였다. Fig. 2에서 보면 성판악 강우관측소의 강수량이 교래 강우관측소의 강수량보다 큰 것을 확인할 수 있는데 이것은 성판악 강우관측소(El. 763 m, Fig. 1)가 교래 강우관측소(El. 400 m, Fig. 1)보다 고지대에 위치하고 있어 산지효과의 영향을 더 받아 강수량이 더 큰 것으로 판단된다. Fig. 3에서 보면 관측정 F부터 I까지의 지하수위 변동폭은 비슷한 반면 관측정 A부터 E까지의 지하수위 변동폭은 관측정마다 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데 관측정 A부터 E의 관측정마다 가지는 복잡한 지하지질의 차이가 지하수위의 차이에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그리고 관측정 A부터 E까지의 지하수위는 관측정 F부터 I까지의 지하수위보다 높는데, Shin *et al.*, (2020)의 연구에 의하면 교래 강우관측소에서 침투된 강수가 성판악 강우관측소 방향으로 흐를 가능성이 있다.

Table 1. Period of data for rainfall stations and monitoring wells

Classification	Station name	Data period	Remarks
Rainfall station	Seongpanak	1992. 01. 01. ~ 2019. 10. 31.	Precipitation (mm/d)
	Gyoraee	1992. 01. 01. ~ 2019. 10. 31.	
Monitoring well	A	2001. 02. 11. ~ 2019. 10. 31.	Groundwater level (m)
	B	2001. 02. 11. ~ 2019. 10. 31.	
	C	2001. 02. 11. ~ 2019. 10. 31.	
	D	2004. 10. 10. ~ 2019. 10. 31.	
	E	2004. 10. 10. ~ 2019. 10. 31.	
	F	2012. 03. 13. ~ 2019. 10. 31.	
	G	2012. 03. 17. ~ 2019. 10. 31.	
	H	2012. 03. 19. ~ 2019. 10. 31.	
	I	2012. 03. 14. ~ 2019. 10. 31.	

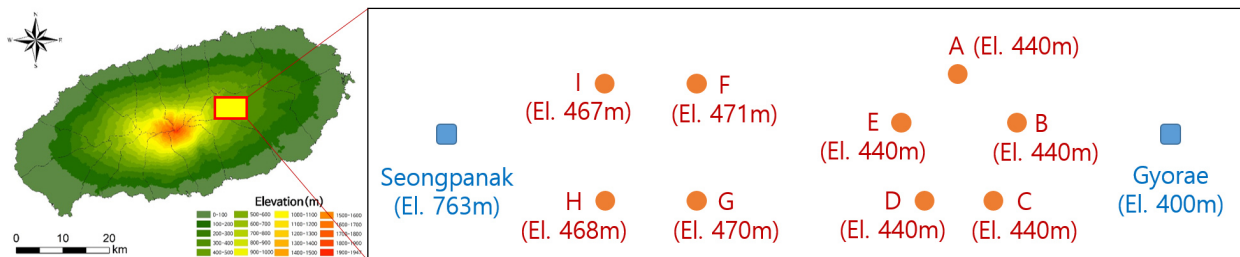


Fig. 1. Schematic diagram of positions of rainfall stations and monitoring wells

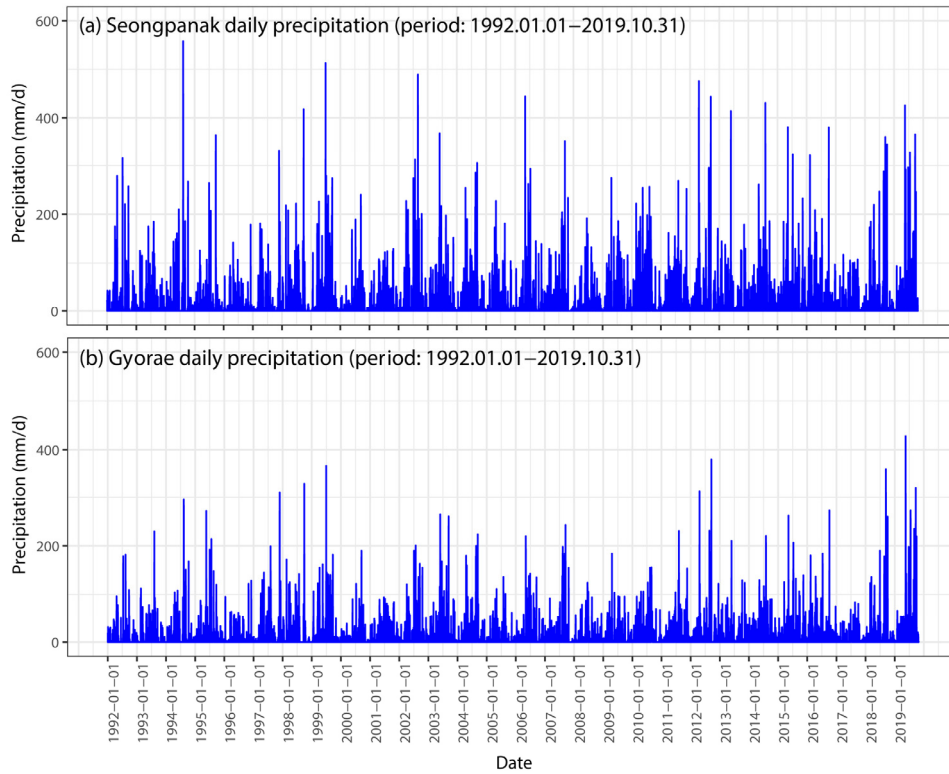


Fig. 2. Comparison of precipitation in Seongpanak and Gyorae rainfall stations

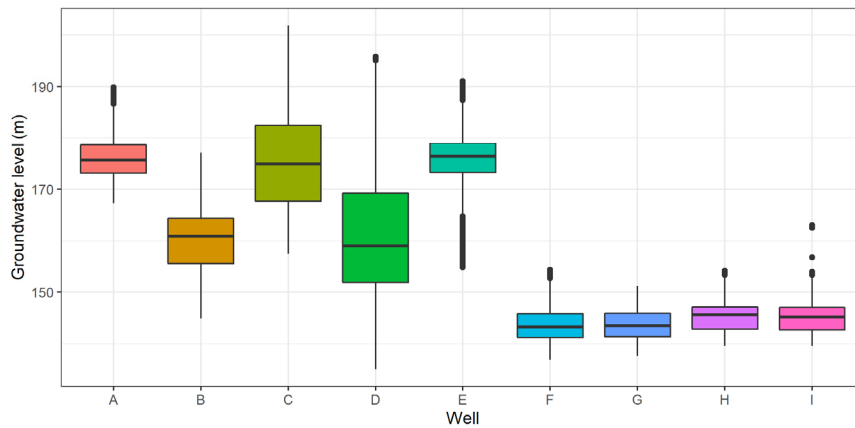


Fig. 3. Boxplot for variability of groundwater level in monitoring wells

**2.2 강수의 이동평균**

본 연구에서는 강수량과 지하수위 간의 지체시간 계산시 원시 강수량 시계열자료 뿐만 아니라 선행토양함수 즉 선행강수를 고려하기 위해 이동평균된 강수량 시계열자료를 사용하였다. 즉 3일 이동평균 강수량 시계열자료는 설정한 기준시점을 포함한 과거 3일간의 강수량을 합산한 후 3으로 나눈 값을 기준시점의 값으로 갖는 시계열자료이며 이것은 지하수위 시계열자료가 3일 이동평균 강수량 시계열자료와 높은 상관성

을 보인다면 2일 및 1일전의 강수량 자료를 선행토양함수로써 고려한다는 것을 의미한다. 강수가 짧은 시간내로 지표수위 상승에 영향을 미치는 것과 달리 지하수의 경우 강수는 침투 및 침투과정으로 인해 지하수위 상승에 영향을 미치기까지 오랜 시간이 소요되며, 선행강수 또한 침투되어 토양함수형태로 존재하다가 최종적으로 지하수위에 영향을 미치므로 강수량 시계열자료의 이동평균을 통해 선행토양함수를 고려한다는 가정은 타당하다. 이동평균 강수량 시계열자료 생성방

법으로써 일별 강수량 시계열자료를 2일부터 365일까지 각각 이동평균하여 총 364개의 이동평균된 강수량 시계열자료를 생성하였다. 따라서 본 연구는 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 지체시간 계산시 1일부터 364일 전까지의 선행도양함수를 고려하였다.

### 2.3 이동평균 강수량 시계열 자료와 교차상관계수를 이용한 지체시간 추정

강수량과 지하수위간의 지체시간을 추정하기 위해 앞에서 기술한 원시 및 이동평균된 강수량 시계열자료와 교차상관계수를 사용하였다. 교차상관계수는 독립된 두 변수간의 상관관계를 정량적으로 나타내는 계수로서 -1.0부터 +1.0까지의 범위를 갖으며, 상관성이 높을수록 교차상관계수가 0값으로부터 멀어지게 되고 0은 상관성이 없음을 나타낸다(Mendenhall and Sincich, 2007).

지체시간 추정방법으로써 원시 강수량 시계열자료와 364개의 이동평균된 강수량 시계열자료 각각을 원시 지하수위 시계열자료에 대해 교차상관함수를 적용하여 지체시간을 추정하였다. 교차상관함수 적용시 지하수위 시계열자료를 1일부터 365일까지 1일단위로 지체시키며 1개 셋(set)의 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료간의 365개의 교차상관계수를 계산하고 최대교차상관계수를 도출하는 지체시간을 추출하였다. 이 방법을 원시 및 이동평균 강수량 시계열자료를 포함하는 365개 셋의 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 각각에 반복적으로 적용하여 365개의 교차상관계수(365개 강수량 시계열자료 각각에 대한 최대교차상관계수)를 계산하고 이중 최대교차상관계수를 도출하는 지체시간 및 원시 또는 이동평균 강수량 시계열자료를 추출하였다. 따라서 한 개 지하수위 관측정에 대해 133,225회(365×365)의 교차상관계수를 계산하고 이중 최대교차상관계수를 도출하는 지체시간과 강수량 시계열자료를 추출하였다. 마지막으로 총 지체시간(일)은 최대교차상관계수를 도출하는 지체시간(일)과 이에 해당하는 강수량 시계열자료의 이동평균일수(이동평균 강수일)를 합한 값에 1일을 빼는 값으로 계산하였다. 예를 들어 3일 이동평균 강수량 시계열자료와 원시 지하수위 시계열자료가 최대교차상관계수를 도출하고 이때 지체시간(일)이 5일이라면 총 지체시간(일)은 지체시간 5일에 2일전부터의 선행강수를 고려한 2일(이동평균 강수일 3일 빼기 1일)을 더하여 7일이 된다. 따라서 이 방법은 선행강수에 의한 선행도양함수를 고려하여 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 지체시간을 계산한다.

본 연구에서는 대상지점 9개 관측정 지하수위 시계열자료 및 2개 강우관측소 강수량 시계열자료를 사용하므로 총 교차

상관계수 계산횟수는 2,398,050회(365×365×9×2)가 된다. 교차상관계수 계산횟수가 상당히 많으므로 R 언어를 활용하여 반복적으로 계산하였다(부록의 Box A1). Box A1에서 estimateDelay\_2 함수는 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 지체시간을 추정하는 함수로써 R언어기반 오픈소스 소프트웨어 패키지인 Hydrological Model Assessment and Development (Hydromad) (Andrews *et al.*, 2011)에서 제공하는 estimateDelay 함수를 본 연구에 맞게 수정한 코드이다. estimateDelay 함수의 특징은 지하수위 시계열자료 중 상승구간만 추출하여 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 지체시간을 계산한다는 점이다. 따라서 강수량이 지하수위 상승에 미치는 영향을 추정하기 위한 교차상관계수 계산시 지하수위 하강구간을 제외함으로써 보다 정확한 교차상관계수와 지체시간을 산정할 수 있다. Box A1에서 estimateDelay\_Proll 함수는 이동평균 강수량 시계열자료를 생성하고 원시 및 이동평균 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 간의 최대교차상관계수와 이에 해당하는 지체시간을 계산하기 위해 본 연구에서 개발한 함수이다. 따라서 estimateDelay\_Proll 함수는 Box A1에서 확인할 수 있듯이 estimateDelay\_2 함수와 연동되어 실행된다. Yang and Kim (2011)은 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 상관성 및 지체시간을 추정하기 위해 일단위 강수량 시계열자료를 10일, 20일 등 10일 단위로 360일까지 이동평균하고 각각의 경우에 대해 교차상관계수를 계산한 후 최대교차상관계수 및 이에 해당하는 이동평균일수를 추출하여 이 이동평균일수를 지체시간(일)으로 추정하였다. 본 연구는 (1) 일단위 원시 강수량 시계열자료를 2일부터 365일까지 1일 단위로 이동평균하고, (2) 각각의 원시 및 이동평균 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 간의 최대 365일의 지체에 대한 최대교차상관계수를 추정한다는 점과, (3) 지하수위 시계열자료 중 상승구간만 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 교차상관계수 및 지체시간 계산에 사용한다는 점에서 기존 연구와 차이점이 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 원시 및 이동평균 강수량과 지하수위 간의 지체시간 및 교차상관계수 추정

Tables 2 and 3은 각각 성판악과 교래 강우관측소의 원시 및 이동평균 강수량 시계열자료와 9개 관측정 지하수위 시계열자료 간의 교차상관계수 및 지체시간을 계산한 결과이다. Tables 2 and 3에서 Rainfall data type (2번째 열)의 Raw와 M. A.는 각각 원시와 이동평균 강수량 시계열자료를 의미하며,

**Table 2.** Delay time (day) and cross correlation coefficient between precipitation in Seongpanak rainfall station and groundwater level in monitoring wells

Name	Rainfall data type	Cross Correlation Coefficient	Rainfall M. A. day (s)	Delay time (day)	Total delay time (day)
A	Raw <sup>a</sup>	0.214	1	16	16
	M. A. <sup>b</sup>	0.586	31	8	38
B	Raw	0.061	1	28	28
	M. A.	0.114	34	7	40
C	Raw	0.303	1	8	8
	M. A.	0.481	8	6	13
D	Raw	0.277	1	8	8
	M. A.	0.564	10	4	13
E	Raw	0.144	1	18	18
	M. A.	0.401	29	7	35
F	Raw	0.178	1	15	15
	M. A.	0.464	20	9	28
G	Raw	0.159	1	20	20
	M. A.	0.386	20	9	28
H	Raw	0.216	1	16	16
	M. A.	0.530	19	8	26
I	Raw	0.202	1	32	32
	M. A.	0.243	24	10	33

<sup>a</sup>Raw means raw precipitation timeseries data<sup>b</sup>M. A. means moving averaged precipitation timeseries data**Table 3.** Delay time (day) and cross correlation coefficient between precipitation in Gyorae rainfall station and groundwater level in monitoring wells

Name	Rainfall data type	Cross Correlation Coefficient	Rainfall M. A. day (s)	Delay time (day)	Total delay time (day)
A	Raw <sup>a</sup>	0.205	1	13	13
	M. A. <sup>b</sup>	0.571	31	8	38
B	Raw	0.066	1	28	28
	M. A.	0.113	33	7	39
C	Raw	0.302	1	8	8
	M. A.	0.470	9	5	13
D	Raw	0.278	1	8	8
	M. A.	0.569	10	4	13
E	Raw	0.143	1	18	18
	M. A.	0.403	31	6	36
F	Raw	0.182	1	16	16
	M. A.	0.466	20	9	28
G	Raw	0.158	1	20	20
	M. A.	0.386	20	9	28
H	Raw	0.222	1	12	12
	M. A.	0.554	19	7	25
I	Raw	0.254	1	159	159
	M. A.	0.268	24	10	33

<sup>a</sup>Raw means raw precipitation timeseries data<sup>b</sup>M. A. means moving averaged precipitation timeseries data

이동평균 강수량 시계열자료를 사용시 원시 강수량 시계열자료를 사용한 경우보다 모든 관측점에서 교차상관계수가 증가하였다. 이것은 선행토양함수를 고려한 지체시간 추정이고 고려하지 않은 경우보다 타당하다는 것을 의미하며 또한 보다 명확한 강수량-지하수위 지체시간 추정이 가능하다는 것을 의미한다.

성판악 강우관측소의 경우(Table 2) 이동평균 강수량 시계열자료 사용시 9개 관측점 지하수위 시계열자료에 대한 교차상관계수의 범위는 0.114에서 최대 0.586이고 평균 0.419인 반면 원시 강수량 시계열자료 사용시 교차상관계수의 범위는 0.061에서 0.303이고 평균 0.195이었다. 따라서 이동평균 강수량 시계열자료 사용시 교차상관계수는 평균적으로 약 0.22만큼 개선되었다. 교래 강우관측소의 경우(Table 3) 이동평균 강수량 시계열자료 사용시 교차상관계수의 범위는 0.113에서 최대 0.571이고 평균 0.422인 반면 원시 강수량 시계열자료 사용시 교차상관계수의 범위는 0.066에서 0.302이고 평균 0.201이었다. 따라서 교래 강우관측소의 경우 또한 이동평균 강수량 시계열자료 사용시 교차상관계수는 평균적으로 약 0.22만큼 개선되었다. 종합하면 두 강우관측소의 경우 모두 교차상관계수가 평균적으로 약 0.22만큼 개선되었으며 최대 0.57~0.58까지 교차상관계수가 상승됨을 확인할 수 있었다.

9개 관측점에 대한 이동평균 강수일은 성판악 강우관측소의 경우(Table 2) 8일에서 34일의 범위를 보였으며 이동평균 강수일이 상대적으로 짧은 관측정 C(8일)와 D(10일)를 제외하면 이동평균 강수일의 평균은 약 25일이었다. 이것은 평균적으로 약 24일의 선행강수(선행토양함수)를 고려할 경우 강수량과 지하수위 시계열자료 간에 상대적으로 높은 상관성을 보인다는 것을 의미한다. 교래 강우관측소의 경우(Table 3) 또한 비슷한 결과를 도출하였는데 이동평균 강수일은 9일에서 33일의 범위를 보였으며 관측정 C(9일)와 D(10일)를 제외하면 이동평균 강수일의 평균은 약 25일이었다. 따라서 두 강우관측소의 경우 모두 2개 관측정(C와 D)을 제외하면 평균적으로 약 24일의 선행강수(선행토양함수)를 고려할 경우 강수량과 지하수위 시계열자료 간에 상대적으로 높은 상관성을 보였다. 그리고 이 두 강우관측소 결과 간의 약간의 차이는 강수량 패턴의 차이(Fig. 2)가 기인한 것으로 판단되며, 관측정 C와 D의 이동평균 강수일이 주변 관측정과 다른 이유는 복수의 제주도 화산활동에 의해 형성된 지층이 제각기 달라(Jo et al., 2014) 관측정들의 복잡한 지하지질구조의 차이가 선행강수가 지하수위에 도달하는 시간에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다.

이동평균 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 총 지체시

간(일)은 두 강우관측소가 비슷한 범위(성판악 강우관측소의 경우 13~40일, 교래 강우관측소의 경우 13~39일)를 보였으며 총 지체시간(일)이 상대적으로 짧은 관측정 C(13일)와 D(13일)를 제외하면 평균적으로 약 32일의 총 지체시간(일)을 보였다. 흥미로운 점은 추정된 총 지체시간(일)은 이동평균 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 간의 지체시간(일)(Tables 2 and 3의 5번째 열)보다 이동평균 강수일(Table 2 and 3의 4번째 열)로부터 더 영향을 받는다는 점이다. 예를 들어 Table 2의 관측정 C와 D의 이동평균 강수량 시계열자료(M. A.)에 대한 지체시간(일)은 각각 6일과 4일로써 다른 관측정의 결과와 큰 차이를 보이지 않았으나 이동평균 강수일은 각각 8일과 10일로써 다른 관측정의 결과와 차이가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 총 지체시간(일) 추정시 선행강수의 고려가 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

### 3.2 복수의 강우관측소 강수량과 지하수위 간의 지체시간 비교분석

Figs. 4 and 5는 각각 성판악과 교래 강우관측소 강수량 시계열자료와 9개 관측점 지하수위 시계열자료 간의 총 지체시간(일) 및 교차상관계수를 도시한 그림이다. Figs. 4 and 5에서 점 옆의 숫자는 총 지체시간(일)을 의미한다. 3.1절에서 분석한 바와 같이 성판악과 교래 강우관측소의 이동평균 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 간의 총 지체시간(일)은 비슷하였으며, 관측정 B, E, H에서 모두 1일의 차이를 보였고 나머지 관측정은 동일한 총 지체시간(일)을 보였다. 반면 이 2개 강우관측소의 원시 강수량 시계열자료를 사용한 경우 총 지체시간(일)은 관측정 A, F, H의 지하수위 시계열자료에 대해 각각 3일, 1일, 4일의 차이를 보임으로써 이동평균 강수량 시계열자료를 사용한 경우보다 다소 차이가 컸으며, 특히 교래 강우관측소에 대한 관측정 I의 경우 총 지체시간(일)은 159일을 보여 성판악 강우관측소의 경우(32일)와 매우 큰 차이를 보였다. 이 159일의 총 지체시간(일)은 주변 관측정의 총 지체시간(일)과 매우 큰 차이를 보인다는 점과 이동평균 강수량 시계열자료를 사용한 결과보다 교차상관계수가 낮다는 점을 종합적으로 고려할 때 추정오류일 가능성이 있다. 이것은 원시 강수량 시계열자료를 사용하여 총 지체시간(일)을 추정시 정확하지 못한 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미하며, 또한 이동평균 강수량 시계열자료를 사용한 총 지체시간(일) 추정결과를 활용하면 이러한 추정오류를 발견할 수 있다는 것을 의미한다.

특이사항으로써 Figs. 4 and 5에서 관측정 B와 I의 경우 이동평균 강수량 시계열자료 사용에 의한 교차상관계수 개선폭

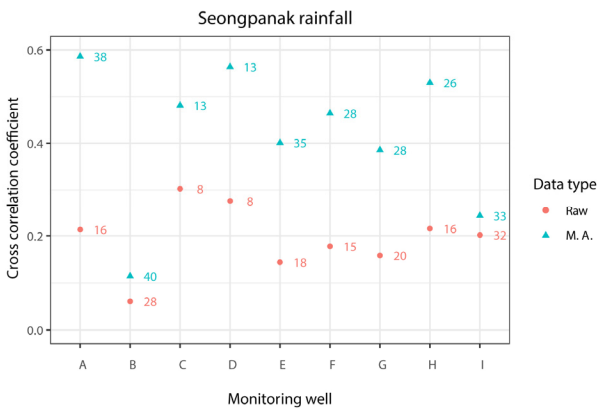


Fig. 4. Delay time (day; number next to dot) and cross correlation coefficient between raw and moving averaged precipitation timeseries in Seongpanak rainfall station and groundwater level timeseries in monitoring wells

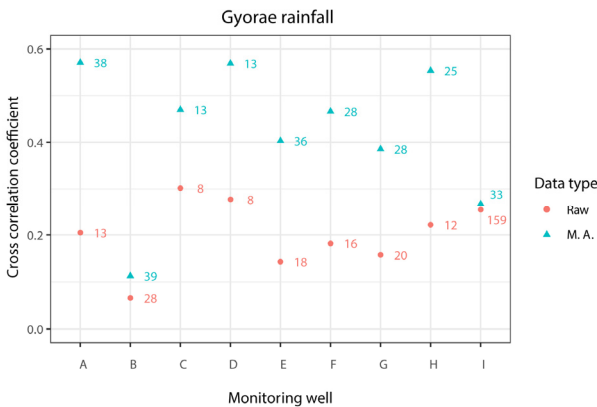


Fig. 5. Delay time (day; number next to dot) and cross correlation coefficient between raw and moving averaged precipitation timeseries in Gyoraerainfall station and groundwater level timeseries in monitoring wells

이 다른 관측정들의 경우에 비해 상대적으로 작으며 개선된 교차상관계수 또한 다른 관측정들의 경우에 비해 상대적으로 낮다. 이것은 관측정들의 지하지질의 차이로 인해 관측정 B와 I의 경우 지하수의 유동특성이 다른 관측정들과 차이가 있을 수 있다는 것을 의미하며 원인규명을 위한 추가적인 연구는 향후 추진할 예정이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 제주도 남동쪽 표선유역의 중산간지역에 위치한 9개 관측정 지하수위 시계열자료와 인근의 성판악 및 교래 강우관측소의 강수량 시계열자료를 이용하여 원시 및

이동평균 강수량 시계열자료와 지하수위 시계열자료 간의 교차상관계수 및 총 지체시간(일)을 계산하고 추정결과를 비교 분석 하였다. 분석결과 이동평균 강수량 시계열자료를 사용 시 원시 강수량 시계열자료를 사용한 경우보다 모든 관측정에서 교차상관계수가 증가하였는데, 이것은 선행강수(선행토양함수)를 고려한 지체시간 추정이 고려하지 않은 경우보다 타당하다는 것을 의미하며 또한 보다 명확한 강수량-지하수위 지체시간 추정이 가능하다는 것을 의미한다. 교차상관계수의 개선 폭은 두 강우관측소의 경우 모두 평균적으로 약 0.22이었으며 이동평균 강수량 시계열자료 사용시 최대 0.57~0.58까지의 교차상관계수를 도출하였다. 그리고 이동평균 강수일이 상대적으로 짧은 2개 관측정을 제외하면 평균적으로 약 24일의 선행강수(선행토양함수)를 고려할 경우 강수량과 지하수위 시계열자료 간에 상대적으로 높은 상관성을 가짐을 확인하였으며, 이 2개 관측정의 이동평균 강수일이 주변 관측정과 다른 이유는 관측정들의 복잡한 지하지질구조의 차이가 선행강수가 지하수위에 도달하는 시간에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. 이동평균 강수량과 지하수위 시계열자료 간의 총 지체시간(일)은 이 2개 관측정을 제외하면 평균적으로 약 32일 이었으며, 이동평균 강수일이 총 지체시간(일) 계산에 큰 영향을 미침으로써 총 지체시간(일) 추정시 선행강수의 고려가 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다. 마지막으로 원시 강수량 시계열자료 사용시 교래 강우관측소 강수량 시계열자료와 1개 관측정의 지하수위 시계열자료 간의 총 지체시간(일) 추정결과가 159일으로써 성판악 강우관측소 자료를 사용한 경우의 총 지체시간(일) 추정결과(32일)와 큰 차이를 보였고, 이동평균 강수량 시계열자료를 사용한 결과(33일)와도 매우 큰 차이를 보임과 동시에 교차상관계수 또한 이동평균 강수량 시계열자료를 사용한 경우보다 낮음으로 인해 이 결과는 추정오류로써 판단하였다. 따라서 원시 강수량 시계열자료 사용시 정확하지 못한 총 지체시간(일)을 추정할 가능성이 있으며 이동평균 강수량 시계열자료를 사용하면 이러한 추정오류를 발견할 수 있다. 또한 본 연구에서는 강수의 이동평균을 고려한 총 지체시간 추정을 위한 R 코드를 제시함으로써 연구자들이 본 연구의 방법을 상세히 이해할 수 있도록 하였다. 따라서 본 연구방법과 제시된 R 코드의 활용을 통해 향후 다른 지역에 대한 총 지체시간을 비교적 쉽게 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 제주도 해안 및 산간지역 전역에 대해 지체시간을 추정하고 지역별 지체시간의 변동성을 비교분석 함으로써 제주도의 수문지질 특성 분석에 활용할 수 있다.



## 감사의 글

본 연구논문의 위치도 수정에 도움을 주신 제주특별자치도개발공사 한희주 연구원님에게 감사드립니다.

## References

- Andrews, F.T., Croke, B.F., and Jakeman, A.J. (2011). "An open software environment for hydrological model assessment and development." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 26, No. 10, pp. 1171-1185.
- Choi, H.M., Lee, J.Y., Ha, K.C., and Kim, G.P. (2011). "The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 21, No. 4, pp. 337-348.
- Chung, I.M., Kim, N.W., and Lee, J.W. (2007). "Estimation of groundwater recharge by considering runoff process and groundwater level variation in watershed." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 12, No. 5, pp. 19-32.
- Jang, M.W., Park, K.W., Kim, S.J., and Bae, S.J. (2015). "Analysis of temporal and spatial changes in observed groundwater level in a paddy region." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 6, pp. 163-171.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) (2018). *Comprehensive water resources management plan in Jeju Island*. pp. 1-328.
- Jo, S.B., Jeon, B.C., Park, E.G., Choi, K.J., Song, S.H., and Kim, G.P. (2014). "Estimation of hydraulic characteristics and prediction of groundwater level in the eastern coastal aquifer of Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 661-672.
- Kim, G.B., and Yum, B.W. (2007). "Classification and characterization for water level time series of shallow wells at the national groundwater monitoring stations." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 12, No. 5, pp. 86-97.
- Kim, H.R., Oh, J.S., Do, H.K., Lee, K.J., Hyun, I.H., Oh, S.S., Kam, S.K., and Yun, S.T. (2018). "Spatial-temporal variations of nitrate levels in groundwater of Jeju Island, Korea: Evaluation of long-term (1993-2015) monitoring data." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 51, No. 1, pp. 15-26.
- Kim, N.W., Na, H.N., and Chung, I.M. (2014a). "Delay time estimation of recharge in the Hancheon watershed, Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 605-613.
- Kim, N.W., Na, H.N., Chung, I.M., and Kim, Y.J. (2014b). "Empirical formula of delay time for groundwater recharge in the representative watersheds, Jeju Island." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 743-752.
- Kim, N.W., Kim, Y.J., and Chung, I.M. (2014c). "Sensitivity analysis of hydrogeologic parameters by groundwater table fluctuation model in Jeju Island." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 1409-1420.
- Kim, S.G., Koo, M.H., and Chung, I.M. (2015). "Development of a transient groundwater flow model in Pyoseon watershed of Jeju Island: Use of a convolution method." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 4, pp. 481-494.
- Kim, Y.N., Chae, Y.S., and Lee, K.I. (2013). "Experimental study of down-scaled model slope on the variation of the ground water level of drainable soil nailing." *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-50.
- Mendenhall, W., and Sincich, T. (2007). *Statistics for engineering and the sciences*. Pearson Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.
- Moon, S.K., and Woo, N.C. (2001). "Estimation of groundwater recharge ratio using cumulative precipitation and water-level change." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 6, No. 1, pp. 33-43.
- Park, W.B., Kim, G.P., Lee, J.H., Moon, D.C., Kim, S.J., Koh, G.W., Pang, S.J., and Pang, I.C. (2011). "Variation of groundwater level and recharge volume in Jeju Island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 7, pp. 857-872.
- Shin, M.J., Moon, S.H., and Moon, D.C. (2020). "Analysis of groundwater level variability in the middle mountain area of Pyoseon watershed in Jeju Island using normalized standard deviation and cross correlation coefficient." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 53, No. 5, pp. 337-345.
- Song, S.H., Choi, K.J., and Kim, J.S. (2013). "Evaluation of regional characteristics using time-series data of groundwater level in Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 609-623.
- Yang, J.S., and Kim, N.K. (2011). "The correlation between the moving average of precipitation and groundwater level in Korea." *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 3B, pp. 265-276.
- Yoon, H.S., Park, E.G., Kim, G.B., Ha, K.C., Yoon, P.S., and Lee, S.H. (2015). "A method to filter out the effect of river stage fluctuations using time series model for forecasting groundwater level and its application to groundwater recharge estimation." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 20, No. 3, pp. 74-82.

## 부 록

### Box A1. R-based function for moving average of precipitation and estimating delay time

```

estimateDelay_2 <- function (DATA = data.frame(U = , Q = ), rises = TRUE, lag.max = hydromad.getOption("max.delay"),
  n.estimates = 1, negative.ok = FALSE, na.action = na.exclude,
  plot = FALSE, main = NULL, ...)
{
  DATA <- as.ts(DATA)
  DATA <- na.action(DATA)
  if (NROW(DATA) <= 1)
    return(NA_integer_)
  iQ <- 1
  if ("Q" %in% colnames(DATA)) {
    iQ <- which("Q" == colnames(DATA))[1]
  }
  Q <- DATA[, iQ]
  U <- DATA[, if (iQ == 1)
    2
  else 1]
  if (all(Q == 0, na.rm = TRUE))
    return(NA_integer_)
  ylab <- "CCF"
  do.rises <- rises
  if (do.rises) {
    rises <- function(x) {
      x[] <- c(0, pmax(diff(x), 0))
      x
    }
    Q <- rises(Q)
  }
  if (is.null(main)) {
    main <- "Cross-correlation"
    if (do.rises)
      main <- paste(main, "with rises only")
  }
  if (sum(complete.cases(Q, U)) == 0)
    return(NA_integer_)
  ans <- ccf(Q, U, lag.max = lag.max, na.action = na.action,
    plot = plot, main = main, ...)
  est <- ans$lag[order(ans$acf, decreasing = TRUE)]
  invalid <- is.na(est)

```

```

if (negative.ok == FALSE)
  invalid <- invalid | (est < 0)
est <- est[!invalid]
if (length(est) == 0)
  return(NA_integer_)
est <- est[seq(n.estimates)]
est <- est * frequency(Q)
est
CCvalue <- as.numeric(ans[est]$sacf)
result <- data.frame(est, CCvalue)
return(result)
}
estimateDelay_Proll <- function(dat, roll_P_seq, do_plot){
  delay_raw <- estimateDelay_2(dat, plot = do_plot, lag.max = 365)
  delay_raw$P_roll_step <- c(1)
  delay_roll <- c()
  for (i in seq(2, roll_P_seq, by = 1)) {
    roll_P <- rollmean(dat$P, k = i, align = "right")
    new_Q <- dat$Q[-c(1:c(i-1)),]
    new_dat <- cbind(roll_P, new_Q)
    delay_roll[[i]] <- estimateDelay_2(new_dat, plot = do_plot, lag.max = 365)
  }
  df_delay_roll <- do.call(rbind, delay_roll)
  df_delay_roll$P_roll_step <- as.numeric(seq(from=2, to=roll_P_seq))
  delay_roll_max <- df_delay_roll[which.max(df_delay_roll$CCvalue),]
  result <- rbind(delay_raw, delay_roll_max)
  return(result)
}

```