



# ICT 기반의 지하수위 실시간 분석에 의한 농업가뭄 평가 기술 개발

Development of assessment technology for agricultural drought using the analysis of real-time groundwater data



농림축산식품부



한국농어촌공사



## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “ICT 기반의 지하수위 실시간 분석에 의한 농업가뭄 평가 기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017년 12월

주관연구기관명 :

한국농어촌공사 농어촌연구원

연구 책임자 : 송 성 호

연 구 원 : 안 중 기

연 구 원 : 이 병 선

공동연구기관 : 공주대학교

연구 책임자 : 구 민 호





## 요 약 문

- 연구과제명: ICT 기반의 지하수위 실시간 분석에 의한 농업가뭄 평가 기술 개발
  
- 연구기간: 2017년 2월 ~ 2017년 12월 (총 1년)

### 1. 서론

#### 1.1 연구 목적

- 본 연구는 관측공별로 실시간 지하수위 관측자료를 이용한 농업가뭄 평가 기술 개발을 위하여, 다음과 같은 목적으로 수행되었다.
  - 1) 기존의 농업가뭄 평가 정밀도 향상 및 가뭄대처 능력 제고 방안 도출
  - 2) 농업용 지하수 관정을 이용한 지하수위 변동 특성이 반영된 새로운 가뭄 예·경보 기준 제시
  - 3) 농촌지하수관리 관측망 자료의 시계열 분석 결과를 이용하여 최근에 발생한 지역적인 가뭄에 따른 지하수위 하강 현상을 정량적으로 분석

#### 1.2 연구내용 및 방법

- 본 연구는 크게 5단계로 구분하여 수행되었다.
  - 1) 농업가뭄과 가뭄지수에서는 SPI와의 상관분석을 위한 기준으로 표준 지하수위지수(SGI)를 계산하여 이용하였다.
  - 2) 가뭄평가를 위한 지하수 관측망 활용 부분에서는 농촌지하수관리 관측망의 지하수위 장기 시계열 자료를 이용하여 농업가뭄의 시·공간적인 분포와 지하수위 변동 결과를 정량적으로 분석하였다.
  - 3) 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발 부분에서는 SPI와 지표수 수문 분석 자료와의 상관성 분석을 통한 누적기간(AP) 결과를 토대로 저수율 지표에 대한 지역별 최적 SPI를 결정하였으며, 지하수

공급 능력 평가 모델을 개발하여 농업가뭄 평가를 위한 지표수-지하수 연계 모델 기반을 구축하였다.

- 4) 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립 부분에서는 SGI와 SPI 상관분석을 통한 행정구역별 AP를 결정하였으며, SPI 분석 시 이용된 평균과 표준편차 각각 0과1의 표준정규분포에서 가뭄 단계별 정규분포(normal distribution)를 적용한 각 관측공별 지하수위 저하 한계치를 계산하였다. 이러한 결과를 이용하여 기존 농업가뭄 예·경보 인자와의 통합 운영 방안을 제시하였다.
- 5) 마지막으로 본 연구를 수행하면서 수집된 해외 사례를 분석하여, 향후 지하수위를 이용한 농업가뭄 예·경보 기준 수립에 활용 방안을 검토하였다.

## 2. 가뭄지수(표준지하수위지수, SGI)

- 표준지하수위지수(standardized groundwater level index, SGI)는 지하수위 시계열 자료의 표준화 및 지하수 가뭄의 특성화를 위한 새로운 지수로, 강수량의 시계열 자료를 이용한 표준화 지수인 SPI와 동일한 자료처리 과정을 갖는다.
- 계산방법은 평균과 표준편차가 각각 0과 1인 표준정규분포(standard normal distribution)를 이용하여, 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 중 연간 시계열 자료의 백분위(percentile) 자료를 이용한 지하수위 하강량 기준 정립에 활용토록 하였다.
- 지하수위는 강수량과 달리 특정한 기간 중의 자료를 누적할 필요가 없는 연속적인 변동자료로, SPI 계산처럼 감마분포를 이용한 정규화 과정을 거칠 필요가 없는 특징이 있다.
- 따라서, 관측공에서 측정되는 지하수위 시계열 자료를 적절한 정규화 과정을 거치는 경우 가뭄 기간 중의 지하수자원의 변동을 정량적으로 평가할 수 있다.

### 3. 가뭄 평가를 위한 지하수 관측망 활용

- 본 연구에서는 최근의 지속적인 가뭄의 영향을 분석하기 위하여 전체 관측공 중 2012년 이전까지 설치된 관측공 중 3년 이상의 관측자료가 축적된 총 74개소에 대한 최소 3년 월 평균 지하수위 대비 해당 월 평균 지하수위 차이를 분석하였다.
- 봄 가뭄이 심각했던 2014년의 전국적인 지하수위는 예년 평균 대비 0.13 m 하강하였으며, 도별로는 경기도가 0.34 m로 가장 큰 하강 폭을 나타낸 반면 경상남도의 경우에는 0.16 m 상승한 것으로 나타났다. 2015년은 예년 평균 대비 0.07 m 하강하였으며, 도별로는 경기도와 충청북도가 각각 0.30 m로 가장 큰 하강 폭을 나타낸 반면 경상남도의 경우에는 0.83 m 상승한 것으로 나타났다. 2016년은 예년 평균 대비 0.02 m 하강하였으며, 도별로는 가뭄이 심각했던 충청남도, 경상북도 및 경기도가 각각 0.53 m, 0.44 m 및 0.39 m로 큰 하강 폭을 나타낸 반면 전라북도, 전라남도 및 경상남도의 경우에는 각각 0.14 m, 0.04 m 및 1.52 m 상승한 것으로 나타났다.

### 4. 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발

#### 4.1 수문 관측자료의 시계열 분석

- 수문 관측자료에 대한 시계열 상관분석 결과 지하수는 지표수에 비하여 강수에 대한 반응기간이 매우 짧은 것으로 나타났다. 댐 및 저수지의 경우 비교적 긴 강수누적기간(9-11개월)의 SPI와의 상관도가 높게 나타났으며, 지하수의 경우 짧은 누적기간(1개월)의 SPI와 높은 상관도를 보였다.
- 이러한 분석 결과는 장기적인 가뭄 상황에서 지표수자원(댐과 저수지)의 저수량은 지속적으로 감소하지만, 지하수 부존량은 크게 감소하지 않고 유지되는 것을 의미한다.

#### 4.2 지하수 공급능력 평가 모델 개발

- 지하수 공급능력이라는 개념은 지표수자원이 부족한 가뭄 시기에 일시

적(3~4개월)으로 관정을 통해 공급할 수 있는 최대 취수가능량으로 정의하였다.

- 지하수 모델을 이용한 시뮬레이션 결과, 대수층의 지하수 공급능력은 관정의 허용 수위강하량, 관정의 갯수 및 배치 및 대수층의 수리특성에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났으며, 2015년과 같은 장기가뭄 시기에 평년과 유사한 값을 가지는 것으로 확인되었다. 지하수 공급능력은 공급 필요기간이 길어질수록, 허용 수위강하량이 작을수록 점차 감소하였으며, 관정 이격거리가 작을수록 간섭효과에 의해 지하수 공급능력이 감소하였다.
- 지하수 공급능력을 가뭄 평가에 반영할 경우, 농업용 저수지의 저수율에 주로 의존하는 기존의 평가방법에 비해 보다 실질적인 농업가뭄 평가 결과를 제공할 수 있다.

## 5. 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립

### 5.1 표준지하수위지수 기준

- 일별 SGI와 강수량의 시계열 자료를 분석하여 도시한 결과 전체적으로 강수량 변화에 따른 SGI 변화가 일치되며, 가뭄지역인 경기도 및 충청남도에 위치한 관측공들에서는 2015년의 경우 6~7월 기간의 강수량이 매우 적게 나타남에 따라 SGI가 낮게 분포하는 것으로 나타났다.
- 총 68개 관측공(경기 9개소, 강원 9개소, 충북 8개소, 충남 8개소, 전북 8개소, 전남 10개소, 경북 6개소, 경남 10개소)을 대상으로 1~12개월 기간 동안 매 1개월 단위로 SGI와 SPI의 상관분석을 수행한 결과, AP는 주로 1~3개월이 주를 이루고 있지만 7~10개월까지 큰 값을 갖는 관측공도 나타났다.
- 짧은 기간의 AP는 단기간의 가뭄에 반응하지만 이 기간 보다 긴 가뭄이 발생하는 경우에도 가뭄이 지하수계(groundwater system)에 미치는 영향이 거의 없다는 의미인 반면 상대적으로 장기간의 AP는 저수지와 같이 장기간의 가뭄에 영향을 받기 때문에 상대적으로 대수층의 지하수 보유 능력이 약한 것으로 해석될 수 있다.

## 5.2 지하수위 저하 한계치 기준

- 가뭄 단계별 지하수위 저하 한계치는 관측공별 장기 시계열 자료에 대한 백분위(percentile) 분석으로 결정하였는데, 이때 가뭄 단계는 SPI 분류에 의한 -2.0 이하(extreme drought), -1.5~-2.0(severe drought), -1.0~-1.5(moderate drought)에 대하여 각각 5.4% 이하, 12.95%, 24.20%로 구분하였다.
- 지하수위 저하 한계치는 2016년까지의 시계열 자료를 이용함에 따라, 자료 축적에 따라 지하수위 한계치는 지속적으로 바뀌게 된다. 따라서 농어촌 지하수넷(<https://www.groundwater-m.or.kr>)에 본 연구에서 제시된 분석 과정을 탑재하여 매년 update할 예정이다.
- 2017년 4월~7월 기간 동안에 지하수위가 각 관측공별 지하수위 한계치 이하를 나타내는 관측공은 경기도의 경우 4개소(광주1, 용인1, 평택1, 이천1 관측공)으로 나타났다. 또한 충청남도의 경우에는 8개소(공주1, 금산1, 논산1, 보령1, 부여1, 서천1, 청양1, 홍성1 관측공)에서 한계치 이하의 지하수위가 형성됨에 따라, 가뭄의 영향이 충남에 위치한 관측공들의 지하수위 하강에 직접적인 영향을 미친 것으로 나타났다.
- 충북의 일부 관측공인 보은1, 옥천1, 음성1, 진천1 관측공과, 전남의 무안2, 보성1, 영광1, 진도1 관측공의 지하수위 하강 현상이 나타났다. 특히 도서지방으로 가뭄이 극심하였던 진도군의 경우, 진도1 관측공의 지하수위 하강이 급격하게 나타남에 따라, 본 연구에서 적용한 방법이 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄의 평가에 적합한 것으로 판단된다.

## 5.3 기존 농업가뭄 예·경보 인자와의 통합 방안 제시

- 지하수위를 이용한 농업가뭄 분석을 위하여 기상관측소별 SPI와 저수지 저수율의 AP값과 SPI와 지하수위의 AP값을 적용하면, 공주지역의 경우 저수율의 AP가 9개월인데 반해 지하수위의 AP는 1개월 나타났다. 이는 저수지 저수율은 9개월 기간의 농업가뭄이 발생하면 영향을 받는 반면 공주1 관측공은 1개월의 농업가뭄의 영향을 받지만 그 이후 지속되는 가뭄의 영향에도 일정한 지하수위를 유지함에 따라 공급능력이 충분한 것으로 해석된다.
- 결과적으로 앞서 분석된 SPI와 저수율 및 표준지하수위지수(SGI)와 각

각 상관분석를 이용한 누적기간(AP)을 활용하는 경우 두 가지 주요한 기준의 통합이 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 결론

- 기상자료를 이용한 가뭄지표, 저수지 수위 변동을 이용한 가뭄 지표, 토양 수분을 이용한 가뭄 지표 등 다양한 가뭄 지표가 농업가뭄 예측을 위해 개발되고 사용되고 있다. 이 연구에서는 지하수위 변동을 이용한 가뭄 지표를 개발하여, 기존 가뭄지표와 포괄적인 해석을 통해 조금 더 농업 가뭄 해석을 정밀하게 하고자 연구를 수행하였다.
- 최근 가뭄이 심각했던 충남지역 14개소 관측공의 지하수위 변동과 SPI의 상관관계 분석 및 전국 68개 관측공 수위자료를 이용한 SGI 값과 SPI 값의 상관관계 분석을 실시한 결과, 공통적으로 AP가 1~3에서 상관관계가 높게 나타났다.
- 단기 개월수(1~3개월)에서 상관관계가 높게 나타난 것은, 1) 지하수위 변동 값을 이용하여 단기 가뭄을 분석할 수 있고, 2) 지하수계는 단기 가뭄에는 충격을 받을 수 있지만, 장기 가뭄에 대해서는 그다지 충격을 받지 않는다는 것을 의미한다.
- 이러한 과학적인 분석결과를 토대로 하여, 아래와 같은 결론을 얻었다.
  - 1) 지하수위 변동값을 이용한 농업가뭄 지표를 개발할 수 있었다. 현재의 단기 지하수위(30일 이동평균 지하수 수위)값을 이용하여 과거 기록 대비 현재의 단기 지하수위가 어느 구간에 위치하는지(하위 5.4%, 12.95%, 24.2% 등)를 비교함으로써, 상대적으로 현재가 가뭄당시 수위에 가까운지 아닌지를 판단할 수 있었다. 그리고 향후 최소 1개월여 동안 단기 지하수 수위 변동이 어느방향으로 이동할 것인지에 대한 추정으로 가뭄 예·경보가 가능함을 확인하였다.
  - 2) 지하수 공급능력 측면에서, 가뭄이 발생했을 경우 과거 평년의 지하수위와 비교했을 때 단기간(봄 가뭄 등) 충격을 받아 지하수위는 하강할 수 있어도, 그 폭은 상대적으로 크지 않았다. 실제로 평년 지하수위 대비, 가뭄이 극심했던 최근 3년간(2014~2016년) 지하수위를 비교해보면, 전국적으로 약  $-0.02\text{ m} \sim -0.13\text{ m}$  의 지하수위 하강을 보여,

지하수위 하강은 미미한 수준이었다. 모델을 이용한 시뮬레이션 결과에서도, 가뭄 시 지하수 공급능력은 평년 공급능력과 유사하였다. 이는 지하수위가 가뭄의 영향을 받아 단기간 미량(1 m 이내) 하강할 수는 있지만, 대수층의 지하수 공급능력에는 큰 변화를 일으키지 않는 것으로 판단된다.

- 결론적으로 지하수위 자료는 가뭄지표로서 활용이 가능하며, 특히 과거 누적수위 대비 현재 수위를 비교하는 경우 단기간(1~3개월 정도) 가뭄 예·경보에 활용성이 높을 것으로 판단된다. 또한 지하수계는 장기가뭄의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 분석됨에 따라, 가뭄 시에도 공급능력이 평시와 유사한 지하수 활용에 대한 정책적 방안 수립이 필요할 것으로 판단된다.

## Summary

Title: Development of agricultural drought evaluation technology based on ICT-based real-time analysis of groundwater level

Periods: 2017.02~2017.12

### 1. Introduction

#### 1.1 Research purposes

- This study was conducted to develop the agricultural drought evaluation technology using real-time groundwater level data from nationwide agricultural monitoring wells for the following purposes.
  - 1) To improve the precision of existing agricultural drought assessment and to establish the standards for coping with drought
  - 2) To suggest new drought forecast and alert criteria reflecting the characteristics of groundwater level change using agricultural groundwater monitoring wells
  - 3) Quantitative analysis of the groundwater descent phenomenon due to the recent local drought using the time series analysis results from agricultural groundwater monitoring wells

#### 1.2 Research contents and methods

- This study was divided into the following five stages.
  - 1) SGI(standardized groundwater level index) was calculated and used as a criterion for correlation with SPI(standardized precipitation index) in Chapter 2(the agricultural drought and drought index).
  - 2) The spatio-temporal distribution of agricultural drought and the groundwater fluctuation results were analyzed quantitatively using long-term time series data of groundwater level from agricultural groundwater monitoring wells in Chapter 3(Utilization of groundwater monitoring network for



drought evaluation).

- 3) The optimal SPI for the regional reservoir water rate index was determined based on the accumulation period(AP) from the correlation analysis between SPI and surface water hydrological data and the basis of surface water-groundwater linkage model considering the groundwater supply capacity was developed.
- 4) Accumulation periods in each monitoring well were determined by the SGI and SPI correlation analysis and the groundwater level lower limits were calculated from normal distribution curve with mean of 0 and standard deviation of 1 in Chapter 5(the establishment of agricultural drought evaluation criteria using the groundwater level factor). From these results, integrated management method of the existing agricultural drought forecast and alarm factors was suggested.
- 5) Finally, we examined the application methods for establishing the criteria for agricultural drought forecast and alarm using groundwater level in the future.

## 2. Drought index(standardized groundwater level index, SGI)

- SGI is a new index for the standardization of groundwater time-series data and the characterization of groundwater droughts. It has the same data processing procedure as SPI which is a standardization index using time-series data of precipitation.
- The calculation method is based on the percentile data of annual time-series data for making agricultural drought evaluation criteria using groundwater level factor using the standard normal distribution curve with mean of 0 and standard deviation of 1.
- The groundwater level is a continuous variable that does not need to accumulate data during a specific period of time and does not need to do a normalization process using a gamma distribution as in SPI calculations.
- Therefore, it is possible to quantitatively evaluate the fluctuation of

groundwater resources during drought period by normalizing the groundwater time-series data from agricultural groundwater monitoring wells.

### 3. Utilization of groundwater monitoring wells for drought assessment

- In order to analyze the effects of recent droughts on groundwater system, the groundwater level differences were analyzed for 74 agricultural groundwater monitoring wells installed before 2012.
- The groundwater level in 2014, when the spring drought was serious, decreased 0.13 m compared with the average value and the Gyeonggi-do showed the greatest decrease by 0.34 m. In 2015, the national groundwater level declined 0.07 m from the average and the Gyeonggi and Chungcheongbuk Provinces showed the greatest drop of 0.30 m, respectively. The groundwater level in 2016 declined by 0.02 m compared to the average and in Chungcheongnam-do, Gyeongsangbuk-do and Gyeonggi-do, where the drought was severe, the decline was as large as 0.53 m, 0.44 m and 0.39 m, respectively.

### 4. Development of agricultural drought evaluation model considering groundwater supply capacity

#### 4.1 Time-series analysis of hydrological data

- Time-series correlation analysis of hydrological data shows that groundwater level has a relatively shorter response period to precipitation than surface water. In the case of dams and reservoirs capacity variation, correlation with SPI of relatively long precipitation period(9-11 months) was high, and groundwater was highly correlated with SPI of short accumulation period(1-3 months).
- This result implies that the reservoir water reserves are constantly decreased in long-term drought conditions, while the groundwater resources are not reduced significantly.

#### 4.2 Development of groundwater supply capacity evaluation model

- The concept of groundwater supply capacity is defined as the maximum amount of water that can be supplied through groundwater well temporarily (3-4 months) during drought period when the surface water resources are insufficient.
- As a result of simulation using groundwater supply capacity evaluation model, the groundwater supply capacity of the aquifer greatly varies according to the allowable groundwater level drop of well, the number of wells and arrangement, and the hydraulic characteristics of the aquifer. Value. The groundwater supply capacity decreased gradually as the supply period became longer and the allowable groundwater level decreased, and the groundwater supply capacity decreased as interference distance decreased.
- Therefore, if the groundwater supply capacity is reflected in the drought evaluation, it can provide a more realistic agricultural drought evaluation result than the existing evaluation method, which mainly relies on the storage rate of the agricultural reservoir.

### 5. Establishment of agricultural drought criteria using groundwater level factor

#### 5.1 Standardized groundwater level index(SGI)

- SGI changes according to the change of precipitation as a whole from the result of analyzing daily SGI and precipitation data.
- As a result of correlation analysis between SGI and SPI from 68 monitoring wells and weather stations, AP showed mainly 1-3 months.
- Although short-term AP responds to short-term droughts, droughts longer than this period have little impact on the groundwater system.

#### 5.2 Groundwater level lower limits

- The drought stage was determined by the percentile analysis of long-term time-series data from agricultural groundwater monitoring wells. The

drought stage was classified as extreme drought(less than -2.0), severe drought(-1.5 to -2.0) and moderate drought(-1.0 to -1.5) by SPI classification to 5.4%, 12.95%, and 24.2%, respectively.

- The use of time-series data up to 2016 will result in a continual change in the groundwater thresholds as data are accumulated. Therefore, the analytical process proposed in this study will be installed in the homepage (<https://www.groundwater-m.or.kr>) and updated every year.

### 5.3 Present integrated plan with the existing agricultural drought forecast and alarm factor

- For the AP between the SPI-reservoir and the SPI-groundwater level, AP is 9 months for reservoirs in the Kongju area whereas the AP for the groundwater well is 1 month. These results indicate that the reservoir storage rate is affected by the 9 month period of agricultural drought, while the groundwater well is affected by the 1 month of agricultural drought. It is interpreted that the supply capability is sufficient because the groundwater level is kept constant even though drought continues.
- As a result, it can be concluded that the two main criteria can be integrated with the SPI and AP using correlation analysis between reservoir storage rate and SGI to SPI.

## 6. Conclusions

- Various drought indicators using weather data, reservoir storage rate, and soil moisture content have been developed and used for predicting agricultural drought. In this study, we developed a drought index using groundwater level fluctuation such as Standardized groundwater level index(SGI), and conducted a study to precisely analyze the agricultural drought more thoroughly through the existing drought index and comprehensive interpretation.
- From the correlation analysis between SGI and SPI values at 14 groundwater monitoring wells in Chungnam Province, where drought was

severe recently, and SPI values using the data of 68 nationwide groundwater monitoring wells, AP values were 1-3 months and correlation coefficient were high.

- The correlation results for the short-term months (1-3 months) indicate that 1) the short-term drought can be analyzed using the groundwater level fluctuation value and 2) groundwater system are not much affected by drought.
- Based on the results of these scientific analysis, the following conclusions were obtained.
  - 1) It was possible to develop agricultural drought index using groundwater level fluctuation value. Using the current short-term groundwater level(30-day moving average groundwater level), comparing the current short-term groundwater level with the past record(lower 5.4%, 12.95%, 24.2%, and so on), it is able to judge whether it was close to the groundwater level during the drought period. Therefore, it is confirmed that drought forecasting and alarming are possible by estimating the direction of short-term groundwater level change over at least one month in the near future.
  - 2) In terms of groundwater supply capacity, when the drought occurred, the groundwater level could be lowered due to short-term(spring drought) impact compared to the average groundwater level, but the width was not relatively large. In fact, groundwater levels in the past three years (2014-2016) were about -0.02 m to -0.13 m nationwide compared to the average groundwater levels. In the simulation results using the groundwater supply capacity evaluation model, the groundwater supply capacity in the drought period was similar to the normal supply capacity. This is because the groundwater level can be reduced by a short time(within 1 m) due to the drought, but it does not cause a significant change in the groundwater supply capacity of the aquifer.
- Consequently, the groundwater data can be used as a drought index. Especially, if the current groundwater level is compared with the past accumulated groundwater level, it will be useful for short-term(1-3 months) drought forecasts and alarms. Moreover, as the groundwater system is

analyzed to be less influenced by long-term drought, it is necessary to establish a policy plan for groundwater utilization similar to the groundwater supply capacity during drought period.

# 목 차

<b>1. 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구배경 .....	3
1.2 연구목적 및 주요 연구내용 .....	4
1.2.1 연구목적 .....	4
1.2.2 주요 연구내용 .....	5
1.3 연구추진 체계 .....	6
1.4 기대효과 및 실용화 방안 .....	6
<b>2. 농업가뭄과 가뭄지수</b> .....	<b>7</b>
2.1 농업가뭄 .....	9
2.1.1 가뭄의 정의 .....	9
2.1.2 기상학적 가뭄 .....	9
2.1.3 수문학적 가뭄 .....	9
2.1.4 농업적 가뭄 .....	10
2.1.5 사회경제적 가뭄 .....	10
2.2 가뭄지수 .....	11
2.2.1 가뭄지수의 정의 .....	11
2.2.2 표준강수지수(SPI) .....	11
2.2.3 표준지하수위지수(SGI) .....	16
<b>3. 가뭄평가를 위한 지하수 관측망 활용</b> .....	<b>19</b>
3.1 지하수 관측망 .....	21
3.1.1 지하수위 .....	21
3.1.2 국가지하수 관측망 .....	22
3.1.3 농촌지하수관리 관측망 .....	25
3.2 장기관측자료 분석 .....	29
3.2.1 관측자료의 상관성 분석 .....	29
3.2.2 관측공별 변동유형 분석 .....	35

3.3 농촌지역 지하수 장기수위 변화 분석 .....	40
3.3.1 전국 강수량 변화 분석 .....	40
3.3.2 농촌지하수관리 관측망을 이용한 지하수위 변화 분석 .....	47
<b>4. 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발 .....</b>	<b>55</b>
4.1 수문 관측자료의 시계열 분석 .....	57
4.1.1 수문 관측자료 .....	57
4.1.2 표준강수지수를 이용한 지표수 수문 분석 .....	58
4.1.3 SPI와 수문 시계열 자료 비교 .....	60
4.1.4 시계열 상관분석 .....	67
4.2 지하수 공급능력 평가 모델 개발 .....	81
4.2.1 개념모델 설계 .....	81
4.2.2 지하수 흐름 모사 결과 .....	83
4.2.3 지하수 공급능력 평가 방법 .....	86
4.2.4 지하수 공급능력 평가 결과 .....	88
<b>5. 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립 .....</b>	<b>97</b>
5.1 표준지하수위지수(SGI) 기준 .....	99
5.1.1 관측공 주변 지하수위와 토양수분함량 상관성 평가 .....	99
5.1.2 관측공별 SGI 분석 .....	115
5.1.3 SGI-SPI 상관분석을 통한 행정구역별 누적기간(AP) 결정 .....	141
5.2 농업가뭄과 연계한 지하수위 저하 한계치 기준 .....	151
5.2.1 관측공별 시계열 자료 백분위 분석 .....	153
5.2.2 관측공별 농업가뭄 단계별 지하수위 저하 한계치 제시 .....	179
5.2.3 지하수위 저하 한계치 기준을 이용한 2017년 농업가뭄 영향 분석 .....	187
5.3 기존 농업가뭄 예·경보 인자와의 통합 운영 방안 제시 .....	189
<b>6. 연구개발과정에서 수집한 해외 사례 .....</b>	<b>193</b>
6.1 미국 캘리포니아 주 사례 .....	196
6.1.1 캘리포니아 지하수 수위관측 프로그램 .....	196



6.1.2 지속가능한 지하수 관리법 .....	200
6.1.3 지하수 지속가능성 계획 비상 규정 .....	201
6.2 미국 텍사스 주 사례 .....	205
6.2.1 지역지하수 관리 방향 .....	205
6.2.2 에드워드 대수층 관리국: 지하수 수위 관리 .....	207
6.2.3 물 시장: 가뭄 시 지하수 최적배치 전략 .....	209
<b>7. 결 론 .....</b>	<b>215</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>221</b>
<b>부 록 .....</b>	<b>229</b>

## 표 목 차

표 2-1. SPI를 이용한 가뭄 강도의 구분 .....	12
표 2-2. SPI 가뭄 강도별 표준정규분포 백분위수 .....	14
표 2-3. PDSI를 이용한 가뭄 강도의 구분 .....	15
표 3-1. 시·도별 국가지하수 관측소 운영 현황(2015년) .....	23
표 3-2. 권역별 국가지하수 관측소 운영 현황(2015년) .....	23
표 3-3. 시·도별 농촌지하수관리 관측공 운영 현황(2016년) .....	26
표 3-4. 관측공별 강수량과 지하수위와의 상관도 분석 결과 .....	32
표 3-5. 지하수위 관측자료의 유형 분류 기준 .....	36
표 3-6. 관측공별 지하수위의 변동 유형 분류 결과 .....	37
표 3-7. 관측공의 지하수위 변동 형태 분류 결과 .....	39
표 3-8. 도별 평균 강수량 분석 결과(1981~2010년) .....	42
표 3-9. 도별 월평균 강수량 분석 결과(2014년) .....	43
표 3-10. 도별 월평균 강수량 대비 2014년 전국 강수량 분석 결과 .....	43
표 3-11. 도별 월평균 강수량 분석 결과(2015년) .....	44
표 3-12. 도별 월평균 강수량 대비 2015년 전국 강수량 분석 결과 .....	45
표 3-13. 도별 월평균 강수량 분석 결과(2016년) .....	46
표 3-14. 도별 월평균 강수량 대비 2016년 전국 강수량 분석 결과 .....	47
표 3-15. 도별 월평균 지하수위 대비 2014년 지하수위 변화 분석 결과 ·	49
표 3-16. 도별 월평균 지하수위 대비 2015년 지하수위 변화 분석 결과 ·	50
표 3-17. 도별 월평균 지하수위 대비 2016년 지하수위 변화 분석 결과 ·	51
표 4-1. 충남지역 관측 자료별 관측소 개수 및 관측소명 .....	58
표 4-2. 관측소별 SPI와 저수지 저수율의 최대상관계수 .....	78
표 4-3. 관측소별 SPI와 댐 수위의 최대상관계수 .....	79
표 4-4. 관측소별 SPI와 하천수위의 최대상관계수 .....	80
표 4-5. 관측소별 SPI와 지하수위의 최대상관계수 .....	80
표 4-6. 모델에 적용한 수리상수 .....	83

표 5-1. 토양수분측정기 설치 지역 농업용 수질 분석 결과 .....	110
표 5-2. SGI 분석에 이용된 농촌지하수관리 관측망(n=68) .....	115
표 5-3. 관측공별 SGI에 대한 최대 SPI 상관분석 결과 종합 .....	150
표 5-4. 경기도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	179
표 5-5. 강원도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	180
표 5-6. 충청북도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	181
표 5-7. 충청남도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	182
표 5-8. 전라북도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	183
표 5-9. 전라남도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	184
표 5-10. 경상북도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	185
표 5-11. 경상남도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치 .....	186
표 5-12. 가뭄 예·경보 판단 기준 .....	189
표 6-1. 우선순위 지정을 위한 1~6항목의 산입 방법 .....	197
표 6-2. 지하수 분지 우선순위 범주 .....	198
표 6-3. 캘리포니아 주 지하수 분지 관리 우선순위 산출 결과 .....	199
표 6-4. 텍사스 주 지하수 양수 제한 요율 .....	208

## 그림 목 차

그림 2-1. 강수량 자료의 감마분포를 표준정규분포로 변환 사례 .....	13
그림 2-2. 표준정규분포를 이용한 SPI 계산 과정 .....	14
그림 2-3. 영국 Dalton Holme 관측공에 대한 SGI와 AP별 SPI의 비교 결과 .....	17
그림 3-1. 국가지하수 관측망 설치 현황 .....	24
그림 3-2. 농촌지하수관리 관측망 설치 현황 .....	27
그림 3-3. 상관분석을 위한 산점도 .....	29
그림 3-4. 강수와 지하수위의 상관도가 높은 교차상관도 .....	31
그림 3-5. 연평균 지하수위와 연강수량과의 상관관계 .....	33
그림 3-6. 금왕1 관측공의 강수량과 지하수위의 상관관계 및 지하수위 시계열 변동 .....	34
그림 3-7. 시계열 자료의 변동 유형 분류 .....	35
그림 3-8. 내륙지역 기상 관측소 위치도 .....	41
그림 3-9. 분석에 이용된 농촌지하수관리 관측망 위치도 .....	48
그림 3-10. 도별 대표 관측정의 가뭄 기간 중의 지하수위 변화 .....	53
그림 4-1. 충남지역 농촌지하수관리 관측망 및 저수지 위치도 .....	59
그림 4-2. 충남지역 댐 수위 관측소 위치 .....	59
그림 4-3. 보령지역 SPI 변화 .....	60
그림 4-4. 저수지 저수율과 SPI-12 비교 .....	61
그림 4-5. 댐 수위와 SPI-12 비교 .....	64
그림 4-6. 하천수위와 SPI-12 비교 .....	65
그림 4-7. 지하수위와 SPI-12 비교 .....	66
그림 4-8. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관계수 변화 .....	68
그림 4-9. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관계수 변화 .....	70
그림 4-10. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 댐 수위의 상관계수 변화 .....	72
그림 4-11. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 댐 수위의 상관계수 변화 .....	73

그림 4-12. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 하천수위의 상관계수 변화	74
그림 4-13. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 하천수위의 상관계수 변화	74
그림 4-14. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 지하수위의 상관계수 변화	76
그림 4-15. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 지하수위의 상관계수 변화	77
그림 4-16. 공주시 정안천 표준유역, 개념모델 평면도 및 단면도	81
그림 4-17. 모델에 사용된 강수량 및 하천수위 관측 자료	82
그림 4-18. 양수 전 지하수위 변화	84
그림 4-19. 양수 전 물수지 변화	85
그림 4-20. 소하천으로의 지하수 유출량 변화	86
그림 4-21. 농번기 양수에 의한 중류지역 양수정의 수위 변화	88
그림 4-22. 중류지역 양수정의 농번기 지하수 공급능력 변화	89
그림 4-23. 관정 위치에 따른 지하수 공급가능량 변화	89
그림 4-24. 허용 수위강하량에 따른 지하수 공급가능량 변화	90
그림 4-25. 관정군 위치 및 관정 개수에 따른 관정 하나당 평균 양수량 변화	91
그림 4-26. 관정 개수에 따른 소하천으로의 지하수 유출량 변화	92
그림 4-27. 관정 이격거리에 따른 지하수 공급기간 동안의 총 양수량 변화	93
그림 4-28. 관정 이격거리에 따른 관정당 평균 양수량 변화	93
그림 4-29. 관정군 관정 위치에 따른 양수량 변화	94
그림 4-30. 무작위 관정군 위치	95
그림 4-31. 무작위 관정배치 시 관정 개수에 따른 평균 양수량 변화	95
그림 5-1. 토양수분함량 측정 장치 및 강수량 자동측정 장치	100
그림 5-2. 논산1 관측공 주변의 심도별 토양입도분포 곡선	101
그림 5-3. 논산1 관측공 주변 심도별 토양의 통일분류법 분포	102
그림 5-4. 논산1 관측공 주변의 지하수위와 심도별 토양수분함량 및 강수량과 토양수분함량/지하수위 누적시간 분석 결과	103
그림 5-5. 공주1 관측공 주변의 심도별 토양입도분포 곡선	104
그림 5-6. 공주1 관측공 주변 심도별 토양의 통일분류법 분포	105
그림 5-7. 공주1 관측공 주변의 지하수위와 심도별 토양수분함량 및 강수량과 토양수분함량/지하수위 누적시간 분석 결과	106

그림 5-8. 청양1 관측공 주변의 심도별 토양입도분포 곡선 .....	107
그림 5-9. 청양1 관측공 주변 심도별 토양의 통일분류법 분포 .....	108
그림 5-10. 청양1 관측공 주변의 지하수위와 심도별 토양수분함량 및 강수량과 토양수분함량/지하수위 누적시간 분석 결과 .....	109
그림 5-11. 공주1 관측공 지하수 및 하천수의 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 농도 .....	111
그림 5-12. 논산1 관측공 지하수 및 하천수의 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 농도 .....	112
그림 5-13. 청양1 관측공 지하수 및 하천수의 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 농도 .....	114
그림 5-14. 강수량과 SGI 분석 결과 .....	116
그림 5-15. 경기도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	117
그림 5-16. 강원도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	120
그림 5-17. 충청북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	123
그림 5-18. 충청남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	126
그림 5-19. 전라북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	129
그림 5-20. 전라남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	132
그림 5-21. 경상북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	135
그림 5-22. 경상남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과 .....	138
그림 5-23. 경기도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	142
그림 5-24. 강원도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	143
그림 5-25. 충청북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	144
그림 5-26. 충청남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	144
그림 5-27. 전라북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	145
그림 5-28. 전라남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	146
그림 5-29. 경상북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	147
그림 5-30. 경상남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과 .....	147
그림 5-31. 관측공별 SGI-SPI 상관분석에 따른 AP 분포도 .....	149
그림 5-32. 미국 펜실베니아주 관측공 지하수위를 이용한 가뭄정보 시스템 .....	151
그림 5-33. 미국 펜실베니아주 Lawrence 카운티 대표관정의 지하수위 분석을 통한 가뭄정보 제공 사례 .....	153

그림 5-34. 경기도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	154
그림 5-35. 강원도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	157
그림 5-36. 충청북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	160
그림 5-37. 충청남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	163
그림 5-38. 전라북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	166
그림 5-39. 전라남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	169
그림 5-40. 경상북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	173
그림 5-41. 경상남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과 .....	175
그림 5-42. 행정구역별 가뭄(SPI12) 분포 현황 .....	188
그림 6-1. 캘리포니아 주 지하수 분지 관리 우선순위 .....	199
그림 6-2. 캘리포니아 주 지하수 분지별 연차별 지하수 지속가능성 목표 .....	201
그림 6-3. 지하수 지속가능성 계획 수립 및 시행 단계 .....	202
그림 6-4. 지하수 지속가능성 지시인자 .....	203
그림 6-5. 텍사스 주 지하수보전구역과 지하수관리지역 .....	206
그림 6-6. 텍사스 주 에드워드 지하수 대수층 .....	207
그림 6-7. 에드워드 대수층 관리국에 접수된 연차별 물권리 동 통계 ...	212
그림 6-8. 에드워드 대수층 관리국에 접수된 물권리 이동 형태 .....	212





# Chapter 01

## 서론

- 1.1 | 연구배경
- 1.2 | 연구목적 및 주요 연구내용
- 1.3 | 연구추진 체계
- 1.4 | 기대효과 및 실용화 방안



# 1. 서론

## 1.1 연구배경

- 최근 기후변화 가속화에 따라 가뭄과 홍수 등 극사상의 빈번한 발생, 국가 단위의 정책 변화 및 소비자의 생활수준 변화 등이 복합적으로 작용하면서, 기존의 논 농업 중심에서 다양한 시설농업 등 밭 농업 비중 증가에 따른 농업환경이 급격하게 변화하고 있다.
- 이러한 변화에는 필연적으로 농업 활동에 필수적인 농업용수 수요량과 공급량의 지역적인 편차가 수반된다. 우리나라의 논 면적은 1990년 1,345천 ha에서 2010년 984천 ha로 20년 사이에 약 27% 대폭 감소하였지만, 밭 면적은 764천 ha에서 731천 ha로 약 4% 감소하여 상대적인 변화는 적은 것으로 나타났다. 그러나 이 기간 중의 시설재배면적은 44.6천 ha에서 91.487천 ha로 약 2.1배 급격하게 증가한 것으로 나타났다 (농림축산식품부, 2014).
- 이러한 시설재배면적의 급속한 확대에는 농산물의 상품성 유지를 위한 청정 지하수의 수요량 증가가 수반된다. 또한 에너지원으로서 지하수열을 이용한 수막재배 농가 증가에 따른 수요량 증가로 이어져 지하수에 대한 활용도가 급속하게 높아지고 있는 추세이다. 따라서 이러한 농작물 재배 형태의 변화는 용수이용 측면에서 지하수자원의 효율적인 수요·공급 방식의 변화가 수반되어야 한다.
- 이러한 농업환경 변화에 직접적인 영향을 미치는 요인들 중에 가장 큰 요인으로는, 기후변화에 수반되는 가뭄이 대표적이다. 일반적으로 가뭄은 기후학적 가뭄, 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄 등으로 분류되는데, 이 중 농업가뭄의 경우 저수율지수 (RSI, reservoir storage index), 표준강수지수 (SPI, standard precipitation index), 월강수량지수 (MRI, monthly rainfall index) 및 무강수지수 (DDI, dry day index) 등을 종합적으로 고려해 단계별로 구분되며, 이러한 구분 단계를 토대로 가뭄대책을 수립한다.
- 그러나 최근 가속화되는 기후변화와 이에 따른 가뭄 빈도 및 가뭄 강도 증가는, 농업용수 수요량 변동성 증가에 따른 지속가능한 농업용수 공

급 능력 다변화와 같은 적극적인 대책 수립의 필요성을 높이고 있다. 이러한 관점에서 최근 지속가능한 수자원으로서의 지하수자원의 중요성이 증대되고 있다.

- 우리나라의 지하수관정 및 이용량은 각각 약 1,380,700개소와 3,807백만  $m^3$ /년으로, 이 가운데 농업용은 각각 42%와 49%를 차지하고 있다 (국토해양부, 2012). 농업용 지하수관정 중 이용량 자료가 축적된 1,384개소 공공관정의 2010년부터 5년간 지하수 이용량을 분석한 결과, 연간 강수량이 평년과 유사한 2011~2013년 기간 중 평균 18,506천  $m^3$ /년의 이용량이 가뭄이 심했던 2014년의 경우 33,824천  $m^3$ /년으로 약 83% 급증한 것으로 나타났다. 특히 최근 가뭄이 극심한 강화도의 경우 2010년 대비 2014년의 지하수 이용량이 약 4.5배 급증함에 따라, 물부족에 따른 농업용 지하수 확보 필요성과 더불어 해안지역 대수층을 통한 해수 침투 억제를 위한 지하댐 개발 등의 적극적인 대책 수립 필요성이 대두되고 있다.

## 1.2 연구 목적 및 주요 연구내용

### 1.2.1 연구목적

- 본 연구는 이러한 배경을 기초로 관측공별로 실시간 지하수위 관측자료를 이용한 농업가뭄 평가 기술 개발을 목적으로 수행되었다. 연구 수행을 통하여 기존의 농업가뭄 평가 정밀도 향상 및 가뭄대처 능력 제고 방안을 도출하였으며, 농업용 지하수 관정을 이용한 지하수위 변동 특성이 반영된 새로운 가뭄 예·경보 기준이 제시되었다. 또한 최근 기후 변화 가속화에 수반되어 발생하는 가뭄이 지하수계에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 농촌지하수관리 관측망 자료의 시계열 분석 결과를 이용하여 최근에 발생한 지역적인 가뭄에 따른 지하수위 하강 현상을 정량적으로 분석하였다.
- 이를 위하여 현재 가뭄지수로 사용되고 있는 표준강수지수(SPI)를 기반으로 표준지하수위지수(SGI)를 계산하여 적용하였으며, 각 관측공별로 장기간의 지하수위 시계열 자료를 분석하여 기존의 농업가뭄 예·경보 기준에 포함될 수 있는 방안을 정립하였다. 이때 SGI는 SPI와 지하수위와의 상관분석을 위한 표준화된 새로운 지수로, 지하수 가뭄의 특성화

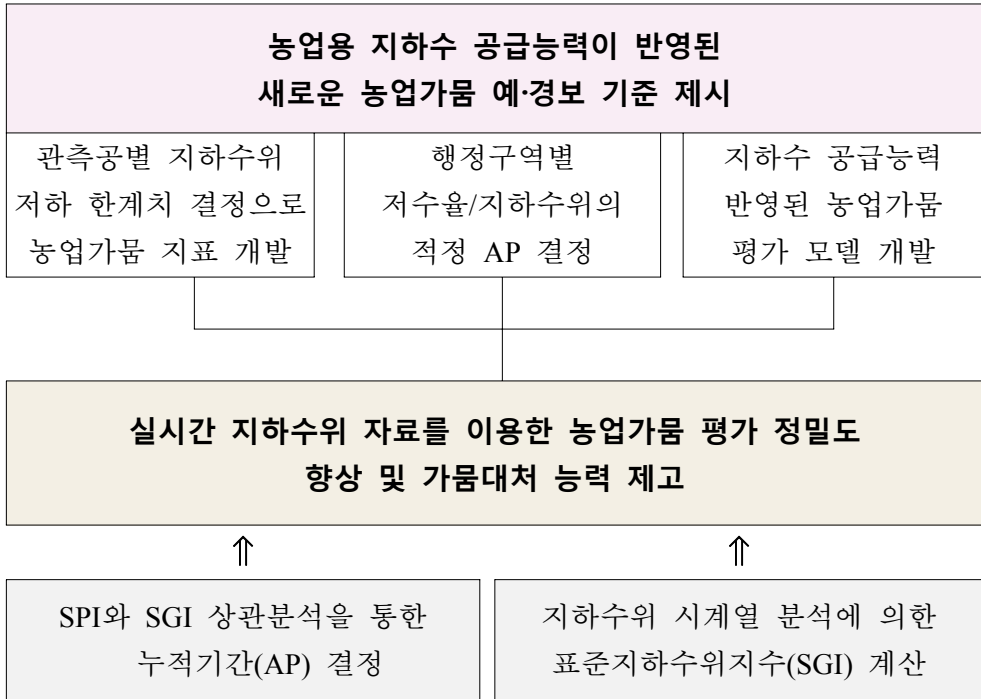
에 활용하기 위하여 기존의 강수량 시계열 자료를 이용한 표준화 지수인 SPI와 동일한 자료처리 과정으로 계산되었다.

### 1.2.2 주요 연구내용

◦ 본 연구는 크게 5단계로 구분하여 수행되었다.

- 1) 농업가뭄과 가뭄지수에서는 SPI와의 상관분석을 위한 기준으로 표준 지하수위지수(SGI)를 계산하여 이용하였으며,
- 2) 가뭄평가를 위한 지하수 관측망 활용 부분에서는 농촌지하수관리 관측망의 지하수위 장기 시계열 자료를 이용하여 농업가뭄의 시·공간적인 분포와 지하수위 변동 결과를 정량적으로 분석하였다.
- 3) 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발 부분에서는 SPI와 지표수 수문 분석 자료와의 상관성 분석을 통한 누적기간(AP) 결과를 토대로 저수율 지표에 대한 지역별 최적 SPI를 결정하였으며, 지하수 공급 능력 평가 모델을 개발하여 농업가뭄 평가를 위한 지표수-지하수 연계 모델 기반을 구축하였다.
- 4) 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립 부분에서는 SGI와 SPI 상관분석을 통한 행정구역별 AP를 결정하였으며, SPI 분석 시 이용된 평균과 표준편차 각각 0과1의 표준정규분포에서 가뭄 단계별 정규분포(normal distribution)를 적용한 각 관측공별 지하수위 저하 한계치를 계산하였다. 이러한 결과를 이용하여 기존 농업가뭄 예·경보 인자와의 통합 운영 방안을 제시하였다.
- 5) 마지막으로 본 연구를 수행하면서 수집된 해외 사례를 분석하여, 향후 지하수위를 이용한 농업가뭄 예·경보 기준 수립에 활용 방안을 검토하였다.

### 1.3 연구추진 체계



### 1.4 기대효과 및 실용화 방안

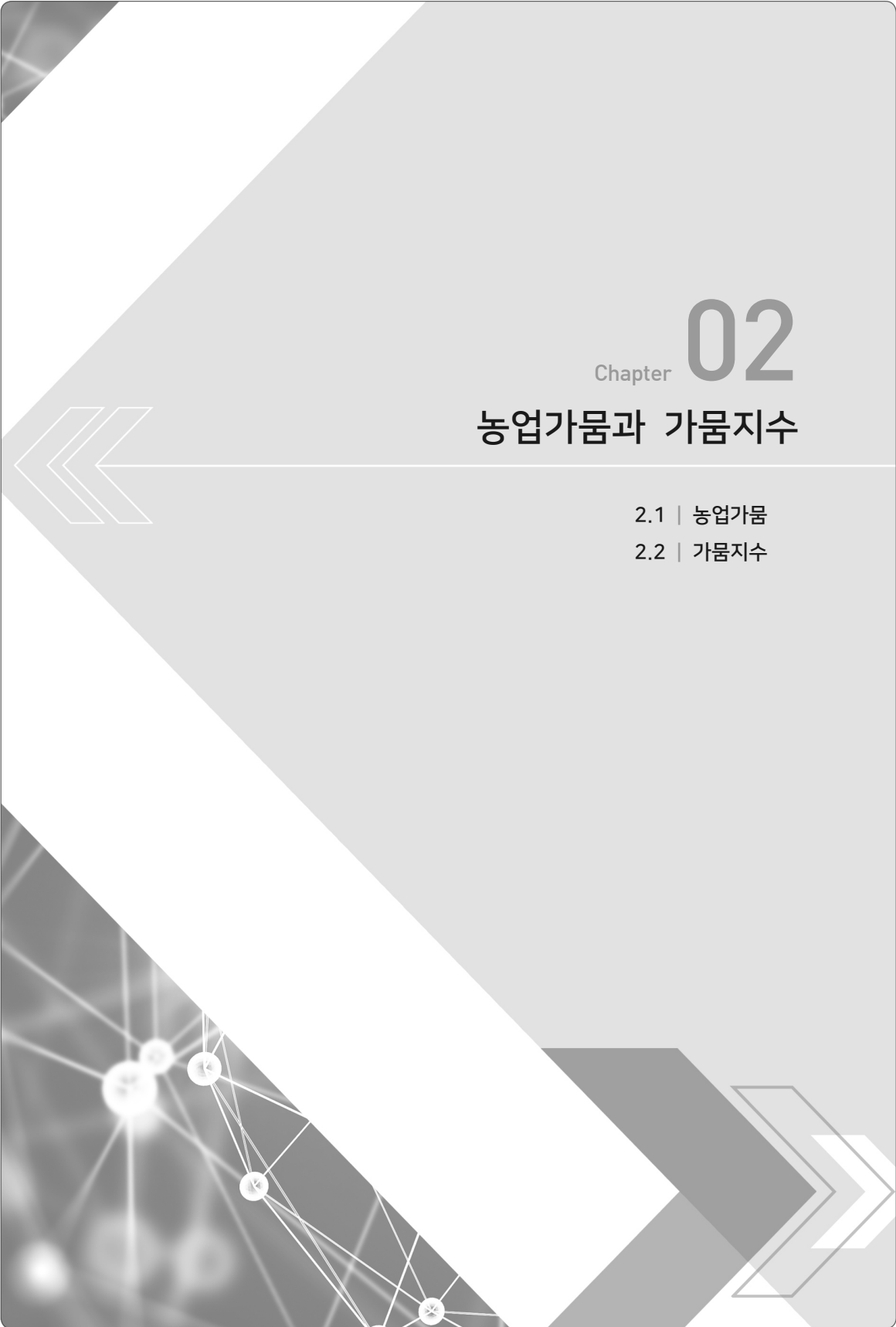
- (정책부문)기존 농업가뭄 평가기법과 통합 운영으로, 가뭄평가 정밀도 제고 및 효율적인 가뭄대처를 위한 의사결정 자료로 활용 가능
- (기술력부문)실시간 지하수위 자료를 활용한 용수구역별 지하수 공급 능력 평가 가능으로, 지하수자원관리 관련 업무의 고도화
- (사업화부문)용수구역별 토양유효수분율과 지하수위 상관분석 결과를 토대로, 시설원예단지를 포함한 밭농업 지역 지하수 공급 가능량 제시 등 사업화 가능
- (실용화부문)가뭄 발생지역에 대한 지하수 공급 가능량 산정 가능으로, 시·군 지자체에 대한 효과적인 가뭄 대책 지원 가능

# Chapter 02

## 농업가뭄과 가뭄지수

2.1 | 농업가뭄

2.2 | 가뭄지수







## 2. 농업가뭄과 가뭄지수

### 2.1 농업가뭄

#### 2.1.1 가뭄의 정의

- 기상학적인 관점에서 가뭄은 주기적으로 발생하는 기후 현상으로, 특정 기간 동안의 강수량 부족으로 정의된다. 따라서 가뭄이 시작되는 시점을 결정하기 위해서는 일정 기간 동안의 강수량이 평균치(일반적으로 30년)와 비교하여 정량적으로 감소되는 기준(예를들면 75% 또는 50%)을 설정하여야 한다.
- 농업 분야에서의 가뭄은 토양수분의 부족으로 정의가 가능하며, 토양수분의 부족을 결정을 위해서는 매일의 강수량값을 증발산율과 비교한 후 작물의 생육단계별 필요 수량과의 관계로 제시될 수 있다.
- 농업가뭄의 경우에는 이러한 기상학적 변수, 토양수분 변화 및 생육단계별 필요 수량 등의 평가를 통하여, 가뭄심도, 기간 및 가뭄 빈도 등을 결정하는데 이용된다.

#### 2.1.2 기상학적 가뭄

- 기상학적 가뭄은 일정 기간 중의 강수량이 평균치에 비하여 부족한 상태에서 공간적으로 불균질함에 따른 강수 부족지역을 대상으로 고려되어야 한다. 예를들어 열대 다우림지역 또는 습윤한 아열대지역 등과 같이 연중 강수지역의 경우에는, 정해진 한계보다 적은 강수를 갖는 날의 일수를 기초로 가뭄기간을 규정하는 방법이 적당하다.
- 이에 비하여 건조지역의 경우에는 평균 강수량 대비 적은 양의 강수를 보인 날의 일수를 기준하여 가뭄을 규정하는 것은 비현실적이므로, 월별, 계절별 또는 연간 강수량의 평균치에 실제 강우의 편차를 대비시키는 방법이 적당하다.

#### 2.1.3 수문학적 가뭄

- 수문학적 가뭄은 강수량 부족 기간 동안 하천수 수위, 저수지 수위, 지하수위의 변화에 미치는 영향으로, 해당 유역의 규모와 같은 수문학적

시스템과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 수문학적 가뭄은 기상학적 가뭄 및 농업가뭄에 비해 늦게 발생하는 특징이 있는데, 이는 강수량의 부족이 토양수분, 하천수량, 지하수 및 저수지 수위 등과 같은 수문학적 시스템에 작용하는데 시간이 많이 걸리기 때문이다.

- 예를 들면 강수량이 부족한 경우에는 농업활동에 직접적인 영향을 미치는 토양 수분함량의 급격한 감소가 나타나지만, 유역 내의 저수지 수위의 경우에는 강수량 부족의 영향이 발생되는데 일정한 기간(누적기간, accumulation period)이 소요된다. 또한 이러한 누적기간 중에 다양한 용도의 물 사용량이 발생하기 때문에, 수문학적 가뭄 발생에 대한 기간 및 영향을 평가하기 쉽지 않은 특성이 있다.

#### 2.1.4 농업적 가뭄

- 농업적 가뭄은 강수량 부족, 실제증발산량과 잠재증발산량의 차이, 토양 수분 부족, 지하수위 또는 저수위의 저하 등을 기준으로, 기상 또는 수문학적 가뭄이 농업에 미치는 영향을 고려한 가뭄 기준이다.
- 일반적으로 농작물의 물 수요량은 기상조건, 작물의 생물학적 특성, 성장단계 및 토양의 물리적 성질 등에 따라 다르므로, 농업가뭄을 정의하기 위해서는 발아에서 수확까지 작물 생육단계별로 작물의 상태를 고려하여야 한다.
- 농업활동 중 강수량 감소에 따라 작물 발아 단계에서 표토의 토양 수분함량이 감소하는 경우에는, 단위면적당 농작물의 개체수 감소에 따라 최종 생산량의 감소가 발생된다. 그러나 가뭄이 발생하는 경우에도 초기 성장단계에 표토의 토양 수분이 충분한 경우에는 성장단계에서 토양 수분함량이 다시 증가하면 최종 생산량에는 영향을 미치지 않게 된다.

#### 2.1.5 사회경제적 가뭄

- 사회경제적 가뭄은 경제체의 공급과 수요를 기상학적, 수문학적, 농업적 가뭄과 관련되어 나타나는 가뭄으로, 농작물과 같이 다양한 계절적인 작부체계를 가지는 경제체의 경우에는 공급과 수요의 시·공간적 특성을 반영하기 때문에 일반적인 가뭄과 특성이 다르다.
- 일반적으로 강수량 부족에 의한 물 공급 부족한 경우 경제체의 수요가 공급을 초과할 때 발생되는데, 경제체의 수요가 인구증가에 따른 1인당

소비량의 증가에 의해 늘어나지만 이에 따른 공급도 생산효율 개선, 기술발전 또는 저수지 건설을 통한 용수공급 확대 등을 통해 늘어나게 된다. 그러나 이러한 상대적인 변화에 기반하는 특성 때문에, 가뭄에 대한 취약성과 발생율도 증가하는 경향이 있다.

## 2.2 가뭄지수

### 2.2.1 가뭄지수의 정의

- 가뭄지수는 강수량, 하천유량, 저수지 수위 등 다양한 물 공급 인자들의 누적된 시계열 자료들을 정규화한 숫자로, 가뭄 극복을 위한 다양한 의사결정을 위한 기초자료로 활용된다.
- 가뭄을 일관된 방식으로 비교할 수 있는 목적으로 지난 수십년 동안 기상, 수문, 농업 등의 가뭄을 대상으로 가뭄심도, 지속 기간 및 공간적 범위 등에 대한 표준화 작업이 시도된 바 있다(Mishra and Singh, 2010).
- 가뭄경향을 분석하기 위한 대표적인 방법은 관측된 기상자료를 이용하여 계산되는 표준강수지수(standardized precipitation index, SPI)로, SPI는 감마분포를 장기 강수량 기록에 적용하여 정규화된 지수로 변환하여 활용하고 있다(McKee et al., 1993; Edwards and McKee, 1997; Hayes et al., 2011).

### 2.2.2 표준강수지수(SPI)

- 일반적으로 토양 내의 수분함량은 강수에 즉각적으로 반응하는 반면 지표수 및 지하수는 상대적으로 장기간의 강수에 영향을 받기 때문에, 이러한 특성을 이용하여 대상기간 중의 강수 확률분포를 정규분포로 활용할 수 있도록 고안된 SPI는 다양한 시간 간격에 따른 종류별 수자원의 이용가능성에 대한 가뭄의 영향을 반영할 수 있는 장점이 있다.
- SPI는 강수량의 부족이 지하수위, 저수지 저수량, 토양 수분함량, 하천수량 등에 영향을 주는 것을 정량화하기 위하여, 여러 가지 시간 간격(3개월, 6개월, 12개월, 24개월, 48개월)에 대한 강수량 부족을 정량화하도록 개발되었다(McKee et al., 1993). 이러한 시간 간격은 수자원의 종류별로 서로 다른 가뭄의 영향을 반영하는데, 토양 수분함량은 짧은 기

간의 강수에 반응하는 반면 지하수위, 하천수량 및 저수지 저수량은 상대적으로 장기간의 강수 상황을 반영한다.

- 따라서 다양한 시간 간격으로 적용이 가능한 표준화된 강수지수의 개발을 통해, 가뭄대책에 필요한 초기 가뭄의 예보에 활용이 가능하다.
- 특정 지점에 대한 SPI 산정은 대상 기간에 대한 장기간의 강수량 시계열 자료를 이용하는데, 이러한 장기기록은 확률분포에 맞추어지며 그 분포는 정규분포로 변환되어 어느 특정지점과 기간에 대한 평균 SPI는 0이 된다.
- 이때 양(+의 값)을 갖는 SPI는 중앙치 강수량보다 강수량이 많음을 나타내며 음(-의 값)의 값은 적음을 나타낸다. 따라서 특정 기간에 대한 평균 SPI는 0이 되며, 가뭄은 연속적인 음수로 -1.0 이하에 도달하면 발생하고 양수가 되면 종료된다(표 2-1).
- 따라서 가뭄 사상은 그 시작과 끝이 정의되는 기간을 갖게 되며 가뭄이 계속되는 매 월마다 강도를 갖게 된다. 가뭄이 발생중인 모든 월에 대한 SPI의 양의 합은 가뭄의 규모로 정의될 수 있다.

표 2-1. SPI를 이용한 가뭄 강도의 구분

SPI value	Classification
2.00 <	Extreme wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
-0.99 ~ 0.99	Near normal
-1.00 ~ -1.49	Moderate drought
-1.50 ~ -1.99	Severe drought
-2.00 >	Extreme drought

- 강수량 자료를 이용한 SPI 계산은 분석에 필요한 일정 기간(month = 1, 2, 3,..., 6,..., 12,..., 24,..., 48) 동안의 강수량 누적 결과를 감마분포(gamma distribution)로 변환한 후, 이를 표준정규분포(standard normal distribution)로 등확률 변환(equiprobability transformation)하여 진행한다 <그림 2-1>.

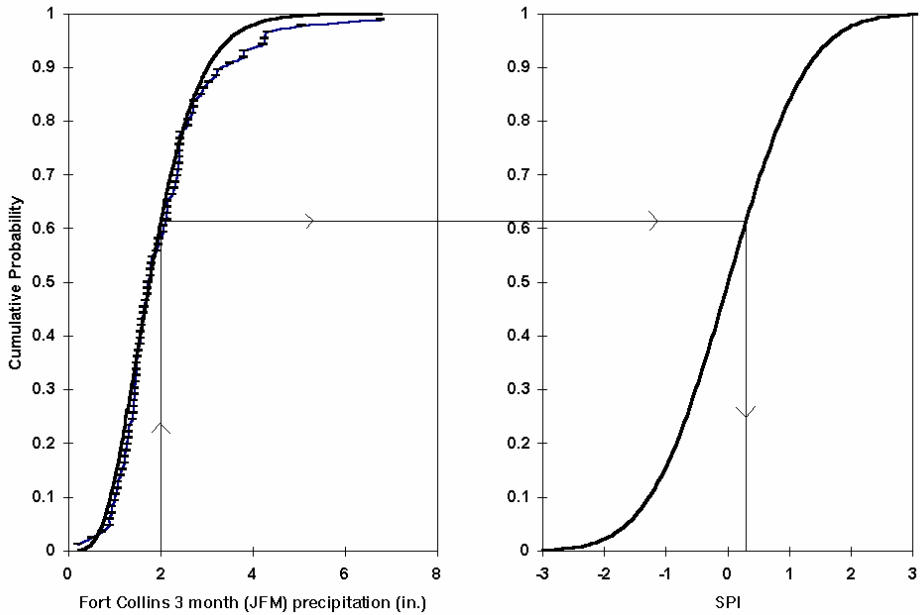
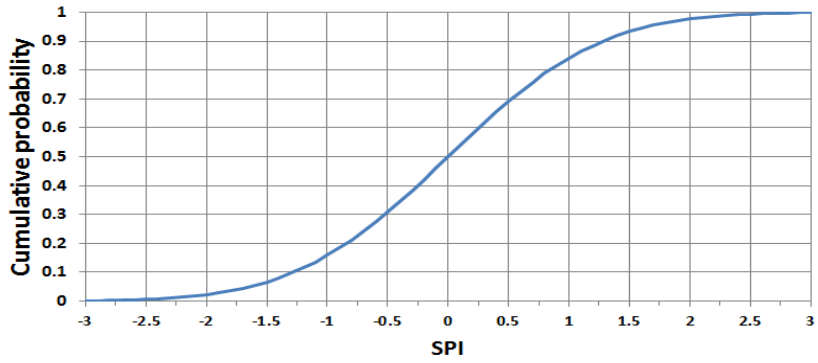
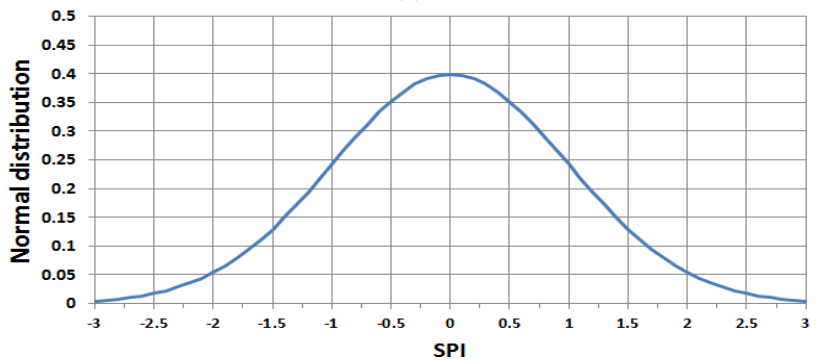


그림 2-1. 강수량 자료의 감마분포를 표준정규분포로 변환 사례

- 변환된 누적정규분포 결과는 평균값과 표준편차를 각각 0과 1에 맞추도록 표준정규분포로 변환시켜 계산한다<그림 2-2>.
- (표 2-1)에서 제시된 가뭄 강도별 SPI 기준을 표준정규분포에 적용한 결과는 (표 2-2)와 같으며, 이 결과는 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 중 연간 시계열 자료의 백분위(percentile) 자료를 이용한 지하수위 하강량 기준 정립에 활용되도록 하였다.



(a)



(b)

그림 2-2. 표준정규분포를 이용한 SPI 계산 과정  
 [(a) 누적확률분포, (b) 정규분포]

표 2-2. SPI 가뭄 강도별 표준정규분포 백분위수

SPI value	Classification	Percentile value
-0.99 ~ 0.99	Near normal	
-1.00 ~ -1.49	Moderate drought	0.2420
-1.50 ~ -1.99	Severe drought	0.1295
-2.00 >	Extreme drought	0.0540

- SPI 접근 방식의 장점은 1) 일반적인 매개 변수(강수량)를 이용하며, 2) 다양한 시간 간격으로 사용이 가능하며, 3) PDSI 등 다른 지표에 비해 상대적으로 간단하다.
- 이에 비해 SPI의 단점은 분석에 사용된 적절한 확률 분포가 관측된 강

수 기간의 시계열을 모델화한다는 가정이 필요하지만, 이러한 제한에도 불구하고 SPI는 가뭄의 대표적인 지표로 세계기상기구(WMO)에서 사용을 권장하고 있다(WMO, 2012).

- SPI와 달리 PDSI에서의 가뭄은 주어진 지점에서 실제 수분공급이 기후적으로 필요한 수분공급 보다 적은 기간이 지속되는 현상으로, 수요-공급 개념을 바탕으로 수분 공급의 편차를 측정하기 위하여 수분부족량과 수분부족 기간의 함수로 나타낸 것이다(Palmer, 1965). 이러한 PDSI는 물수지 분석을 통해 기후적으로 필요한 계산된 강수량과 실제 강수량과의 차인 수분편차를 산정한 후, 서로 다른 지역과 다른 월간의 수분이상의 기준을 같게 만들기 위해 수분편차를 보정하여 가뭄지수 결정하게 된다(표 2-3).

표 2-3. PDSI를 이용한 가뭄 강도의 구분

Palmer value	Classifications
4.00 ≤	Extremely wet
3.00 ~ 3.99	Very wet
2.00 ~ 2.99	Moderately wet
1.00 ~ 1.99	Slightly wet
0.50 ~ 0.99	Incipient wet Spelt
0.49 ~ -0.49	Near normal
-0.50 ~ -0.99	Incipient drought
-1.00 ~ -1.99	Mild drought
-2.00 ~ -2.99	Moderate drought
-3.00 ~ -3.99	Severe drought
-4.00 ≥	Extreme drought

- PDSI는 상대적으로 균질인 지역의 토양 습윤 공급의 편차를 측정하기 위하여 개발된 지수로, 물수지방정식의 수요-공급 개념을 바탕으로 특정지점에서의 강수부족을 평가하여 지역적, 시간적인 지수로 표준화된 습윤 조건을 제시한다.
- PDSI는 강수와 기온자료와 함께 토양의 이용가능 수분량을 바탕으로 산정되는데, 이러한 입력자료로부터 증발산, 토양수분충전, 유출과 표층으로부터의 수분손실을 포함한 물수지방정식의 기본 항목들을 결정한다.

- 따라서 PDSI는 수문학적 가뭄지수로 비정상적으로 건조하거나 습윤한 기상조건에 반응하게 되는데, 건조한 상태에서 정상이나 습윤상태로 변하는 경우에는 하천수나 호수, 저수지의 수위 등 장기 수문학적 영향을 고려하지 않고 가뭄이 끝난 것으로 산정된다.

### 2.2.3 표준지하수위지수(SGI)

- SPI와 같은 정규화 과정은 다양한 관측 결과의 시계열 자료에 적용되었는데, 저수지의 저류량 변화(Vincente-Serrano and Lopez-Moreno, 2005), 유출량 변화(Vincente-Serrano and Lopez-Moreno, 2005; Shukla and Wood, 2008; Lopez-Moreno et al., 2009; Vidal et al., 2010), 토양 수분 변화 (Sheffield and Wood, 2008; Sheffield et al., 2009; Vidal et al., 2010, 2012), 샘물의 배출량 변화(Fiorillo and Guadagno, 2010; 2012), 몬순 기간 전후의 지하수위 변화(Bhuiyan et al., 2006) 등에 적용된 바 있다.
- 특히 최근 농업부분 일부에서는 대기를 포함한 물 순환 과정을 포함한 표준강수-증발산량지수(standardised precipitation-evapotranspiration index, SPEI)를 개발하여 사용하고 있다(Vincente-Serrano et al., 2010; McEvoy et al., 2012).
- 지하수 분야에서는 지하수위 시계열 자료의 표준화 및 지하수 가뭄의 특성화를 위한 새로운 지수로, 강수량의 시계열 자료를 이용한 표준화 지수인 SPI와 동일한 자료처리 과정을 갖는 표준지하수위지수 (standardized groundwater level index, SGI)가 제안되었다(Bloomfield and Marchant, 2013).
- 지하수위는 강수량과 달리 특정한 기간 중의 자료를 누적할 필요가 없는 연속적인 변동자료로, SPI 계산처럼 감마분포를 이용한 정규화 과정을 거칠 필요가 없는 특징이 있다.
- 따라서, 관측공에서 측정되는 지하수위 시계열 자료를 적절한 정규화 과정을 거치는 경우 가뭄 기간 중의 지하수자원의 변동을 정량적으로 평가할 수 있다.
- Bloomfield and Marchant(2013)는 영국 내 전국에 분포하는 주요한 대수층별로 14개소의 지하수위 관측공을 대상으로, SGI와 SPI의 상관성 분석을 통하여 지하수 가뭄을 분석한 바 있다.
- <그림 2-3>은 1909년부터 2006년까지 약 97년 동안의 강수량 자료를 이



용한 누적 기간(accumulation period, AP)별 SPI와 SGI를 비교한 결과로, 최고의 상관성을 갖는 AP가 10개월로 나타난 지역의 분석 자료이다.

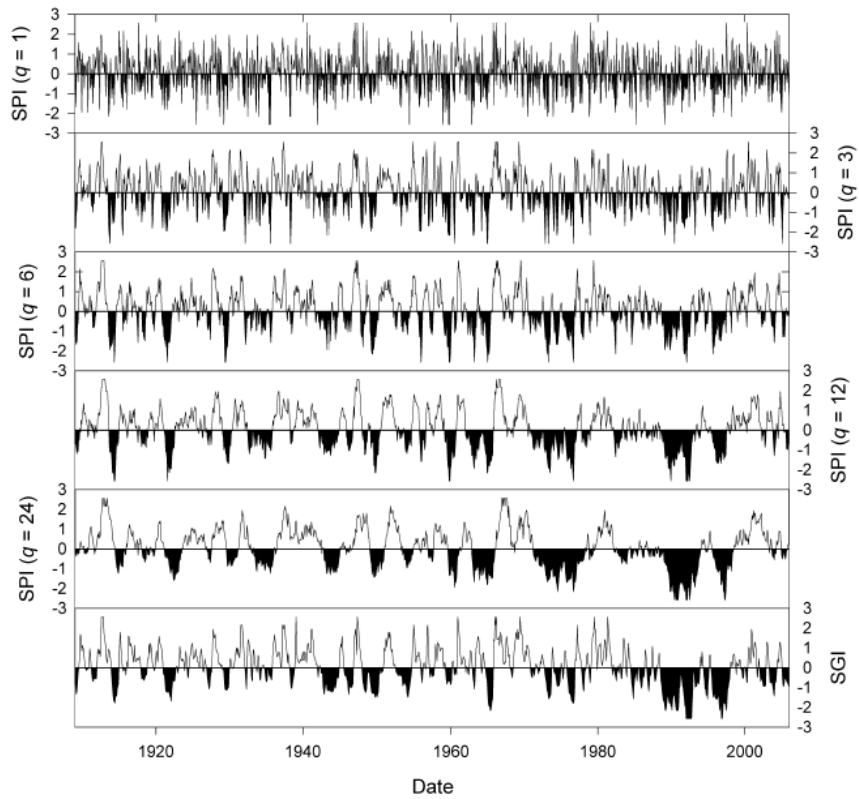


그림 2-3. 영국 Dalton Holme 관측공에 대한 SGI와 AP별 SPI의 비교 결과(Bloomfield and Marchant, 2013)



# Chapter 03

## 가뭄평가를 위한 지하수 관측망 활용

- 3.1 | 지하수 관측망
- 3.2 | 장기관측자료 분석
- 3.3 | 농촌지역 지하수 장기수위 변화 분석



### 3. 가뭄 평가를 위한 지하수 관측망 활용

#### 3.1 농촌지하수관리 관측망

##### 3.1.1 지하수위

- 지하수위(groundwater level)는 대수층 내의 기압을 고도로 나타낸 것으로, 자유면대수층과 피압대수층에 대해 각각 지하수면(water table)과 피압면(piezometric surface)으로 구분하여 표현된다(Todd, 1980).
- 이러한 지하수위 변화는 인간의 활동에 의한 인위적인 영향과 더불어 기후변화 등 자연적인 영향이 포함된 다양한 수문학적 현상에 의해 지배를 받고 있는데, 수년 이상의 영년변화(secular variation), 지하수 양수, 인공함양 등과 같은 장주기의 변화와 함양, 강수량, 대기압, 지진, 조석 등의 계절적 또는 단주기 변화의 영향을 동시에 받고 있다(Bredehoeft, 1967; Freeze and Cherry, 1979; Todd, 1980).
- 해안지역 대수층의 경우에는 조석 변화와 더불어 양수 및 강수에 의한 지하수위 변동에 따라 해수침투의 변동이 영향을 받는다. 그러나 이러한 지하수위 변동특성은 대상지역의 수리지질학적 특성에 따라 다르게 나타나는데, 우리나라의 경우에는 이러한 특성 파악을 위하여 해안지역 소유역별로 해수침투 관측망을 설치하여 유역 단위별로 해수침투 양상을 포함한 다양한 수리지질학적 특성을 분석하고 있다(송성호 등, 2007; Song and Zemansky, 2012).
- 이에 비해 내륙지역에 위치한 지하수 관측망은 국토교통부에서 운영 중인 국가지하수 관측망과 농림축산식품부에서 운영 중인 농촌지하수관리 관측망이 대표적인데, 이 중 농촌지하수관리 관측망은 농어촌 용수구역별 지하수위 저하 및 수질 악화 우려지역에 대한 지하수 장기 관측 자료를 토대로, 가뭄 등 농어촌 지하수 보전 관리를 위한 계측을 통하여 기후변화에 따른 수자원 확보 및 대책 수립에 활용을 위하여 2002년부터 2016년말 까지 268개소가 설치되어 운영 중이다.

### 3.1.2 국가지하수 관측망

#### 가. 국가지하수 관측망 개요

- 국가 지하수관측망은 지하수법 제17조 및 ‘국가지하수관리 기본계획’에 의거, 국토교통부에서 1995년부터 2015년까지 전국에 402개소의 지하수 관측소 설치를 완료하였으며, 2021년까지 530개의 관측소를 설치할 계획이다.
- 국가 지하수관측망의 설치 및 운영의 기본 방향은 1) 지하수 관측망은 수자원의 종합관리 차원에서 수계별 유역 단위에 관측정을 설치하고, 2) 이들을 연계하여 관측망으로 구축 및 운영토록하며, 지방자치단체에서 운영하는 행정구역 단위의 지역 지하수 관측시설(보조관측망)과 연계될 수 있도록 광역적인 Key station의 개념을 적용하며, 3) 지하수 관측망은 국내 지하수 자원의 종합적인 관리를 위한 기초 관측 시설의 역할을 담당하고, 4) 우리나라에 부존하는 지하수의 전반적인 현황 파악을 위하여 광역적인 수위분포 및 배경적 지하수질(Background Water Quality) 자료를 취득하며, 5) 기상 및 지표수문과 지하수문의 상관관계 규명에 필요한 기초 자료를 제공하고, 6) 수원고갈, 수질오염, 지반침하, 염수침입 등의 지하수 장애 현황 파악과 지하수의 개발·이용 및 보전·관리 정책 수립에 필요한 기초자료를 제공하며, 7) 관측자료는 지하수 정보관리 시스템의 데이터베이스로 구축되어 통합 관리토록 한다.
- 지하수 관측망의 설치지점은 기본적으로 유역별 균등 배치, 수문지질 조건의 대표성, 지하수 이용특성 및 시설의 유지관리 측면 등을 종합적으로 고려하여 1) 본 관측망이 광역적인 대표성을 부여한다는 의미에서 지하수 함양지역과 배출지역에 대하여 각각 설치함으로써 광역적인 수문지질 특성 분석이 가능토록 하고, 함양 지역은 기존의 기상 또는 우량관측소 지점과 연계하여 설정하고, 배출 지역은 기존의 수위 관측소 설치 지점과 연계하여 선정하며, 2) 단위 면적당 지하수 이용량이 많아 과잉양수의 우려가 있는 지역이나 오염에 취약한 지역에 비중을 두어 배치토록 한다.

#### 나. 국가지하수 관측소 설치 현황

- 2015년 말 현재 국가지하수 관측소는 전국 17개 시·도에 402개소가 설

치되어 그 중 386개소가 운영되고 있으며, 평균 설치밀도는 약 0.0040 개소/k㎡이다.

- 서울을 비롯한 8대 특·광역시와 제주특별자치도에는 각각 2~4개소가 설치·운영되고 있으며, 8개 도에는 각각 31개소~63개소가 운영 중이다 (표 3-1).

표 3-1. 시·도별 국가지하수 관측소 운영 현황(2015년) (K-water, 2016)

시·도	관측소	시·도	관측소
계	386	경기도	54
서울특별시	3	강원도	49
부산광역시	3	충청북도	30
대구광역시	4	충청남도	39
인천광역시	3	전라북도	38
광주광역시	2	전라남도	49
대전광역시	2	경상북도	61
울산광역시	4	경상남도	39
세종특별자치시	2	제주특별자치도	4

- 유역별로는 6개 권역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강, 제주도 권역)으로 구분하여 수자원의 기본 단위로 사용하고 있다(표 3-2)<그림 3-1>.

표 3-2. 권역별 국가지하수 관측소 운영 현황(2015년) (K-water, 2016)

계(개소)	한강 권역	낙동강 권역	금강 권역	섬진강 권역	영산강 권역	제주도 권역
386	121	106	88	35	32	4

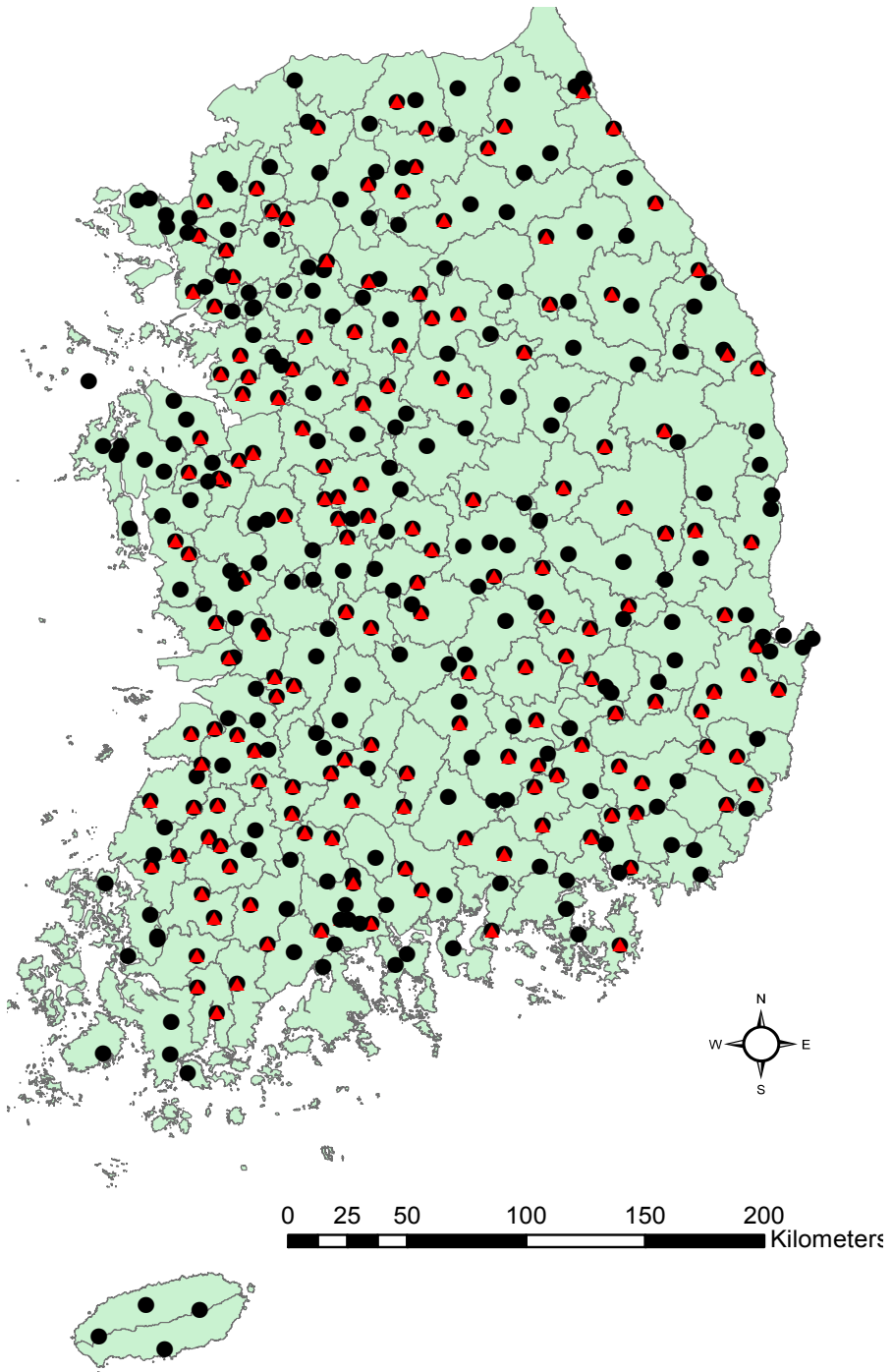


그림 3-1. 국가지하수 관측망 설치 현황  
(원형: 암반관정, 삼각형: 충적관정)



### 3.1.3 농촌지하수관리 관측망

#### 가. 농촌지하수관리 관측망 개요

- 농촌지하수관리 관측망의 설치 목적은 지하수 수량 및 수질 변화를 지속적으로 관찰하여 대수층 내의 지하수를 적정하게 이용하고, 오염예방 및 정화 등 지하수 보전, 관리 체계를 실질적으로 수행하는데 있다.
- 따라서, 관측망은 지하수 부존량 변화 및 수질성분 변화를 파악하기 위하여 대수층의 지하수위 측정, 수질검사 및 대수성 시험 등을 정기적으로 실시하여 자료를 축적 및 분석하고, 지하수자원의 양적변화 및 오염 대비한 적극적인 대책으로 장기관측(모니터링)하는 시설이다.
- 이러한 목적으로 관측망 위치는 오염물질 유입에 의한 수질 부적합 지역, 수질은 적합하나 과잉양수로 지하수위가 계속 하강하는 지역, 현재까지는 지하수의 함양과 양수량이 균형을 이루고 있으나 주변여건 변화로 지속적인 관리가 요구되는 지역 등 지역별 관리대상을 고려하고, 주변 지구물리학적 여건 및 수문환경 등을 고려하여 결정하여야 한다.
- 일반적으로 관측망을 이용한 지하수 모니터링의 세부 목적은 1) 지하수위 변화 관측을 통한 지하수 수문 분석, 2) 지하수 과잉양수에 의한 지반침하 및 오염 가속화 등 재해 예측 및 방지, 3) 지하수자원의 항구적인 보전 및 관리, 4) 하천, 저수지, 해수침투 등 대수층 내 수문 요소에 따른 영향 감시, 5) 수질 특성 변화 예측을 위한 지하수 수질 장기 관측, 6) 오염원 및 잠재오염원 소재 지역의 특정오염원에 대한 오염 확산 감시, 7) 오염 대수층 지역에 있어 정화처리 효과 감시 등이다.
- 농촌지하수관리 관측망의 세부 목적은 농업용 또는 생활용 지하수자원의 보전 관리 및 해안지역 지하수 보전을 위한 대수층의 수문분석 및 장기 수질관측으로, 앞서 제시된 7가지 중 1), 2), 3), 5)이 해당된다.

#### 나. 농촌지하수관리 관측공 설치 및 운영 현황

- 2016년 말 현재 농촌지하수관리 관측소는 전국 8개 시·도에 총 268개소가 설치 및 운영되고 있으며, 농어촌 지하수위에 대한 상시 관측을 통해 농어촌 지하수를 농어업용수로 활용하는데 있어 최적의 방안을 마련하기 위한 기초자료를 제공 중이다(표 3-3)<그림 3-2>.

표 3-3. 시·도별 농촌지하수관리 관측공 운영 현황(2016년)  
(한국농어촌공사, 2016)

시·도	관측공 (개소)	시·군·구
8	92(268)	
경기	13(37)	화성(4), 평택(3), 이천(4), 광주(1), 김포(3), 여주(4), 파주(3), 용인(3), 가평(3), 안성(4), 남양주(2), 포천(2), 양주(1)
강원	12(33)	원주(5), 춘천(4), 횡성(3), 평창(2), 홍천(5), 양구(2), 화천(2), 고성(2), 인제(2), 강릉(4), 양양(1), 삼척(1)
충북	10(22)	음성(5), 제천(2), 진천(2), 괴산(1), 증평(1), 옥천(4), 영동(3), 보은(2), 청원(1), 충주(1)
충남	11(27)	아산(3), 공주(3), 금산(3), 논산(2), 부여(3), 서천(2), 보령(3), 청양(3), 홍성(2), 예산(2), 태안(1)
전북	10(21)	부안(3), 정읍(3), 순창(2), 장수(1), 고창(2), 진안(2), 무주(1), 남원(3), 익산(2), 완주(2)
전남	12(44)	무안(7), 보성(5), 장성(2), 화순(2), 장흥(4), 영광(5), 함평(5), 신안(1), 진도(2), 곡성(3), 순천(4), 고흥(4)
경북	12(45)	영천(3), 상주(6), 안동(4), 청송(2), 문경(2), 봉화(5), 군위(2), 포항(5), 구미(7), 경주(5), 김천(2), 칠곡(2)
경남	12(39)	김해(4), 진주(4), 사천(3), 하동(2), 합천(3), 밀양(5), 거창(2), 거제(3), 창녕(3), 산청(5), 양산(2), 남해(3)

- 또한, 과거 지하수위의 변화와 가뭄발생 시기와의 상관관계 분석, 현재 지하수위 변화의 경향을 토대로 미래 지하수위를 추정하여 가뭄 등 재난을 대비하는 등, 비상 용수로서 해당 지역 농어업에 가용한 수량 등을 제시하기 위한 지표로 활용하고 있다.

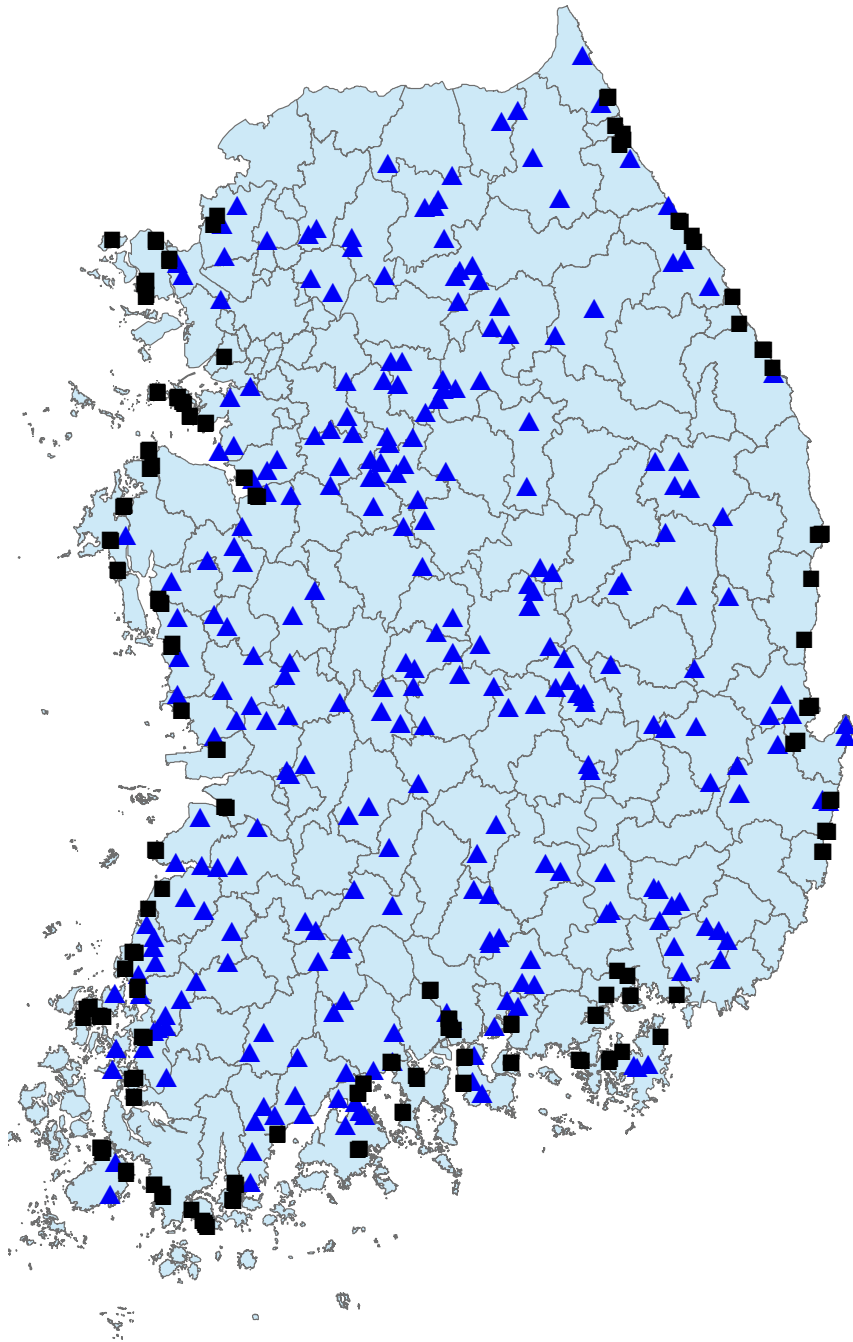


그림 3-2. 농촌지하수관리 관측망 설치 현황  
(사각형: 해수침투관측망)

- 농촌지하수관리 관측망의 2015년도 지하수위 변동을 분석한 결과, 0~2 m 변동은 144개소(68%), 2~4 m 변동은 33개소(16%), 4 m 이상 변동은 33개소(16%)로 나타났으며, 국가지하수 관측망의 수위 변동을 비율과 비교하면 다음과 같은 결과가 나타났다.
  - 0~2 m 변동: 농촌지하수(68%) > 국가지하수(88개소, 30%)
  - 2~4 m 변동: 농촌지하수(16%) < 국가지하수(132개소, 45%)
  - 4 m 이상 변동: 농촌지하수(16%) < 국가지하수(73개소, 25%)
- 농촌지하수관리 관측망은 국가지하수 관측망보다 0~2 m 범위의 수위 변동폭 비율이 높은 반면, 2~4 m 및 4 m 이상 범위에서 비율이 낮은 것으로 나타났다. 이는 국가지하수 관측망이 대부분 하천변에 위치하여 하천수 수위변화의 영향을 받는 반면, 농촌지하수관리 관측망은 대부분 농경지 주변에 위치하여 상대적으로 하천수의 영향을 덜 받기 때문으로 추정된다.

### 3.2 장기관측자료 분석

#### 3.2.1 관측자료의 상관성 분석

- 두 자료 집단(A와 B)의 상관성을 가장 쉽게 알아볼 수 있는 방법은 <그림 3-3>과 같은 산점도(scatter diagram)를 이용하는데, 상관성이 높을 경우 직선에 가까운 형태(a)를 보이는 반면 상관성이 낮은 경우 전체적으로 퍼진 형태(b)로 분포하게 된다.
- 그러나 시계열 자료와 같이 연속적으로 관측된 자료에서는 관측자료의 자기상관도가 높기 때문에 산점도를 이용할 경우 통계적인 의미가 적으며 실제 산점도에서도 일정한 패턴을 찾기 어렵다. 따라서 시계열 자료에 대한 상관분석을 위해서는 먼저 자기상관도에 대한 분석이 필요하다.

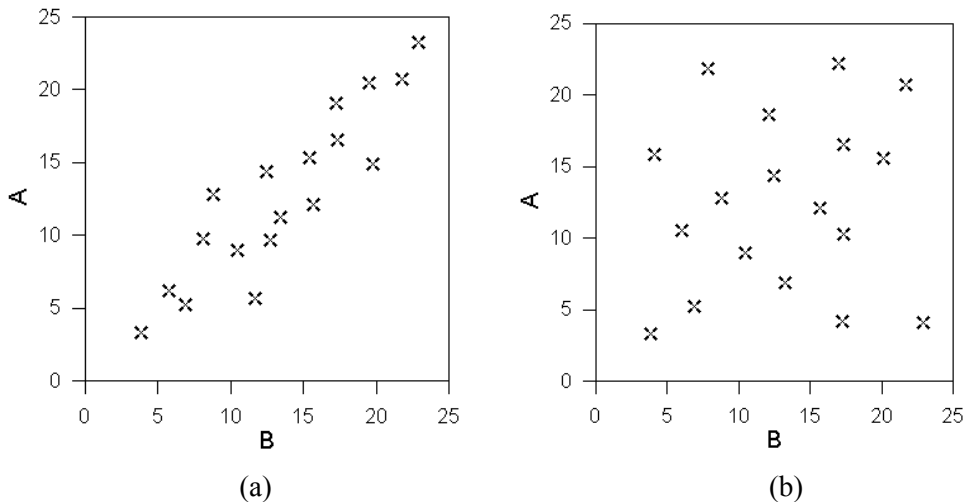


그림 3-3. 상관분석을 위한 산점도

- 자기상관도는 관측시점별로 관측자료가 어느 정도 관련이 되어있는지를 나타내는 것으로 자기상관함수(autocorrelation function)를 이용하여 판단할 수 있다. 자기상관함수는 시계열  $y_t$  와  $y_{t-k}$  와의 k 시차(time lag) 만큼의 상관관계를 나타내주고, 교차상관함수는 시계열  $y_t$ 와 다른 시계열  $x_{t-k}$  와의 k 시차의 상관관계를 나타낸다.
- 시계열  $y_t$  의 평균이  $\mu = E[y_t]$  이라면, 자기상관함수와 교차상관함수

는 다음과 같이 표현된다(식 3.1)(식 3.2).

- lag  $k$  에서의 자기공분산함수:

$$\gamma_k = Cov[y_t, y_{t+k}] = E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)] \quad (\text{식 3.1})$$

- lag  $k$  에서의 자기상관함수:

$$\rho_k = \frac{E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)]}{\sqrt{E[(y_t - \mu)^2]E[(y_{t+k} - \mu)^2]}} = \frac{E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)]}{\sigma_y^2} \quad (\text{식 3.2})$$

- 만약 시계열 관측값이 임의적으로 발생한다면 연속된 두 관측값은 상관성이 없으므로 자기상관함수에서 시차에 따른 유의한 값이 나타나지 않는다. 반면 관측값이 완만하게 변화할 경우는 자기상관함수가 서서히 감소하는 형태를 띠게 된다.
- 교차상관함수는 두 시계열 자료 사이의 상관도를 알아보기 위한 함수로 (식 3.3)과 같이 교차공분산함수를 구하고, 이것을 두자료의 표준편차의 곱(최대값)으로 나눠서 구할 수 있다(식 3.4).

- lag  $k$  에서의 교차공분산함수:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy}(k) &= E[(x_{t-k} - \mu_x)(y_t - \mu_y)] = E[(y_t - \mu_y)(x_{t-k} - \mu_x)] = \gamma_{yx}(-k) \\ &k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{식 3.3}) \end{aligned}$$

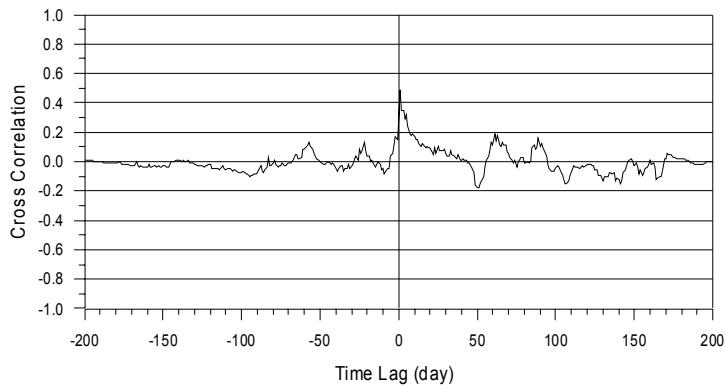
- lag  $k$  에서의 교차상관함수:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{식 3.4})$$

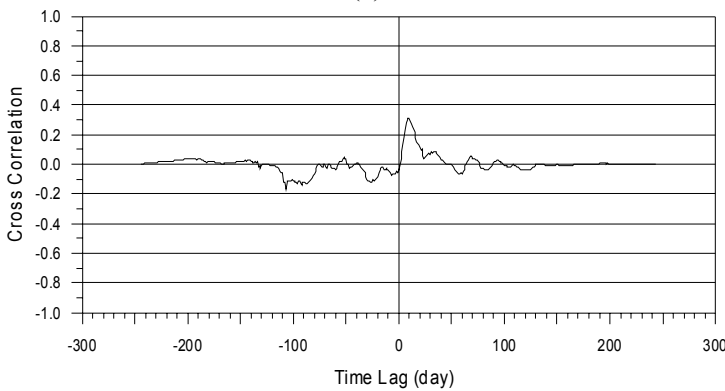
- 자기상관도는 시계열자료가 시차(lag time)별로 연속된 관측자료의 상관성을 파악할 수 있는 기준으로, 관측자료가 변동주기를 가지고 있는지를 파악하는데 유리하다.
- 만약 관측자료가 임의로 만들어진 자료(random variable)이라면, 시차에 따른 상관성이 전혀 없으므로 자기상관도가 1인 시차가 0일 때를 제외

하고, 자기상관도가 낮게 나타난다.

- 교차상관함수(cross-correlation function)는 -1.0 ~ +1.0 사이의 범위를 보여주는데 상관도가 높을수록 최고점(peak)에서의 교차상관값이 크게 나타난다. 교차상관도가 최고점에 도달한 시간을 지연시간(lag time)이라고 하는데 이는 입력자료(강수량)의 영향이 처음 영향을 주는 것이 아니라 최대로 영향을 끼칠 때의 시간을 의미한다. 강수량이 지하수위의 변동에 완만하게 영향을 주고 있다면 상대적으로 지연시간은 길어지고 최고점은 낮아지는 특징을 보이며, 강수에 민감하게 반응하는 경우는 최고점은 높고 지연시간은 짧아지게 된다<그림 3-4>.



(a)



(b)

그림 3-4. 강수와 지하수위의 상관도가 높은 교차상관도  
(a) 지연시간이 0일, (b) 지연시간이 10일

- 본 연구에서는 최근의 지속적인 가뭄의 영향을 분석에서 제외하기 위하여 전체 관측공 중 2012년 이전까지 설치된 관측공 중 3년 이상의 관측 자료가 축적된 53개 관측공을 대상으로 분석하였다. 분석 방법은 각 관측공 주변 기상대의 일 강수량 자료와 매일 12시에 관측된 지하수위와의 자기상관분석과 교차상관분석을 동시에 실시하여, 교차상관계수의 최고점과 지연시간의 특징을 각 관측정별로 분석하였다.

표 3-4. 관측공별 강수량과 지하수위와의 상관도 분석 결과

관측공	관측 기간	최대교차 상관계수	지연 시간(일)	관측공	관측 기간	최대교차 상관계수	지연 시간(일)
고덕1	0712	0.187	2	영천3	0812	0.229	1
공주1	0912	0.436	2	오성1	0712	0.274	22
광주1	0912	0.288	1	음봉1	0612	0.201	3
괴산1	0912	0.461	1	이천1	0812	0.471	1
금산1	0912	0.428	1	이천2	0812	0.394	6
금왕1	0712	0.269	3	이천3	0812	0.382	2
김포1	1012	0.216	13	장수1	1012	0.540	2
김포2	1012	0.326	1	장안1	0612	0.187	1
김해1	0412	0.204	2	정읍1	0912	0.311	2
김해2	0412	-	-	제천1	0712	0.282	4
김해3	0612	-	-	출포1	0612	0.232	4
대소1	0712	0.279	2	증평1	1012	-	-
덕산1	0712	0.363	4	진주1	0812	0.182	2
무안2	0412	0.325	4	진주2	0812	0.070	1
무안3	0712	0.133	7	진주3	0812	-	-
무안4	0712	-	-	진천1	0912	0.253	2
문막2	0712	0.399	1	춘천1	0812	0.316	1
보성1	0912	0.257	2	춘천2	0812	0.272	2
부론1	0712	0.393	3	평창1	1012	0.490	2
삼성1	0712	-	-	평창2	1012	0.537	1
상주1	1012	0.184	8	하동3	1012	-	-
상주2	1012	0.439	2	하동4	1012	0.135	5
상주3	1012	-	-	현덕1	0712	0.153	6
선장1	0612	-	-	홍천1	1012	0.259	22
순창1	0912	0.108	17	홍천2	1012	0.321	40
영인1	0612	0.440	1	횡성1	0912	0.147	1
영천2	0812	0.077	2				



- 분석 결과 대부분의 관측공에서 강수량에 대한 지하수위 상관도는 높지 않았지만, 최대 교차상관계수가 나타나는 최고점의 지연시간은 1~3일로 분석되었다. 이 중 공주1, 괴산1, 문막2, 부론1, 상주2, 영인1, 이천1, 이천2, 이천3, 장수1, 평창1, 평창2 관측정에서 최대교차상관도가 0.4 이상으로 비교적 높게 나타났으며, 지연시간도 짧게 나타나 강수 사상에 따라 지하수위가 변동하는 것을 알 수 있다.
- 연강수량과 연평균 지하수위의 상관성 분석 결과 결정계수가 0.4 이상의 높은 상관관계를 보인 관측공은 15개(28.3%)로 나타났으며, 이는 지하수위 시계열 자료에 포함된 이상치, 양수의 영향 및 추세 변동 등에 의하여 결정계수가 다소 낮아진 것으로 추정된다<그림 3-5>.

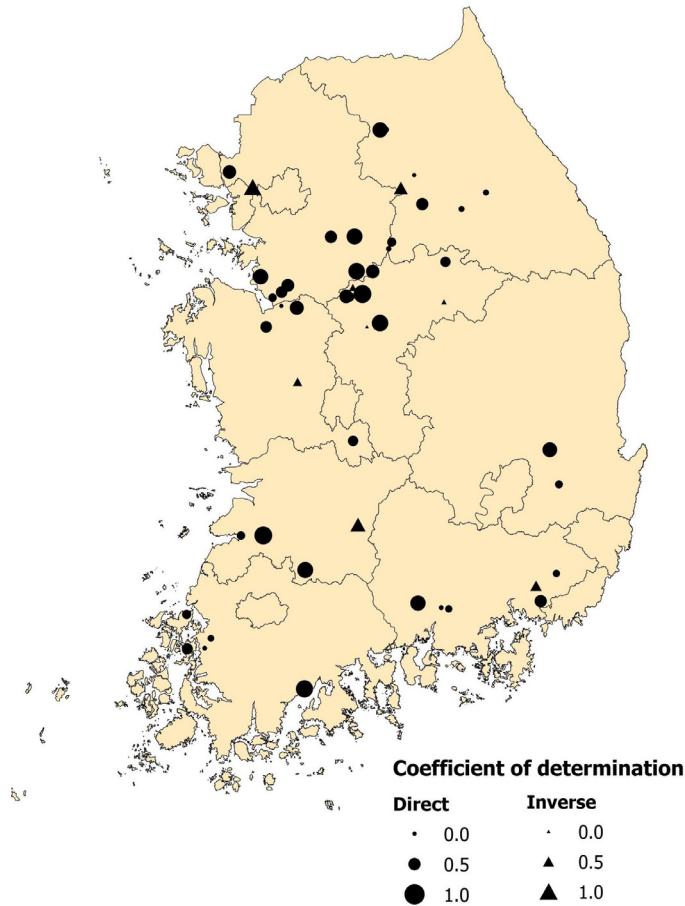
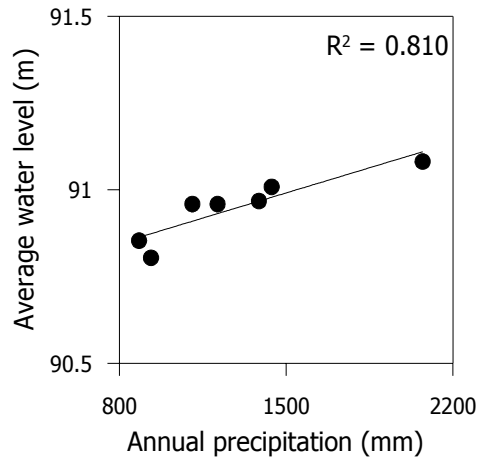
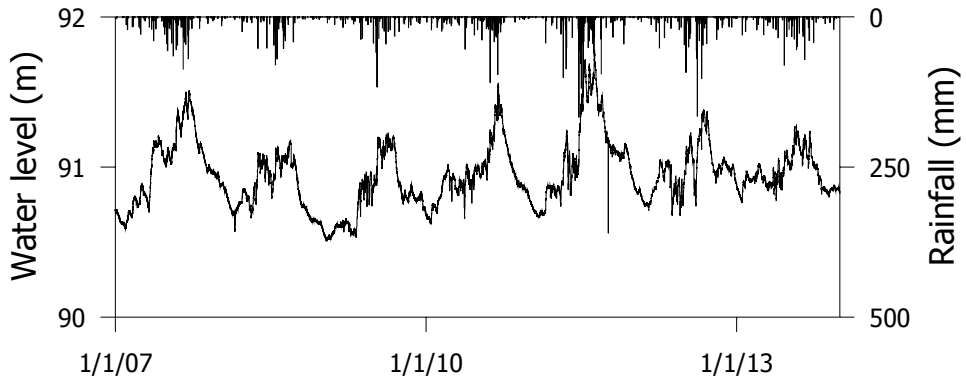


그림 3-5. 연평균 지하수위와 연강수량과의 상관관계

- 금왕1 관측공은 최대상관계수와 지연시간이 각각 0.269와 3일로 상대적으로 높지 않지만, 결정계수는 0.81로 가장 크게 나타남에 따라 분석 기간 전체적으로 강수량의 변화에 따른 지하수위 반응이 가장 민감한 관측소로 나타났다<그림 3-6>. 이러한 결과를 토대로 금왕1 관측공의 경우 기후변화의 영향이 지하수위 변동으로 가장 뚜렷하게 나타날 것으로 예상되는 관측소인 것으로 해석된다.



(a)



(b)

그림 3-6. 금왕1 관측공의 강수량과 지하수위의 상관관계(a) 및 지하수위 시계열 변동(b)

### 3.2.2 관측자료 분석에 의한 변동유형 분류

- 시계열 분석(time-series analysis)은 시간변화에 따라 관측되는 자료를 분석하는 방법으로, 변동 특징이나 경향에 따라 다양한 구분법이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 송성호 등(2007)이 제시한 방법을 이용하여, 시계열 자료의 변동유형을 정상적(constant process), 선형추세(linear trend), 주기적(cyclic variation), 충동적(impulse), 계층적(step function), 경사(ramp) 변화 등 6가지로 구분하였다(그림 3-7).

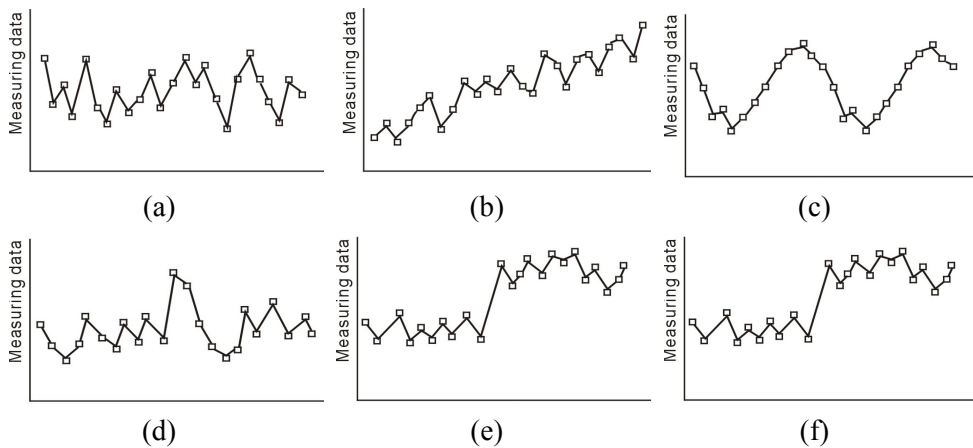


그림 3-7. 시계열 자료의 변동 유형 분류(송성호 등, 2007): (a) 정상적, (b) 선형추세, (c)주기적, (d) 충동적, (e) 계층적, (f) 경사 변화

- 변동 유형 중 정상적 변화의 특징은 시간에 따라 평균과 분산이 일정하게 유지되는 경향을 보여주는 반면, 선형추세변화는 장기적으로 증가 또는 감소하는 형태를 나타낸다. 주기적인 변화는 일정기간동안 나타난 변화가 반복되는 것을 의미하며, 충동적인 변화는 외부적인 요인에 의하여 시계열 자료의 변화가 생기는 것이다. 이외에 계층적인 변화는 특정 시점에서 관측값의 변위가 이동하였다가 이동된 변위에서 다시 정상적으로 변동하는 자료이며 경사변화는 일정하게 유지되다 특정 시점부터 경향성을 나타내는 자료의 변동 형태이다.
- 본 연구에서는 각 관측정별 시계열 자료에 대한 상관분석 결과를 이용하여, 6가지의 변동유형에 대하여 각 유형별로 세부분류를 하였다. 정상

적 변화(A)의 경우 변화폭이 거의 없이 일정한 경우는 Ac, 일반적인 정상형태는 An으로 분류하였다. 또한 관측값의 상승 또는 하강 형태를 보여주는 선형추세 변화(B)와 경사변화(F)는, 각각 상승(u)과 하강(d) 경향에 따라 Bu, Bd, Fu, Fd로 세부 분류하였다. 주기적 변화(C)는 일주기 Cd, 년주기 Cy 및 조석주기 Ct 분류하였다. 충동적 변화(D)는 강우에 의한 영향 Dr, 양수에 의한 영향 Dp, 지표수에 의한 영향 Ds로 세분하였으며, 특별한 영향요인이 없는 경우는 De로 분류하였다. 또한 지하수위의 변동폭 분류는 자연적인 변동의 가장 큰 원인인 강우와 인위적인 변동의 대표적인 양수의 영향 등을 고려하여 2 m로 설정하였다(표 3-5).

표 3-5. 지하수위 관측자료의 유형 분류 기준

변동유형 분류	A 정상형, B 추세형, C 주기형, D 충동형, E 계층형, F 경사형	
세부분류	Ac 일정, An 정상 Bu 상승추세, Bd 하강추세 Cd 일주기, Cy 년주기, Ct 조석주기 Dr 강우, Dp 양수, Ds 지표수, Dt 조석, De 기타 Fu 상승경사, Fd 하강경사	
변동폭 분류	I	지하수위 2 m 이하
		수온 0.2℃ 이하
		전기전도도 500 $\mu$ S/cm 이하
II	변동폭이 I을 초과한 경우	

- 본 연구에서는 각 관측정별 시계열 자료에 대한 상관분석 결과를 이용하여, 53개 관측공을 대상으로 각 변동유형에 대하여 유형 특성별로 세부분류를 하였다(표 3-6).

표 3-6. 관측공별 지하수위의 변동 유형 분류 결과

관측 공	관측 기간	TM좌표		해발 고도(m)	변동 유형	변동폭 분류	변동폭 (m)
		X	Y				
고덕1	0712	201583.0800	391607.2800	17.72	Drp	II	7.68
공주1	0912	207786.4200	330081.5200	11.88	Dr	II	3.37
광주1	0912	222193.0100	433591.4900	46.70	Dr	II	5.45
괴산1	0912	260977.0200	367448.4600	217.41	Drp	I	1.01
금산1	0912	243546.4600	292300.5400	152.65	Drp	II	2.04
금왕1	0712	249524.2200	386072.2900	94.10	Dr	I	1.26
김포1	1012	178925.7200	454442.8500	8.74	Drp	II	3.21
김포2	1012	163937.6900	463931.5300	8.89	Drp	II	2.06
김해1	0412	374380.9500	207837.8600	9.05	Dr	II	3.37
김해2	0412	361291.1900	200074.9900	9.06	Dp	II	11.96
김해3	0612	364306.3600	190217.7500	28.60	Cy	II	5.85
대소1	0712	241197.1500	384230.3400	79.73	Dr	I	1.71
덕산1	0712	302105.0600	380808.9100	242.87	Dr	I	1.48
무안2	0412	152023.2000	166494.5300	42.59	Drp	II	2.81
무안3	0712	136425.5900	181702.6000	0.88	Drp	II	7.33
무안4	0712	147963.0400	160084.7500	20.78	Drp	II	14.49
문막2	0712	268418.0400	419241.9900	52.55	Dr	II	3.61
보성1	0912	212285.2800	134090.5900	4.03	Drp	II	3.63
부론1	0712	266419.0500	414966.8800	49.67	Dr	II	17.73
삼성1	0712	243373.6300	390297.2100	103.34	Drp	II	8.48
상주1	1012	303105.7400	333742.7500	87.17	An	I	0.27
상주2	1012	302957.7400	333641.7500	84.14	Dr	I	1.56
상주3	1012	311364.9400	318012.9900	90.32	Dr	II	4.09
선장1	0612	187676.5200	365030.7600	7.17	Drp	II	3.27
순창1	0912	212698.4100	209955.6700	106.53	Drp	II	2.89
영인1	0612	197334.2500	378382.1200	9.19	Drp	I	1.72
영천2	0812	370162.5100	286603.2100	122.53	Drp	II	7.3
영천3	0812	376022.5200	264639.0000	130.64	Drp	II	9.63
오성1	0712	197541.9000	387199.9100	13.05	Dp	II	3.12
음봉1	0612	207303.3800	377248.9000	25.92	Dp	II	29.91
이천1	0812	244403.6400	422765.8300	44.62	Dr	II	3.13
이천2	0812	245890.7700	400481.7200	74.90	Dr	II	2.78
이천3	0812	256134.3700	400368.6000	66.61	Dr	II	2.4

표 3-6. 관측공별 지하수위의 변동 유형 분류 결과(계속)

관측 공	관측 기간	TM좌표		해발 고도(m)	변동 유형	변동폭 분류	변동폭 (m)
		X	Y				
장수1	1012	246621.5800	238955.4700	415.81	Dr	II	2.02
장안1	0612	184105.2600	397111.6900	10.10	Drp	I	1.12
정읍1	0912	185788.4400	232066.2400	25.00	Dr	I	1.47
제천1	0712	302974.0600	406554.7100	262.21	Dr	II	2.19
줄포1	0612	171413.4200	232032.5200	0.00	Drp	II	4.69
증평1	1012	252468.5800	365176.7200	67.92	Dr	I	1.77
진주1	0812	305092.7500	185318.8800	27.28	Drp	II	8.05
진주2	0812	285295.3000	188826.0500	56.06	Dr	II	26.82
진주3	0812	300188.0500	185992.1900	37.44	Dr	II	23.76
진천1	0912	239029.4800	384535.4700	83.43	Drp	II	2.51
춘천1	0812	264735.0600	490908.4900	85.45	Dr	II	5.96
춘천2	0812	260971.6900	490709.1400	76.81	Dr	I	1.98
평창1	1012	313412.8900	440359.1800	553.80	Dr	II	2.07
평창2	1012	329125.6000	450837.3700	519.67	Dr	I	1.36
하동3	1012	269776.4300	174058.2000	5.71	Dr	II	8.28
하동4	1012	272040.4600	171103.2500	2.31	Dr	II	3.87
현덕1	0712	191728.0100	383725.2000	17.35	Dr	II	3.57
홍천1	1012	282902.7600	461907.5000	202.15	Dr	II	2.97
홍천2	1012	274266.9600	453773.4100	240.14	Dr	I	1.64
횡성1	0912	288082.9900	443499.8600	123.77	Dr	I	1.53

- 지하수위는 지하수 시스템의 변동을 지시하기 때문에, 대수층의 특성을 이해하는 기초자료로 이용된다. 따라서 지하수위 변동 유형을 분류하는 경우 강우, 양수, 조석변화 등의 외부 인자들의 변화에 대한 반응 유형을 분류하는 것이 필요하다. 이때 유형별로 지하수위의 변동폭을 분석하고, 상승 또는 하강 등의 경향성을 세분하는 것이 필요하다.
- (표 3-7)은 각 관측정별 지하수위 변동유형에 따른 분류 결과를 나타낸 표이다. 지하수위의 경우 96.2%가 충동형으로 대부분 양수 또는 강수에 의하여 영향을 받아 변동하고 있으며, 부분적인 영향을 받는 관측정까지 포함하면 비율은 더 높아진다. 특히 강수에 영향을 받는 관측공은

전체 중 54.7%인 29공으로 나타남에 따라, 본 분류 기준에 의하면 대부분의 관측공이 가뭄의 영향을 판단하는데 적합한 관정으로 판단된다.

표 3-7. 관측공의 지하수위 변동 형태 분류 결과

변동 유형 분류	세부 분류	관측공 변동폭 분류				계	
		I		II			
		공수(개)	비율(%)	공수(개)	비율(%)	공수(개)	비율(%)
A	-	1	1.9	0	0	1	1.9
C	Cy	0	0.0	1	1.9	1	1.9
D	Dp	0	0.0	3	5.7	3	5.7
	Dr	10	18.9	19	35.8	29	54.7
	Drp	3	5.7	16	30.2	19	35.8
	소계	13	24.5	38	71.7	51	96.2
계		14	26.4	39	73.6	53	100.0

### 3.3 농촌지역 지하수 장기수위 변화 분석

- 본 연구에서는 최근 지속적으로 발생하고 있는 전국적인 가뭄에 의한 지하수위 변화량을 정량적으로 분석하기 위하여, 2014년 이후 농촌지하수관리 관측망 자료의 지역별 지하수위 변동 특성을 파악하였다.
- 이를 위하여 전국적으로 분포하고 있는 기상관측소에서 관측한 강수량 자료를 30년 평균 월별 강수량(1981-2010)을 기초로 2014년 1월부터 2016년 12월까지 월별 평균 강수량을 비교하였다. 지하수위 변동의 경우는 분석 기간 3년 전인 2011년 말까지 관측자료가 있는 총 74개소[경기(13), 강원(13), 충북(10), 충남(7), 전북(5), 전남(7), 경북(9), 경남(10)]에 대한 최소 3년 월 평균 지하수위 대비 해당 월 평균 지하수위 차이를 분석하였다.

#### 3.3.1 전국 강수량 변화 분석

- 전국적인 강수량 변화는 전국 95개 관측소 중 제주도 4개소 및 도서지역 4개소(백령도, 흑산도, 울릉도, 독도)를 제외한 87개 지점을 대상으로 과거 월별 30년 평균값(1981~2010년)을 배경치로 분석하였다<그림 3-8>.
- 도서를 제외한 내륙지역의 30년 평균 강수량은 도별로 1,148.2~1,502.7 mm(평균 1,327.1 mm) 범위로, 이 중 경북이 가장 낮은 1,148.2 mm(평균 치와의 차이 178.9 mm 낮음)인 반면 경남이 1,502.7 mm(차이 345.5 mm 높음)로 가장 높은 것으로 나타났다(표 3-8).
- 전국 평균 강수량보다 높은 도는 강원(1,390.0 mm), 전남(1,364.7 mm) 및 경남(1,502.7 mm)이며, 낮은 도는 경기(1,310.2 mm), 충북(1,264.8 mm), 충남(1,310.2 mm), 전북(1,325.6 mm) 및 경북(1,148.2 mm)으로 분석되었다.



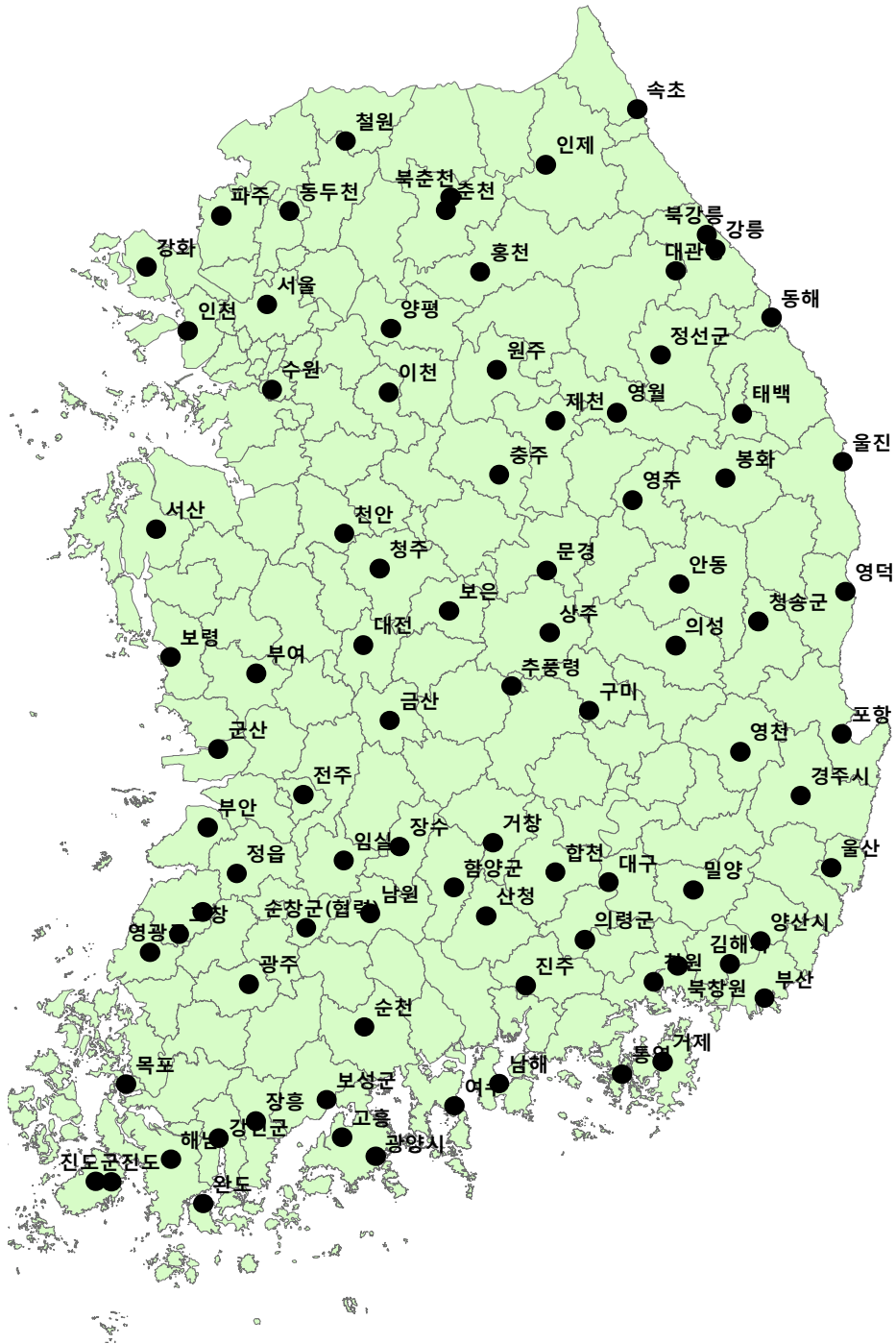


그림 3-8. 내륙지역 기상 관측소 위치도(n=87)

표 3-8. 도별 평균 강수량 분석 결과(1981~2010년)

월	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	19.3	33.4	24.6	27.9	34.6	30.2	33.5	31.2	29.3
2월	22.0	33.7	29.8	31.3	40.6	44.7	35.0	44.8	35.2
3월	40.8	53.4	49.6	50.5	52.8	70.9	52.2	74.6	55.6
4월	65.0	68.3	69.7	72.3	77.3	97.3	69.6	115.7	79.4
5월	97.7	96.3	91.7	95.4	95.0	117.6	89.3	140.1	102.9
6월	125.6	135.8	147.7	159.1	166.3	202.6	137.1	208.0	160.3
7월	352.2	316.5	309.5	294.8	292.1	269.2	235.0	311.4	297.6
8월	319.7	307.3	276.4	295.1	293.5	252.2	228.8	288.1	282.6
9월	158.4	199.8	147.9	153.5	140.4	160.7	151.8	173.7	160.8
10월	47.1	66.2	49.6	51.3	49.4	47.0	44.6	50.8	50.8
11월	43.2	54.0	44.3	50.8	50.5	46.5	43.3	43.4	47.0
12월	19.1	25.3	24.0	28.4	33.1	25.8	28.0	21.0	25.6
계	1,310.2	1,390.0	1,264.8	1,310.2	1,325.6	1,364.7	1,148.2	1,502.7	1,327.1

가. 2014년 강수량 변화 분석

- 2014년 강수량은 도별로 732.1~1,571.2 mm(평균 1,161.1 mm) 범위로, 30년 평년값인 1,327.1 mm와 비교하여 87.5% 수준으로 나타났다. 도별로는 경기도가 가장 낮은 732.1 mm인 반면, 경남이 1,571.2 mm로 가장 높은 것으로 나타났다(표 3-9).
- 전국 평균 강수량과 비교하여 높은 도는 전북(1,281.7 mm), 전남(1,381.7 mm), 및 경남(1,571.2 mm)이며, 낮은 도는 경기(732.1 mm), 강원(1,007.7 mm), 충북(990.3 mm), 충남(1,068.0 mm) 및 경북(1,148.6 mm)으로 분석되었다.
- 2014년 강수량과 30년 평년값의 차이 분석 결과 전국 평균은 -166.0 mm로, 이 중 최저값은 경기의 -578.1 mm이고, 최고는 전남의 +124.4 mm로 나타났다(표 3-10).

표 3-9. 도별 월평균 강수량 분석 결과(2014년)

2014년	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	10.6	23.2	9.1	4.7	8.9	13.9	16.5	7.9	11.9
2월	19.3	75.1	13.7	13.2	4.5	22.1	33.8	28.4	26.3
3월	8.8	32.1	59.9	60.5	95.5	105.9	86.1	130.2	72.4
4월	35.5	90.5	56.0	76.7	79.4	86.8	98.4	111.6	79.4
5월	68.0	35.8	35.3	45.3	47.3	112.1	32.1	89.9	58.2
6월	63.7	66.0	84.9	89.4	74.3	95.7	76.2	68.3	77.3
7월	180.0	127.5	113.7	158.7	224.3	210.6	82.6	177.5	159.4
8월	148.6	260.1	283.8	253.7	400.0	481.6	393.9	628.5	356.3
9월	80.6	138.3	119.3	128.2	104.2	129.6	123.0	121.7	118.1
10월	59.4	106.2	149.6	145.6	106.6	102.9	134.6	130.1	116.9
11월	39.3	43.8	38.8	43.3	80.1	86.3	54.2	63.5	56.2
12월	18.4	9.0	26.2	48.8	56.7	41.6	17.2	13.8	29.0
계	732.1	1,007.7	990.3	1,068.0	1,281.7	1,489.1	1,148.6	1,571.2	1,161.1

표 3-10. 도별 월평균 강수량 대비 2014년 전국 강수량 분석 결과

2014년- 평년값	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	-8.7	-10.2	-15.6	-23.2	-25.7	-16.3	-17.0	-23.3	-17.5
2월	-2.7	41.4	-16.1	-18.1	-36.0	-22.6	-1.1	-16.4	-9.0
3월	-32.0	-21.4	10.3	10.0	42.6	35.0	33.9	55.6	16.8
4월	-29.5	22.3	-13.7	4.3	2.1	-10.6	28.7	-4.0	0.0
5월	-29.7	-60.5	-56.4	-50.1	-47.7	-5.5	-57.2	-50.2	-44.7
6월	-61.9	-69.8	-62.9	-69.7	-92.0	-106.9	-60.9	-139.7	-83.0
7월	-172.3	-189.0	-195.7	-136.1	-67.8	-58.6	-152.5	-133.9	-138.2
8월	-171.1	-47.2	7.4	-41.5	106.5	229.4	165.1	340.4	73.6
9월	-77.8	-61.4	-28.5	-25.3	-36.3	-31.2	-28.7	-52.1	-42.7
10월	12.3	39.9	100.0	94.4	57.1	55.9	89.9	79.3	66.1
11월	-3.9	-10.2	-5.5	-7.5	29.6	39.8	11.0	20.1	9.2
12월	-0.8	-16.3	2.2	20.4	23.7	15.8	-10.9	-7.3	3.4
계	-578.1	-382.4	-274.4	-242.3	-43.9	124.4	0.4	68.5	-166.0

- 전국적으로는 북쪽에 위치한 5개 도[경기(-578.1 mm), 강원(-382.4 mm), 충북(-274.4 mm), 충남(-242.3 mm) 및 전북(-43.9 mm)]에서 평년값보다 적은 강수량 값이 나타났으며, 남쪽에 위치한 3개도[전남(124.4 mm), 경북(0.4 mm), 경남(68.5 mm)]에서는 평균 대비 높은 강수량 분포가 나타났다. 또한 월별 강수량은 최저값이 6월(3개도)과 7월(5개도)로 나타남에 따라 풍수기에 평년값과 대비하여 가장 적은 월 강수량이 나타났다.

#### 나. 2015년 강수량 변화 분석

- 2015년 강수량은 도별로 753.3~1,233.3 mm(평균 931.8 mm) 범위로, 30년 평년값인 1,327.1 mm와 비교하여 70.2% 수준으로 나타났다. 도별로는 2014년과 마찬가지로 경기가 가장 낮은 753.5 mm인 반면, 경남이 1,233.3 mm로 가장 높은 것으로 나타났다(표 3-11).

표 3-11. 도별 월평균 강수량 분석 결과(2015년)

2015년	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	16.8	16.3	21.3	27.7	42.7	36.1	27.5	31.8	27.5
2월	21.6	17.7	28.7	25.7	17.0	36.0	22.8	31.1	25.1
3월	10.2	17.3	40.0	34.8	36.7	52.0	41.8	70.9	38.0
4월	71.3	79.6	94.7	103.7	117.9	212.8	82.3	204.5	120.9
5월	31.7	20.5	26.9	36.5	41.5	118.3	29.8	118.5	53.0
6월	68.9	107.0	78.2	98.4	112.3	124.6	96.0	80.8	95.8
7월	224.9	181.0	170.5	136.3	153.1	195.1	130.5	227.0	177.3
8월	68.7	149.0	72.9	58.3	77.5	141.5	126.2	144.7	104.9
9월	27.2	42.8	30.7	19.4	42.5	84.9	57.3	114.8	52.5
10월	69.4	43.8	76.5	87.5	109.8	73.7	43.2	57.8	70.2
11월	111.2	184.1	108.9	133.2	113.5	102.1	135.5	104.9	124.2
12월	31.3	17.7	37.3	50.4	67.1	56.1	34.3	46.5	42.6
계	753.3	876.8	786.7	811.7	931.6	1,233.2	827.4	1,233.3	931.8

- 전국 평균 강수량과 비교하여 높은 도는 전남(1,233.2 mm), 및 경남(1,233.3 mm)이며, 낮은 도는 경기(753.3 mm), 강원(876.8 mm), 충북(786.7 mm), 충남(811.7 mm), 전북(931.6 mm) 및 경북(827.4 mm)으로 분

석되었다.

- 2015년 강수량과 30년 평년값의 차이 분석 결과 전국 평균은 -395.3 mm로, 이 중 최저값은 경기의 -556.9 mm이고, 최고는 전남의 -131.6 mm로 나타났다(표 3-12).
- 전국적으로는 8개 도[경기(-556.9 mm), 강원(-513.3 mm), 충북(-478.1 mm), 충남(-498.5 mm), 전북(-394.1 mm), 전남(-131.6 mm), 경북(-320.8 mm), 경남(-269.4 mm)] 모두에서 평년값보다 적은 강수량 값이 나타났으며, 월별 강수량은 최저값이 7월(1개도)과 8월(7개도)로 나타남에 따라 풍수기에 평년값과 대비하여 가장 적은 월 강수량이 나타났다.

표 3-12. 도별 월평균 강수량 대비 2015년 전국 강수량 분석 결과

2015년- 평년값	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	-2.5	-17.2	-3.3	-0.2	8.1	5.9	-6.0	0.7	-1.8
2월	-0.4	-15.9	-1.0	-5.6	-23.5	-8.7	-12.1	-13.7	-10.1
3월	-30.6	-36.1	-9.5	-15.7	-16.1	-18.9	-10.3	-3.7	-17.6
4월	6.3	11.4	25.0	31.4	40.6	115.5	12.6	88.9	41.5
5월	-66.0	-75.8	-64.8	-58.9	-53.5	0.7	-59.5	-21.6	-49.9
6월	-56.8	-28.8	-69.5	-60.7	-53.9	-78.0	-41.1	-127.2	-64.5
7월	-127.4	-135.5	-138.9	-158.5	-139.1	-74.0	-104.5	-84.4	-120.3
8월	-251.0	-158.3	-203.5	-236.8	-216.0	-110.7	-102.6	-143.4	-177.8
9월	-131.2	-157.0	-117.2	-134.1	-97.9	-75.8	-94.4	-59.0	-108.3
10월	22.3	-22.5	26.9	36.2	60.3	26.7	-1.4	7.0	19.4
11월	68.1	130.1	64.6	82.5	63.0	55.5	92.2	61.5	77.2
12월	12.3	-7.6	13.3	22.0	34.0	30.3	6.3	25.5	17.0
계	-556.9	-513.3	-478.1	-498.5	-394.1	-131.6	-320.8	-269.4	-395.3

#### 다. 2016년 강수량 변화 분석

- 2016년 강수량은 도별로 967.4~1,730.8 mm(평균 1,243.0 mm) 범위로, 30년 평년값인 1,327.1 mm와 비교하여 93.7% 수준으로 나타났다. 도별로는 2014년 및 2015년과 마찬가지로 경기가 가장 낮은 967.4 mm인 반면, 경남이 1,730.8 mm로 가장 높은 것으로 나타났다(표 3-13).

표 3-13. 도별 월평균 강수량 분석 결과(2016년)

2016년	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	2.3	4.8	8.1	11.2	41.2	47.2	25.7	44.4	23.1
2월	48.8	45.7	47.5	51.8	41.9	55.6	35.2	62.3	48.6
3월	42.3	33.5	29.9	28.9	53.7	87.9	47.6	96.2	52.5
4월	81.0	83.6	130.3	133.6	180.1	227.0	147.9	235.6	152.4
5월	146.3	67.8	77.1	114.1	101.3	127.3	54.8	119.6	101.0
6월	30.0	50.0	43.0	49.3	67.3	132.0	46.7	101.7	65.0
7월	318.8	436.8	382.7	324.5	273.1	216.2	273.0	212.2	304.7
8월	54.6	134.0	74.1	52.9	69.3	42.1	111.5	92.7	78.9
9월	38.2	84.4	104.6	112.0	187.8	240.8	255.4	415.9	179.9
10월	129.1	97.2	111.1	112.9	161.4	182.3	127.0	219.8	142.6
11월	16.3	22.0	27.0	22.7	28.8	70.7	33.7	36.1	32.2
12월	59.7	67.6	44.9	53.2	47.9	67.5	62.2	94.5	62.2
계	967.4	1127.5	1080.3	1067.2	1253.7	1496.5	1220.6	1730.8	1243.0

- 전국 평균 강수량과 비교하여 높은 도는 남부에 위치한 전북(1,253.7 mm), 전남(1,496.5 mm), 및 경남(1,730.8 mm)이며, 낮은 도는 경기(967.4 mm), 강원(1,127.5 mm), 충북(1,080.3 mm), 충남(1,067.2 mm) 및 경북(1,220.6 mm)으로 분석되었다.
- 2016년 강수량과 30년 평년값의 차이 분석 결과 전국 평균은 -84.1 mm로 2014년과 2015년에 비해 감소된 것으로 나타났으며, 이 중 최저값은 경기의 -342.8 mm이고, 최고는 경남의 +228.0 mm로 나타났다(표 3-14).
- 전국적으로는 5개 도[경기(-342.8 mm), 강원(-262.5 mm), 충북(-184.4 mm), 충남(-243.1 mm), 전북(-71.9 mm)]에서 평년값보다 적은 강수량 값이 나타났으며, 3개 도[전남(+131.7 mm), 경북(+72.4 mm), 경남(+228.0 mm)]에서 높은 것으로 분석되었다. 또한 월별 강수량은 최저값이 8월(8개도)로 나타남에 따라 풍수기에 평년값과 대비하여 가장 적은 월 강수량이 나타났다.

표 3-14. 도별 월평균 강수량 대비 2016년 전국 강수량 분석 결과

2016년- 평년값	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	-17.0	-28.6	-16.5	-16.8	6.6	17.0	-7.8	13.2	-6.2
2월	26.8	12.0	17.7	20.6	1.3	10.9	0.2	17.5	13.4
3월	1.5	-19.9	-19.6	-21.6	0.8	17.0	-4.6	21.5	-3.1
4월	16.0	15.4	60.6	61.3	102.8	129.7	78.3	119.9	73.0
5월	48.7	-28.5	-14.6	18.8	6.3	9.6	-34.5	-20.5	-1.8
6월	-95.6	-85.8	-104.7	-109.8	-99.0	-70.5	-90.4	-106.3	-95.3
7월	-33.5	120.3	73.2	29.7	-19.0	-53.0	38.0	-99.2	7.1
8월	-265.1	-173.3	-202.4	-242.2	-224.2	-210.1	-117.3	-195.4	-203.8
9월	-120.1	-115.4	-43.3	-41.5	47.4	80.1	103.6	242.1	19.1
10월	81.9	30.9	61.5	61.7	111.9	135.3	82.3	169.0	91.8
11월	-26.9	-32.0	-17.3	-28.1	-21.7	24.2	-9.5	-7.3	-14.8
12월	40.6	42.3	20.9	24.8	14.8	41.7	34.1	73.5	36.6
계	-342.8	-262.5	-184.4	-243.1	-71.9	131.7	72.4	228.0	-84.1

### 3.3.2 농촌지하수관리 관측망을 이용한 지하수위 변화 분석

- 전국적인 지하수위 변화는 분석 기간 3년 전인 2011년 말까지 관측자료가 있는 총 74개소[경기(13), 강원(13), 충북(10), 충남(7), 전북(5), 전남(7), 경북(9), 경남(10)]를 대상으로, 3~7년 동안의 월 평균 지하수위 대비 해당 월 평균 지하수위 차이를 분석하는 방법을 이용하여 가뭄에 따른 지하수위 변동(fluctuation)을 분석하였다<그림 3-9>.
- 분석 방법은 각 관측공별로 12시 기준의 일 자료를 이용하여 2011년까지 3년 이상 관측결과의 월평균 지하수위에 대한 해당월의 평균 지하수위의 차이를 계산한 후, 각 도별로 해당관정들로부터 계산된 평균값을 합산하여 제시하였다.

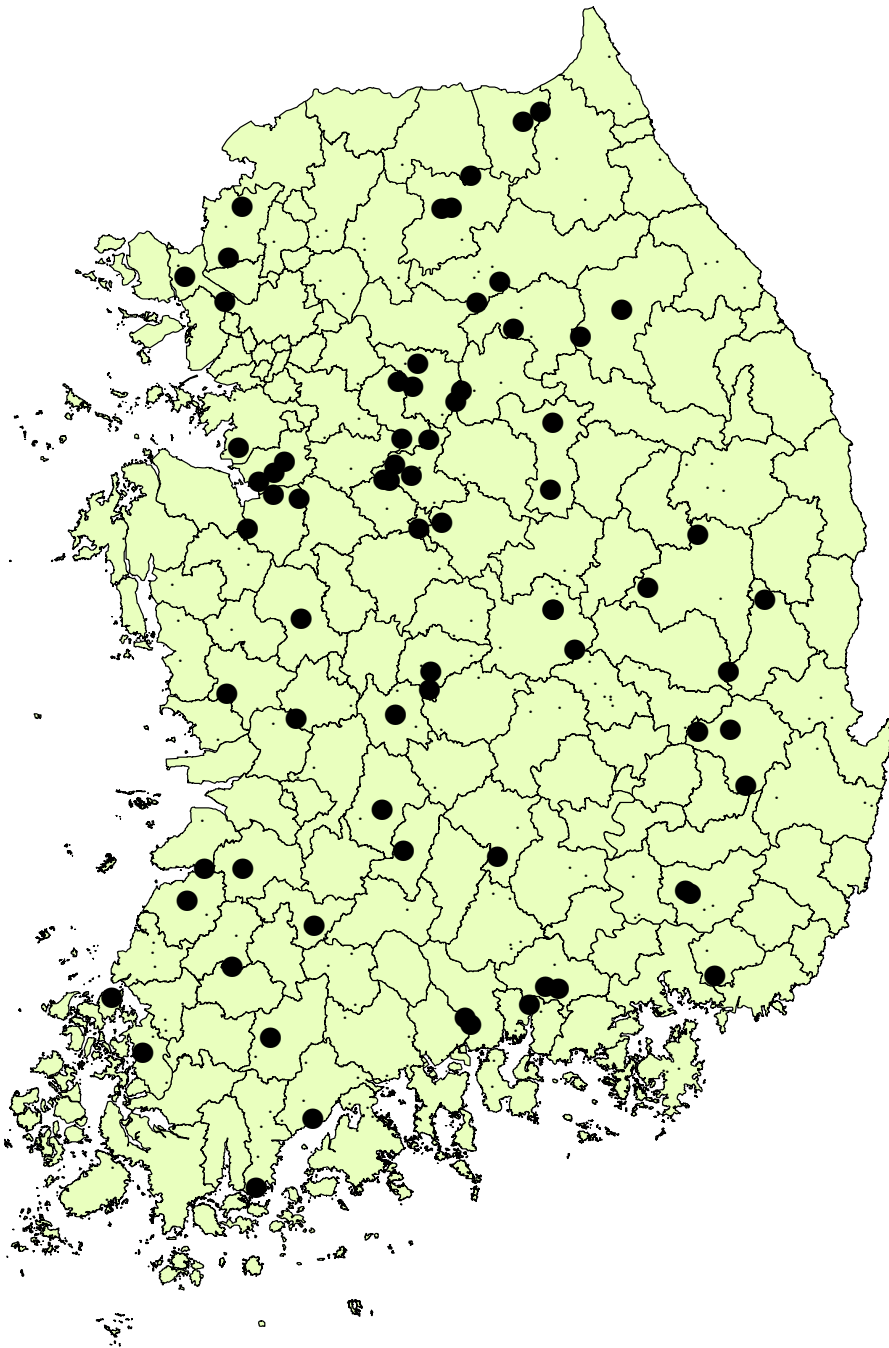


그림 3-9. 분석에 이용된 농촌지하수관리 관측망 위치도(n=74)



가. 2014년 지하수위 변화 분석

- 2014년의 전국적인 지하수의 변화는 예년 평균 대비 0.13 m 하강하였으며, 도별로는 경기도가 0.34 m로 가장 큰 하강 폭을 나타낸 반면 경상남도의 경우에는 0.16 m 상승한 것으로 나타났다(표 3-15).
- 이러한 경기도의 지하수위 하강 결과는 앞서 분석된 강수량 결과에서 나타난 경기도의 가뭄과 직접적인 상관성이 나타나며, 연평균 강수량 대비 2014년 강수량 감소가 가장 큰(55.9%) 지역적인 특성이 반영된 것으로 분석된다.
- 특히 7월과 8월의 강수량 부족이 지하수위가 0.78 m와 0.51 m 하강한 결과는, 해당 월의 강수량이 예년 평균의 45.5~51.1% 감소가 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 이러한 결과는 강수량 감소가 두 번째로 큰 강원도에서 동일하게 나타났으며, 예년 강수량 대비 2014년 강수량 증가가 관측된 경상남도의 경우에는 다른 지역 모두에서 지하수위가 하강한 반면 지하수위가 유일하게 상승한 결과를 직접적으로 반영한 결과로 나타났다.

표 3-15. 도별 월평균 지하수위 대비 2014년 지하수위 변화 분석 결과

2014년- 평년값	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	-0.14	0.00	0.07	0.18	-0.02	0.06	-0.41	-0.42	-0.09
2월	-0.19	0.05	0.03	0.12	-0.09	-0.01	-0.53	-0.42	-0.13
3월	-0.30	-0.05	-0.15	0.02	-0.11	-0.21	-0.54	-0.38	-0.22
4월	-0.45	-0.13	-0.15	-0.67	-0.12	-0.53	-0.29	-0.24	-0.32
5월	-0.48	-0.25	-0.21	-0.35	-0.07	-0.39	-0.42	-0.18	-0.29
6월	-0.43	-0.21	-0.16	0.16	-0.11	-0.22	-0.05	-0.14	-0.15
7월	-0.78	-0.67	-0.35	-0.85	-0.23	-0.41	-0.74	-0.29	-0.54
8월	-0.51	-0.41	-0.24	0.19	-0.23	0.15	0.02	0.44	-0.07
9월	-0.27	-0.30	-0.30	-0.06	-0.14	-0.02	-0.26	0.54	-0.10
10월	-0.25	-0.19	-0.26	-0.01	-0.02	0.10	0.02	0.77	0.02
11월	-0.09	-0.15	-0.07	0.07	-0.09	0.12	0.29	0.99	0.13
12월	-0.19	-0.17	-0.10	0.03	0.10	0.21	0.13	1.50	0.19
계	-0.34	-0.21	-0.16	-0.10	-0.09	-0.10	-0.23	0.18	-0.13

나. 2015년 지하수위 변화 분석

- 2015년의 전국적인 지하수의 변화는 예년 평균 대비 0.07 m 하강하였으며, 도별로는 경기도와 충청북도가 각각 0.30 m로 가장 큰 하강 폭을 나타낸 반면 경상남도의 경우에는 0.83 m 상승한 것으로 나타났다(표 3-16).
- 이러한 경기도의 지하수위 하강 결과는 2014년 분석 결과와 마찬가지로 앞서 분석된 강수량 결과에서 나타난 경기도의 가뭄과 직접적인 상관성이 나타나며, 연평균 강수량 대비 2015년 강수량 감소가 가장 큰(57.5%) 지역적인 특성이 반영된 것으로 분석된다.
- 특히 7월, 8월과 9월의 경우 강수량 부족에 따른 지하수위는 경기도의 경우 0.36~0.50 m, 강원도 0.39~0.54 m, 충청남도 0.60~0.87 m 범위로 급격하게 하강한 결과와 직접적인 연관이 있는 것으로 판단되며, 해당 월의 강수량이 예년 평균 대비 12.6~68.8% 감소의 영향으로 해석된다.

표 3-16. 도별 월평균 지하수위 대비 2015년 지하수위 변화 분석 결과

2015년- 평년값	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	-0.21	-0.17	0.03	0.14	0.15	0.03	0.15	1.47	0.20
2월	-0.38	-0.17	-0.01	0.11	0.06	-0.05	0.74	1.60	0.24
3월	-0.40	-0.23	-0.08	-0.01	-0.07	-0.04	0.02	0.96	0.02
4월	-0.23	-0.15	-0.04	0.11	0.03	-0.31	0.17	0.88	0.06
5월	-0.15	-0.22	-0.18	-0.67	-0.21	-0.18	-0.19	0.78	-0.13
6월	-0.26	-0.23	-0.28	-0.07	0.01	-0.05	-0.65	0.64	-0.11
7월	-0.50	-0.47	-0.24	-0.87	-0.12	0.07	-0.25	0.45	-0.24
8월	-0.36	-0.39	-0.33	-0.69	-0.12	-0.33	-0.66	0.26	-0.33
9월	-0.47	-0.54	-0.77	-0.60	-0.13	-0.61	-0.57	0.55	-0.39
10월	-0.51	-0.29	-0.96	-0.37	0.08	-0.27	-0.74	0.66	-0.30
11월	-0.20	0.26	-0.45	-0.17	0.21	-0.09	-0.22	0.62	0.00
12월	0.01	0.38	-0.25	0.00	0.25	0.09	-0.03	1.13	0.20
계	-0.30	-0.19	-0.30	-0.26	0.01	-0.15	-0.19	0.83	-0.07

- 반면 예년 강수량 대비 2015년 전국적인 강수량 감소가 관측되었지만, 전라북도와 경상남도의 경우에는 지하수위가 각각 0.01 m와 0.83 m 상승한 결과가 나타났다. 이러한 결과는 관측공 위치별로 대수층의 조건에 따라 강수에 따른 대수층의 함양 조건 차이에 따라 발생되며, 이 결과는 본 연구에서 시도하고 있는 지하수위를 이용한 농업가뭄 예·경보 인자로 활용될 예정이다.

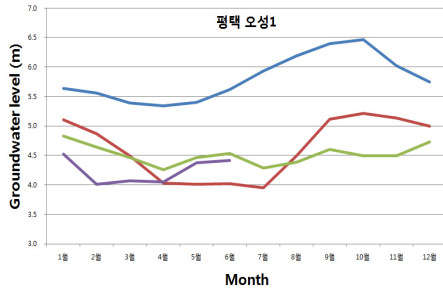
다. 2016년 지하수위 변화 분석

- 2016년의 전국적인 지하수의 변화는 예년 평균 대비 0.02 m 하강하였으며, 도별로는 가뭄이 심각했었던 충청남도, 경상북도 및 경기도가 각각 0.53 m, 0.44 m 및 0.39 m로 큰 하강 폭을 나타낸 반면 전라북도, 전라남도 및 경상남도의 경우에는 각각 0.14 m, 0.04 m 및 1.52 m 상승한 것으로 나타났다(표 3-17).

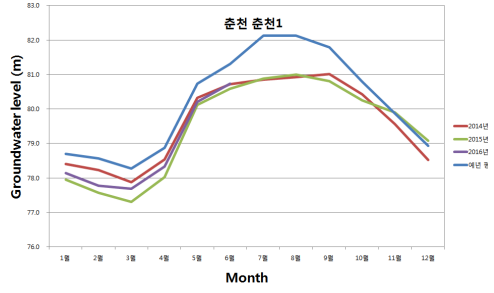
표 3-17. 도별 월평균 지하수위 대비 2016년 지하수위 변화 분석 결과

2016년- 평년값	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	평균
1월	-0.01	0.02	-0.24	0.15	0.15	0.07	-0.23	0.83	0.09
2월	-0.08	-0.16	-0.33	0.08	0.16	0.14	0.28	1.61	0.21
3월	-0.09	-0.07	-0.28	-0.20	0.15	0.14	-0.30	1.46	0.10
4월	-0.27	-0.15	-0.36	-0.06	0.41	0.25	-0.13	1.62	0.16
5월	-0.23	-0.18	-0.21	-0.26	0.38	0.51	-0.07	1.36	0.16
6월	-0.31	-0.23	-0.46	-0.77	0.09	0.49	-0.49	1.27	-0.05
7월	-0.43	-0.01	-0.21	-0.57	0.03	0.26	-0.64	1.01	-0.07
8월	-0.52	-0.36	-0.45	-2.45	-0.22	-0.53	-1.97	0.74	-0.72
9월	-0.70	-0.46	-0.64	-1.04	-0.17	-0.77	-0.64	1.49	-0.37
10월	-0.66	-0.41	-0.33	-0.52	0.34	-0.03	-0.27	1.89	0.00
11월	-0.71	-0.36	-0.01	-0.50	0.22	0.01	-0.38	3.00	0.16
12월	-0.64	-0.16	-0.28	-0.25	0.11	-0.03	-0.50	1.97	0.03
계	-0.39	-0.21	-0.32	-0.53	0.14	0.04	-0.44	1.52	-0.02

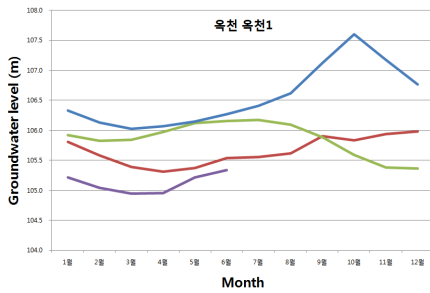
- 이러한 충남 서북부, 경북 내륙 및 경기 남부지역을 중심으로 광범위하게 발생한 지하수위 하강 결과는 2014년 및 2015년 분석 결과와 마찬가지로 앞서 분석된 강수량 결과에서 나타난 가뭄과 직접적인 상관성이 나타나며, 연평균 강수량 대비 2016년 강수량 감소가 가장 큰 지역적인 특성이 반영된 것으로 분석된다.
- 특히 6~9월 경우 남부지방을 제외한 중부와 북부지역의 강수량 부족에 따른 지하수위는 경기도의 경우 0.31~0.70 m, 충청북도 0.21~0.64 m, 충청남도 0.57~2.64 m 범위로 급격하게 하강한 결과와 직접적인 연관이 있는 것으로 판단되며, 특히 충청남도의 경우에는 서북부지역에서의 극심한 가뭄으로 지하수위 하강이 2.45 m 하강이라는 기록적인 관측 결과가 나타났다.
- 따라서 국내 농업용 관정의 경우 가뭄발생에 따른 영향이 직접적으로 미치는 것으로 나타남에 따라, 지하수 대수층 특성에 따른 농업가뭄의 영향을 정량적으로 분석하여 이에 대한 정책적인 대비가 필요할 것으로 판단된다.
- 반면 예년 강수량 대비 2016년 일부지역에서의 기록적인 강수량 감소로 지하수위의 급격한 하강이 나타났지만, 전라북도, 전라남도 및 경상남도의 경우에는 지하수위가 각각 0.14 m, 0.04 m 및 1.52 m 상승한 결과가 나타났다.
- <그림 3-10>은 각 도별 대표 관측정의 과거 월평균 지하수위에 대한 2014~2016년 기간 중의 월평균 지하수위를 도시한 결과로, 경기도, 강원도, 충청북도 및 충청남도의 경우 3년 간(2014~2016년)의 가뭄기간 중 지하수위는 예년 월평균에 비해 지속적으로 낮게 관측되고 있음을 알 수 있다.



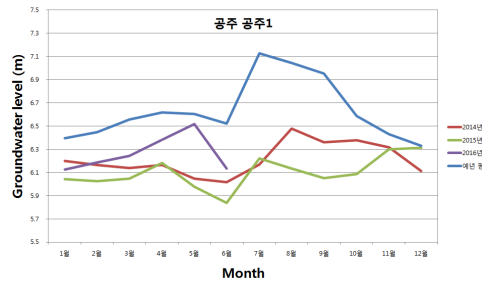
(a) 경기 평택 오성1



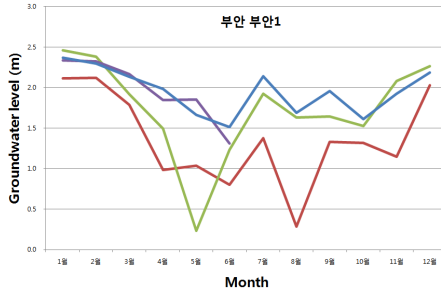
(b) 강원 춘천 춘천1



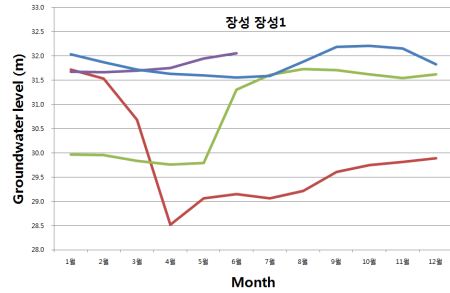
(c) 충북 옥천 옥천1



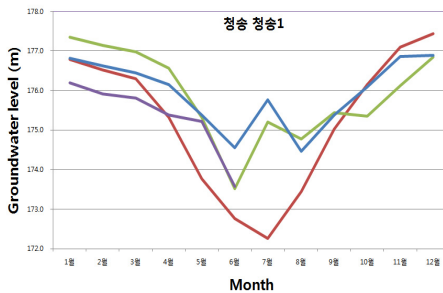
(d) 충남 공주 공주1



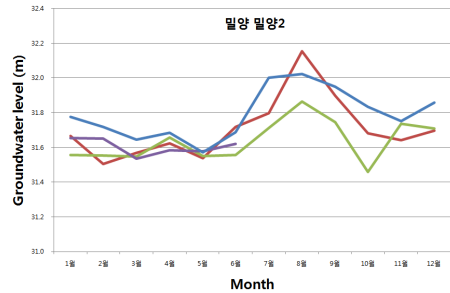
(e) 전북 부안 부안1



(f) 전남 장성 장성1



(g) 경북 청송 청송1



(h) 경남 밀양 밀양2

그림 3-10. 도별 대표 관측정의 가뭄 기간 중의 지하수위 변화



# Chapter 04

## 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발

4.1 | 수문 관측자료의 시계열 분석

4.2 | 지하수 공급능력 평가 모델 개발





## 4. 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발

### 4.1 수문 관측자료의 시계열 분석

#### 4.1.1 수문 관측자료

- 본 연구에서는 강수에 대한 지표수 및 지하수의 반응이 어떤 차이를 보이는지 분석하기 위하여, 최근 가뭄 발생이 빈번한 충청남도 지역을 대상으로 강수량과 댐, 저수지의 저수율, 하천수위 및 지하수위와의 시계열 상관분석을 수행하였다. 분석에 이용된 관측소는 강수량 11개소, 저수지 저수율 20개소, 댐 수위 5개소, 하천수위 3개소 지하수위 8개소이다(표 4-1).
- 11개소 기상관측소에서 1997년부터 2016년까지 20년 동안 관측된 강수량 시계열 자료를 이용하여 기상학적 가뭄을 평가하였다. 강수량은 지표수 및 지하수 관측소와 가장 가까운 기상관측소의 시계열 자료를 이용하였다. 부여군, 서산시, 보령시, 금산군, 군산시 및 천안시의 강수량 자료는 저수지 저수율 및 지하수위와 비교하는데 이용하였으며, 보령댐, 대청댐, 소양강댐, 춘천댐 및 춘천시의 강수량 자료는 댐 수위, 하천수위 및 지하수위와 비교하는데 이용하였다.
- 저수지 저수율 분석을 위하여 한국농어촌공사에서 관리하는 충남지역 저수지 20개소에서 1997년부터 2016년까지 20년 동안 관측된 시계열 자료를 이용하였다<그림 4-1>. 댐 수위 및 하천수위의 경우 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)의 시계열 자료를 이용하였다. 한강유역 및 금강유역에 위치한 5곳의 댐 수위 자료를 분석에 이용하였으며<그림 4-2>, 한강에 위치한 3개소 관측소의 하천수위 자료를 분석에 이용하였다.
- 지하수위 분석에는 국가지하수 관측망의 3개 관측소(춘천(우두), 가평(가평), 충주(가금))와 농촌지하수관리 관측망 14개소<그림 4-1> 중, 2010년 이전의 자료를 포함하는 5개소(공주(우성), 금산(금성), 아산(선장), 아산(영인), 아산(음봉)) 등 총 8개소의 시계열 관측 자료를 이용하였다. 국가지하수 관측망 3개소의 경우 1997년부터 2016년까지 20년 동안 관측된 지하수위 시계열 자료를 이용하였으며, 농촌지하수관리 관측망 5개소 중 2개소(공주우성, 금산금성)는 2009년부터 2016년까지 8년

동안 관측된 시계열 자료, 나머지 3개소(아산선장, 아산영인, 아산음봉)는 2006년부터 2016년까지 11년 동안의 시계열 자료를 이용하였다.

표 4-1. 충남지역 관측 자료별 관측소 개수 및 관측소명

관측자료	관측소 개수	관측소 이름
강수량	11	보령댐, 대청댐, 소양강댐, 충주댐, 춘천시, 부여군, 서산시, 보령시, 금산군, 군산시, 천안시
저수지 저수율	20	공주(우목), 공주(한천), 부여(상천), 청양(적누), 보령(성연), 보령(신구), 보령(옥서), 보령(진죽), 청양(매산), 청양(수정), 청양(화암), 금산(화림), 논산(강청), 서천(축동), 아산(동암), 아산(상성), 아산(성내), 아산(신희), 아산(월량), 아산(죽산)
댐 수위	5	보령댐, 대청댐, 소양강댐, 충주댐, 의암댐
하천수위	3	춘천, 가평, 목계
지하수위	8	춘천(우두), 가평(가평), 충주(가금), 공주(우성), 금산(금성), 아산(선장), 아산(영인), 아산(음봉)

#### 4.1.2 표준강수지수를 이용한 지표수 수문 분석

- 강수에 대한 지표수 및 지하수의 반응을 살펴보기에 앞서 강수량 누적 기간(accumulation period: AP)에 따른 표준강수지수(standard precipitation index: SPI)의 변화를 분석하였다. SPI는 가뭄의 정도를 평가 및 예측하기 위해 널리 사용되는 지표로서, 일강수량 시계열 자료의 확률분포를 정규화하여 표현한 수치이다. <그림 4-3>은 AP가 3개월(SPI-3), 6개월(SPI-6), 12개월(SPI-12)일 경우, 보령지역의 SPI 변화를 보여준다. SPI-3과 SPI-6의 경우, SPI가 주로 우기인 여름철 양의 값을 보이고 건기인 겨울철 음의 값을 보여 강수의 계절적 변화가 잘 나타났다.

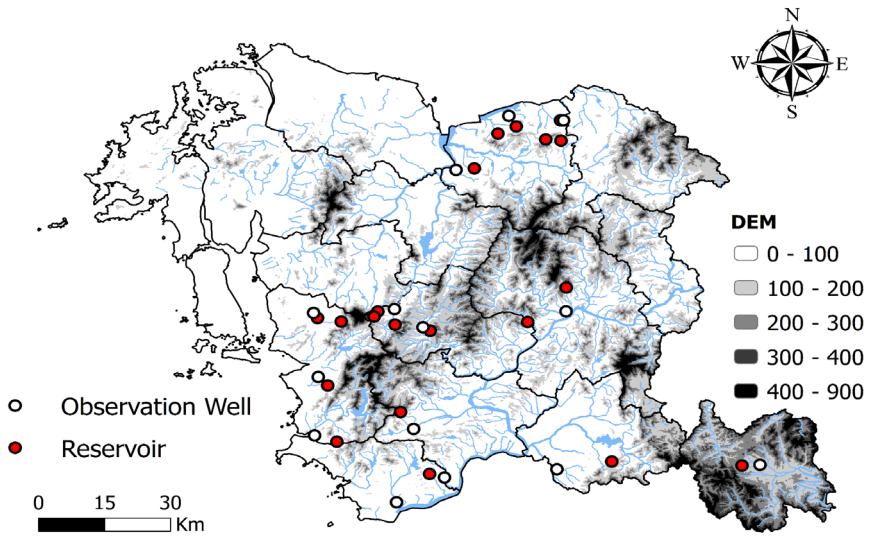


그림 4-1. 충남지역 농촌지하수관리 관측망(14개소) 및 저수지 (20개소) 위치도



그림 4-2. 충남지역 댐 수위 관측소 위치

- 가뭄이 발생했던 2014년~2016년의 SPI-3과 SPI-6을 살펴보면 우기에 나타나는 양의 상승 곡선이 매우 약해지면서, 전체적으로 연주기 변동폭이 줄어든 것을 볼 수 있다. 한편 SPI-12의 경우 가뭄기간 내내 음의 값을 보이면서 가뭄기간 중에 SPI의 최저값이 나타남에 따라, SPI-12에서 장기가뭄이 잘 표현되는 것으로 확인되었다.

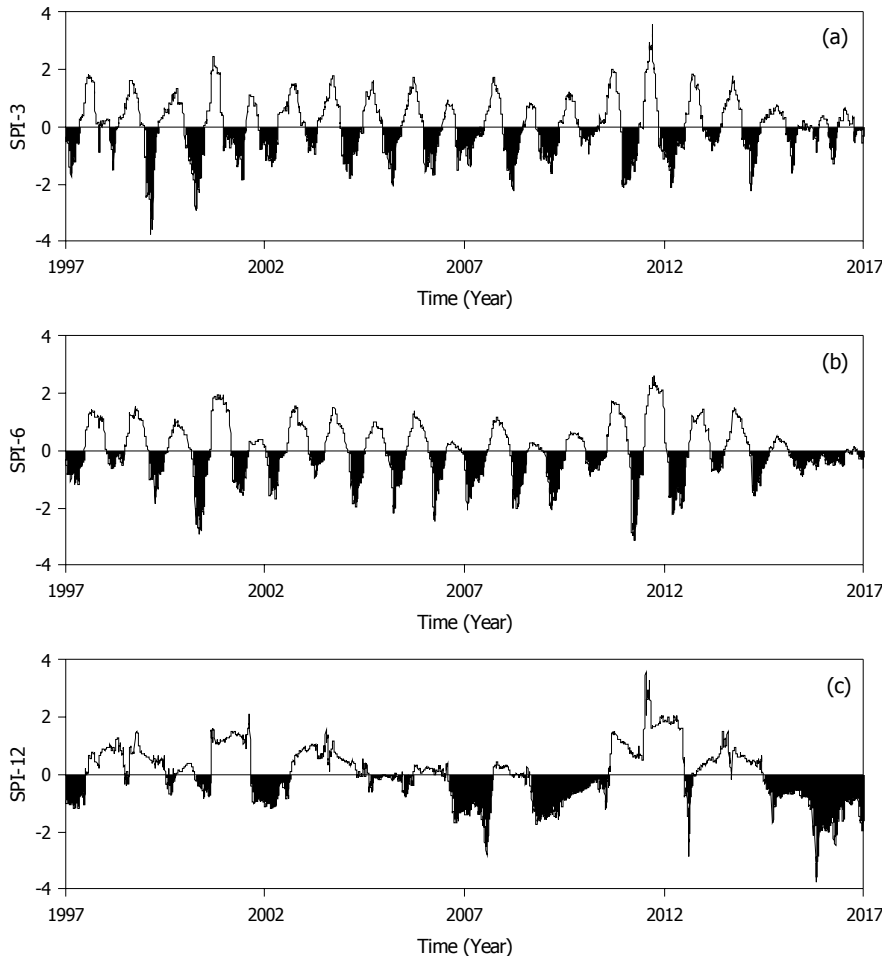


그림 4-3. 보령지역 SPI 변화: AP (a) 3개월, (b) 6개월, (c) 12개월

#### 4.1.3 SPI와 수문 시계열 자료 비교

- 기상학적 가뭄이 지표수 및 지하수의 저수량 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 2014년~2016년의 가뭄이 가장 잘 나타난 SPI-12와 수문 시계열 자료를 비교하였다.

가. SPI-12와 저수지 저수율

- <그림 4-4>는 저수지가 위치한 지역의 강수량 자료를 이용하여 계산된 SPI-12와 저수지 저수율의 시계열 변화를 도시하여 비교한 것이다. 공주(우목), 공주(한천), 부여(상천), 청양(적누) 저수지는 부여에서 관측된 강수량의 SPI와 비교하였으며, 보령(성연) 저수지는 서산의 강수량 자료와 비교하였다. 보령(신구), 보령(옥서), 보령(진죽), 청양(매산), 청양(수정), 청양(화암) 저수지는 보령의 강수량, 아산(동암), 아산(상성), 아산(성내), 아산(신휴), 아산(월량)과 아산(죽산) 저수지는 천안의 강수량, 금산(화림)과 논산(강청) 저수지는 금산의 강수량, 서천(축동) 저수지는 군산의 강수량 자료와 비교하였다.

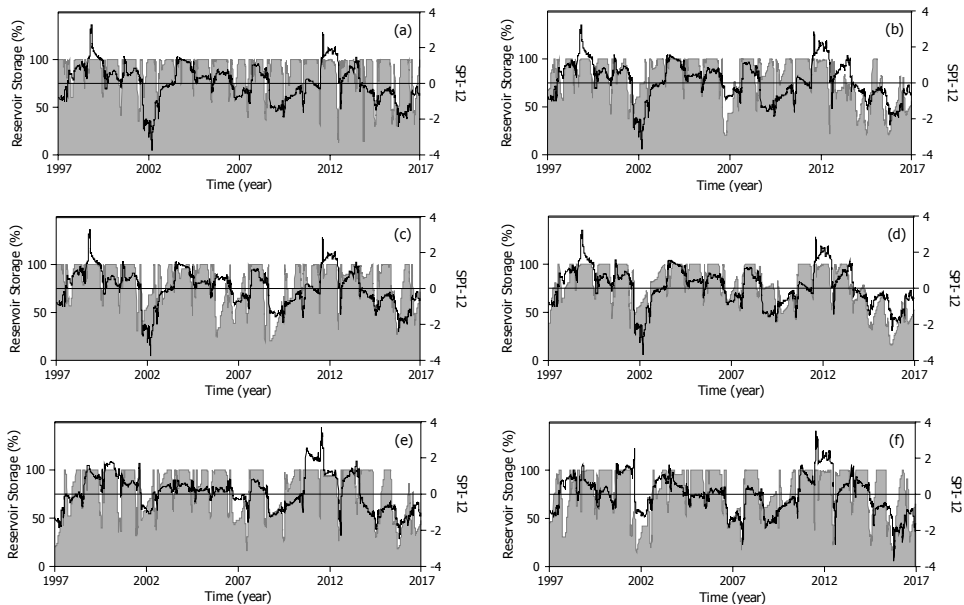


그림 4-4. 저수지 저수율과 SPI-12 비교: (a) 공주(우목), (b) 공주(한천), (c) 부여(상천), (d) 청양(적누), (e) 보령(성연), (f) 보령(신구), (g) 보령(옥서), (h) 보령(진죽), (i) 청양(매산), (j) 청양(수정), (k) 청양(화암), (l) 금산(화림), (m) 논산(강청), (n) 서천(축동), (o) 아산(동암), (p) 아산(상성), (q) 아산(성내), (r) 아산(신휴), (s) 아산(월량), (t) 아산(죽산)

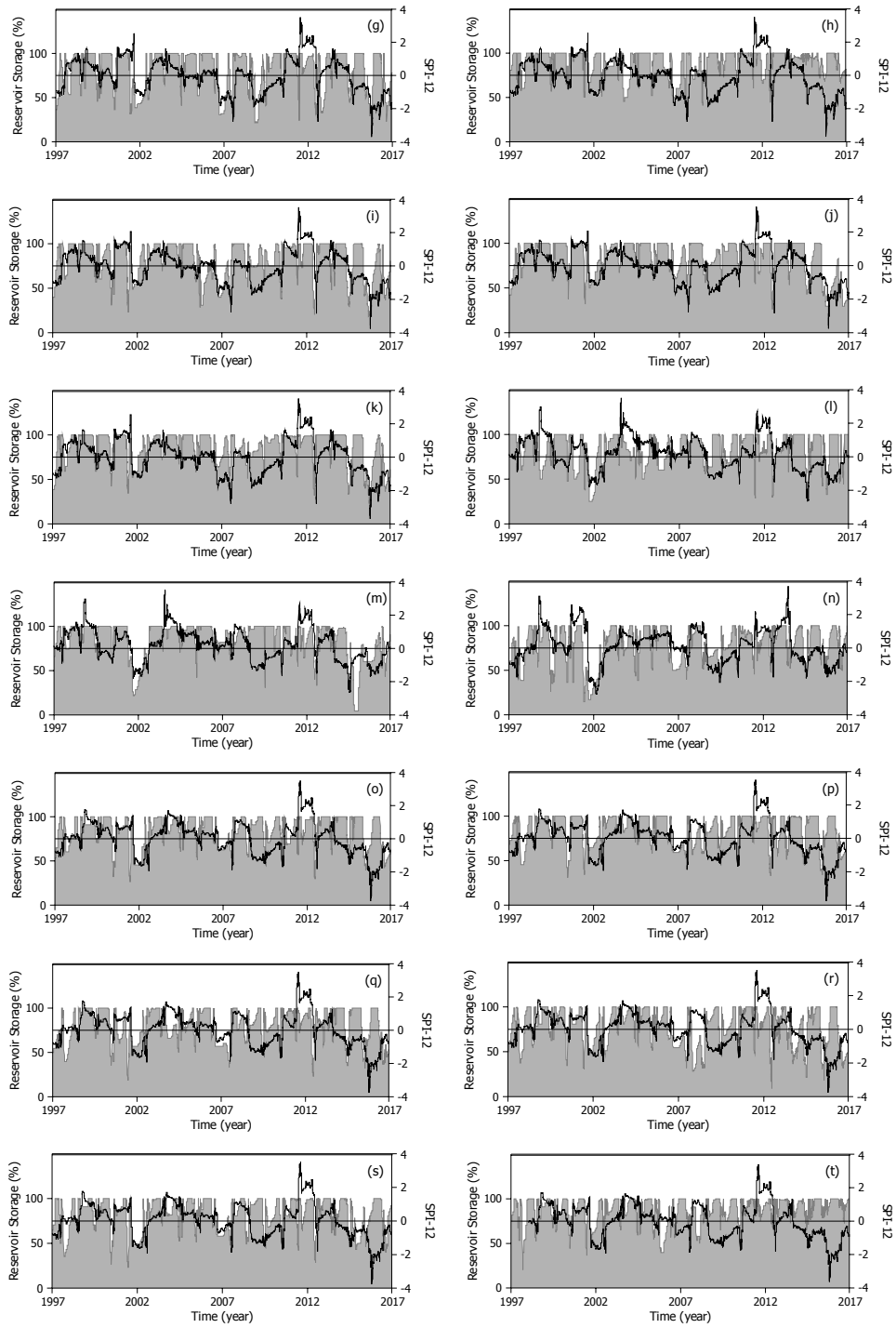


그림 4-4. 저수지 저수율과 SPI-12 비교(계속)

- 농업용수를 공급하기 위해 축조된 저수지의 경우, 저수지 저수율은 농번기인 5월~7월 사이 농업용수 사용으로 인해 감소하는 것으로 나타났다. 저수지 저수율의 변화폭은 SPI-12에 비해 대체적으로 작았지만 가뭄 시기에 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다.
- 관측소별로는 공주(우목), 보령(진죽) 및 아산(죽산) 저수지의 경우(A그룹)는 SPI-12에 따른 저수율의 변화는 거의 나타나지 않았으며, 매년 거의 일정한 연변화를 보였다<그림 4-4(a)><그림 4-4(h)><그림 4-4(t)>.
- 공주(한천), 청양(적누), 보령(성연), 청양(수정) 및 논산(강청) 저수지의 경우(B그룹)는 SPI-12에 따른 저수율 변동이 잘 관측되었으며, 특히 2014년~2016년의 장기 가뭄 동안 저수율이 크게 감소한 것으로 나타났다<그림 4-4(b)><그림 4-4(d)><그림 4-4(e)><그림 4-4(j)><그림 4-4(m)>.
- 한편, 부여(상천), 보령(신구), 보령(옥서), 청양(매산), 청양(화암), 금산(화림), 서천(축동), 아산(동암), 아산(상성), 아산(성내), 아산(신희) 및 아산(월랑) 저수지의 경우(C그룹)에는 SPI-12에 따른 저수율의 변화가 비교적 잘 관측되었으나, 2014년~2016년의 장기 가뭄에도 저수율이 크게 떨어지지 않아 B그룹의 저수지와 비교할 때 장기 가뭄에 상대적으로 덜 취약한 것으로 나타났다<그림 4-4(c)><그림 4-4(f)><그림 4-4(g)><그림 4-4(i)><그림 4-4(k)><그림 4-4(l)><그림 4-4(n)><그림 4-4(o)><그림 4-4(p)><그림 4-4(q)><그림 4-4(r)><그림 4-4(s)>.

#### 나. SPI-12와 댐 수위

- <그림 4-5>는 대청댐, 보령댐, 소양강댐, 의암댐 및 충주댐의 수위와 해당 지역 강수량의 SPI-12를 비교한 것으로, 댐 수위는 저수지와 같이 연주기의 주기적인 변동이 잘 관측되었다. 그러나 다목적댐은 홍수조절, 수력발전, 관개, 상수 및 공업용수 공급 등 다양한 목적으로 이용되므로, 농번기 농업용수 공급에 주로 이용되는 저수지와는 상이한 연주기 변동 패턴을 보였다.
- 특히, 의암댐의 경우 전력생산을 목적으로 건설된 발전용 댐으로 다른 다목적댐과는 수량관리 방식이 달라 매우 특징적인 수위 변동이 나타났다. 의암댐을 제외한 4개의 다목적댐의 경우 SPI-12와 유사한 시계열 변화를 보여 장기 가뭄에 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다.

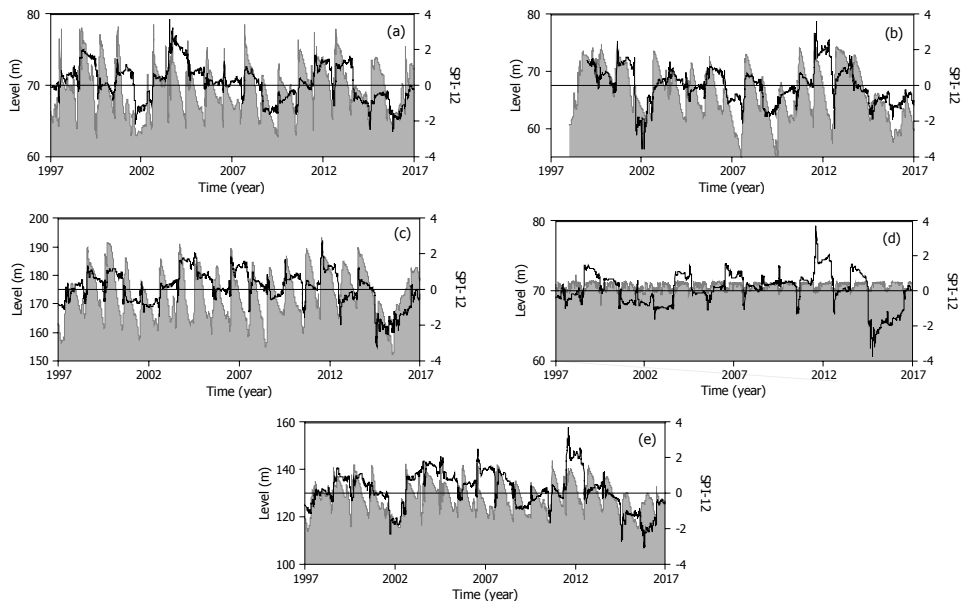


그림 4-5. 댐 수위와 SPI-12 비교: (a) 대청댐, (b) 보령댐, (c) 소양강댐, (d) 의암댐, (e) 충주댐

#### 다. SPI-12와 하천수위

- <그림 4-6>은 국내 3개 하천관측소에서 측정된 하천수위와 해당 지역 강수량의 SPI-12를 비교한 것으로, 하천수위는 소양강댐 하루 소양강의 춘천관측소(관측소코드 1013637), 북한강의 지류인 가평천의 가평관측소(관측소코드 1013655), 충주댐 하루 남한강의 목계관측소(관측소코드 1005640)에서 각각 관측된 자료이다.
- 앞서 살펴본 저수지 및 댐 수위와 달리 하천수위는 강수에 의해 급격히 상승하였다가 하강하는 단기적인 변동이 잘 관측되었다. 소양강댐 하루에 위치한 춘천관측소의 경우<그림 4-6(a)>는 하천수위 변동이 댐 방류량에 지배적인 영향을 받으며, 장기 가뭄의 영향은 잘 나타나지 않았다. 한편, 상류에 댐이 위치하지 않는 가평천(가평관측소)의 경우<그림 4-6(b)>에는 유출량이 조절되지 않는 국내 자연 하천에서 관측되는 특징적인 하천수위 감수곡선이 잘 나타났다. 즉, 개별 강수사상에 대한 수위 상승반응이 뚜렷하며, 장기 가뭄 시기에는 상승 피크가 약해지며 저수위도 평년에 비해 떨어지는 SPI-12와의 동조화 현상이 잘 나타났다.



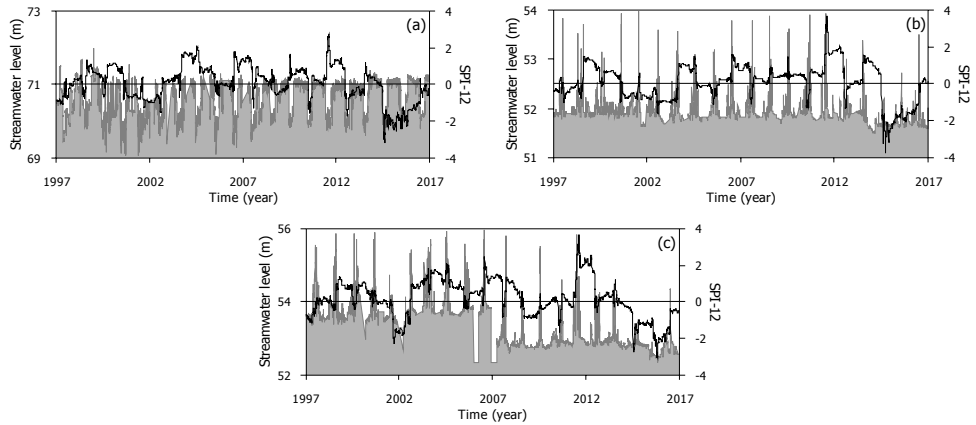


그림 4-6. 하천수위와 SPI-12 비교: (a) 소양강(춘천관측소), (b) 가평천(가평 관측소), (c) 남한강(목계관측소)

#### 라. SPI-12와 지하수위

- <그림 4-7>은 지하수위와 해당 지역 강수량의 SPI-12를 비교한 것으로, 춘천(우두), 가평(가평), 충주(가금), 공주(우성), 금산(금성) 관측소의 지하수위는 각각 소양강댐, 춘천시, 충주댐, 부여군, 금산군에서 관측된 강수량의 SPI-12와 비교하였다. 아산(선장), 아산(영인), 아산(음봉) 관측소의 경우, 천안시에서 관측된 강수량 자료와 비교하였다.
- 관측된 지하수위는 하천수위와 같이 강수에 의해 상승과 하강을 반복하는 단주기의 변동을 잘 보였으며, 대부분의 관측소에서 1~2 m 내외의 지하수위 변동이 관측되었다.
- 아산(음봉) 관측소의 경우, 매년 농번기에 20 m 정도의 수위강하가 관측되었는데 이는 주변 농경지에서의 지하수 양수에 의해 발생한 것으로 추정된다. 공주(우성) 관측소의 경우 2011년~2012년에 1 m 정도 지하수위가 하강하여 유지되고 있는데, 이는 4대강 보건설의 영향인 것으로 해석된다. 공주(우성) 관측소는 공주보 하류 금강 지류인 유구천 인근에 위치하며, 보 건설의 영향으로 유구천의 수위가 하강하여 인근 지역 지하수위에도 영향을 미친 것으로 해석된다.

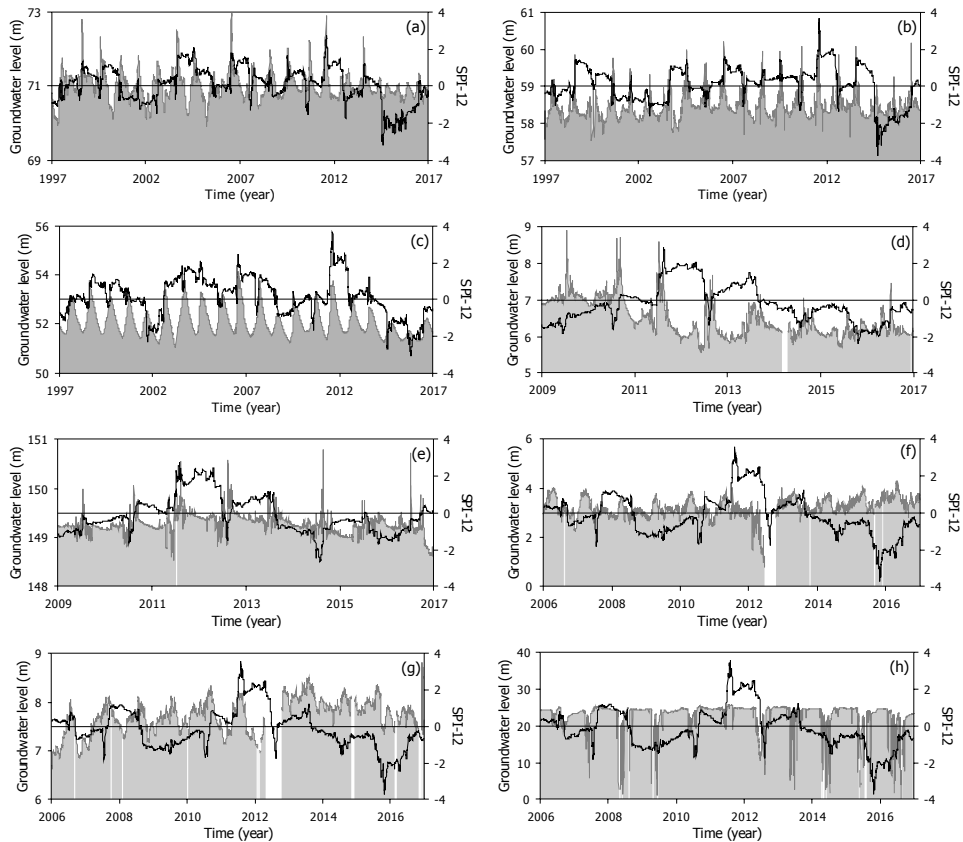


그림 4-7. 지하수위와 SPI-12 비교: (a) 춘천(우두), (b) 가평(가평), (c) 충주(가금), (d) 공주(우성), (e) 금산(금성), (f) 아산(선장), (g) 아산(영인), (h) 아산(음봉)

- <그림 4-7>과 같이 지하수위는 댐과 저수지와 달리 2014년~2016년의 장기 가뭄 시 SPI-12와의 동조화 현상이 거의 관측되지 않았다. 가뭄 기간의 지하수위 변동을 살펴보면, 평년의 풍수기에 잘 관측되는 지하수위 상승은 매우 약해지는 반면, 매년 갈수기에 관측되는 저수위는 장기간 가뭄이 지속되어도 더 떨어지지 않고 평년과 거의 유사하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 즉, 풍수기의 지하수위는 개별 강수 사상에 빠르게 반응하면서 단기적인 변동을 보여, 풍수기에 함양된 지하수에 대한 대수층의 장기적 저수능력(지속성)은 매우 낮은 것으로 해석된다.
- 그러나 2014년~2016년과 같이 장기간 가뭄이 지속될 경우, 지하수는 지

표수(댐과 저수지)와 달리 가뭄에 동조화되지 않고 저수위가 유지되는 경향성을 보였다.

- 따라서 대수층의 지하수 공급능력은 지하수위와 밀접한 관련이 있으므로, <그림 4-7>의 SPI-12와 지하수위와의 비교 자료는 ‘가뭄이 지속되더라도 지하수 공급능력은 크게 떨어지지 않는다’라는 추론의 간접 증거가 될 수 있다.

#### 4.1.4 시계열 상관분석

- SPI와 수문 관측자료(저수지 저수율, 댐 수위, 하천수위 및 지하수위)의 시계열 상관분석을 통해 강수에 대한 지표수 및 지하수의 반응이 어떤 차이를 보이는지 정량적으로 분석하였다.
- 이때 강수량의 누적기간(AP)을 1개월부터 12개월까지 변화시키면서 SPI 시계열 자료를 생성하였으며, 수문 시계열 자료와의 상관분석을 통해 SPI 누적기간에 따라 상관계수가 어떻게 달라지는지 탐색하였다. 시계열 상관분석은 20년의 전체 관측기간(1997~2016년)과 3년의 가뭄기간(2014~2016년)으로 구분하여 수행하였다.

#### 가. SPI 누적기간에 따른 상관계수의 변화

##### (1) 저수지 저수율

- <그림 4-8>은 전체 관측기간 동안 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관계수 변화를 나타낸 그림이다. 저수지 저수율은 전체적으로 AP가 작을 때 SPI와 낮은 상관성을 보였으며, AP가 커지면서 SPI와의 상관성이 증가하여 AP가 9-11개월 정도에서 가장 큰 값을 보이는 것으로 분석되었다.
- 금산(화림)과 아산(월랑)의 경우, 다른 저수지와 비교할 때 긴 AP에서도 SPI와 상대적으로 낮은 상관도를 보였다<그림 4-8(l)><그림 4-8(t)>. 저수지별 상관계수의 변화는 저수지의 규모, 해당 용수구역의 농업용수 수요량 및 저수지의 용수공급 비율 등 다양한 요인에 의하여 발생한 것으로 추정되며, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

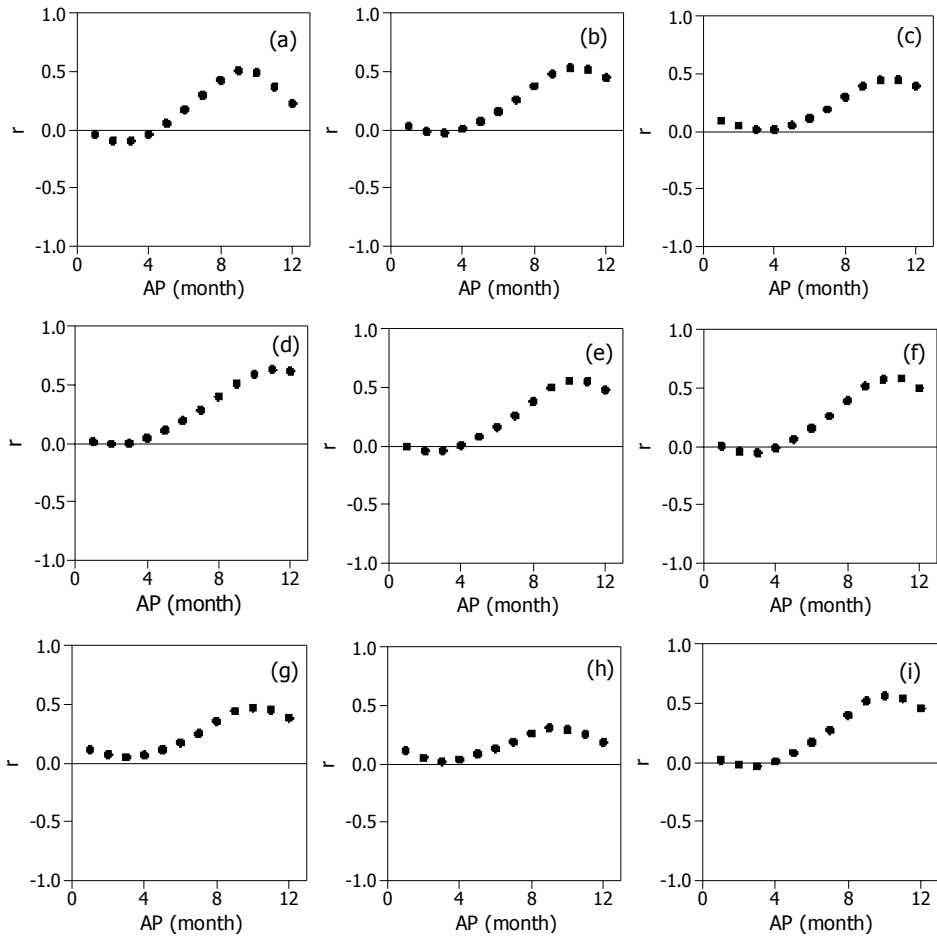


그림 4-8. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관계수 변화:  
 (a) 공주(우목), (b) 공주(한천), (c) 부여(상천), (d) 청양(적누), (e) 보령(성연), (f) 보령(신구), (g) 보령(옥서), (h) 보령(진죽), (i) 청양(매산), (j) 청양(수정), (k) 청양(화암), (l) 금산(화림), (m) 논산(강청), (n) 서천(축동), (o) 아산(동암), (p) 아산(상성), (q) 아산(성내), (r) 아산(신희), (s) 아산(월량), (t) 아산(죽산)

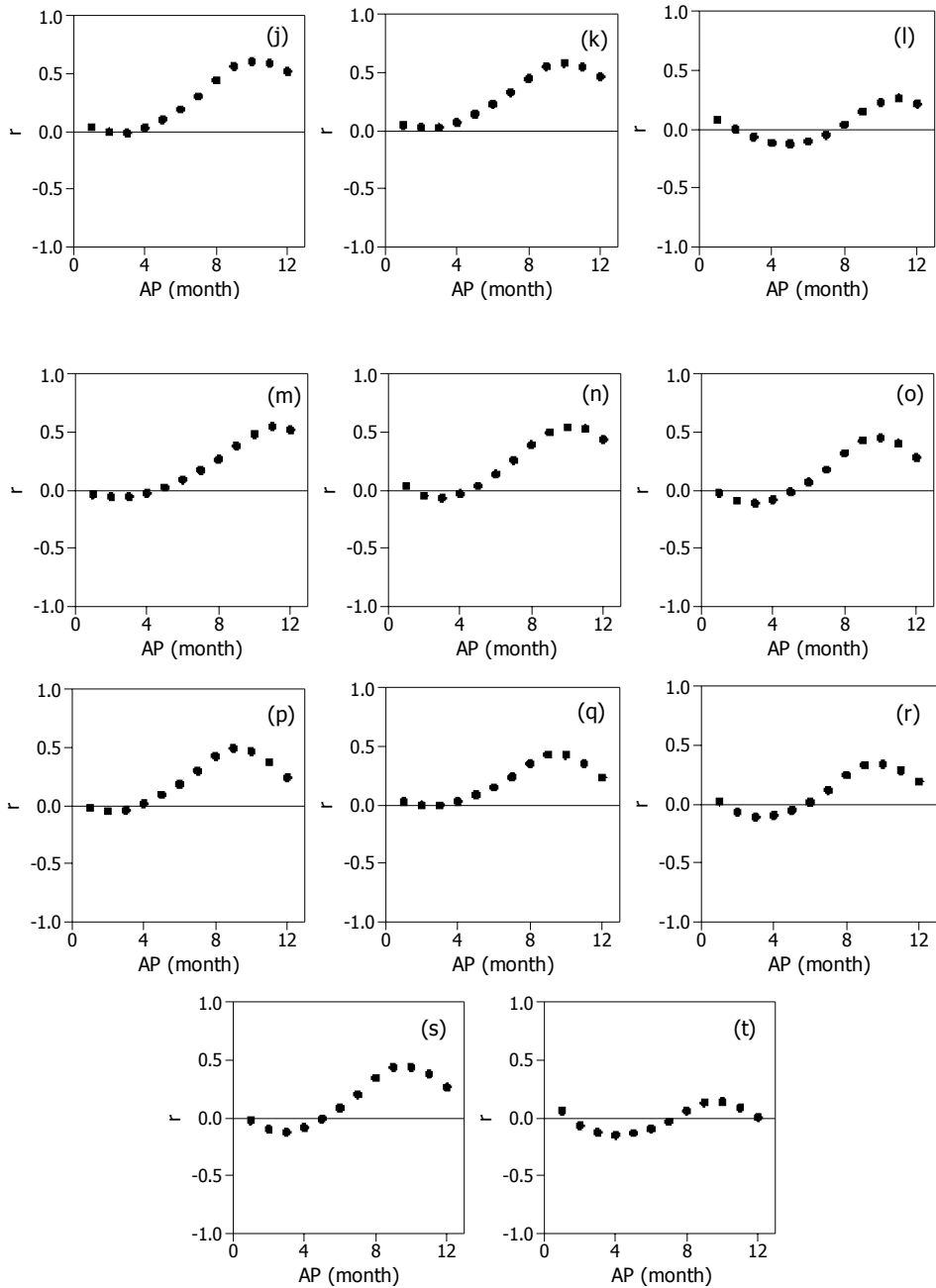


그림 4-8. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관관계수 변화(계속)

◦ <그림 4-9>는 가뭄기간에 대한 시계열 상관분석 결과이며, 전체기간의 결과<그림 4-8>과 비교할 때 상관도의 변화는 매우 유사하게 나타났으며, 최대상관계수는 더 큰 값을 보였다.

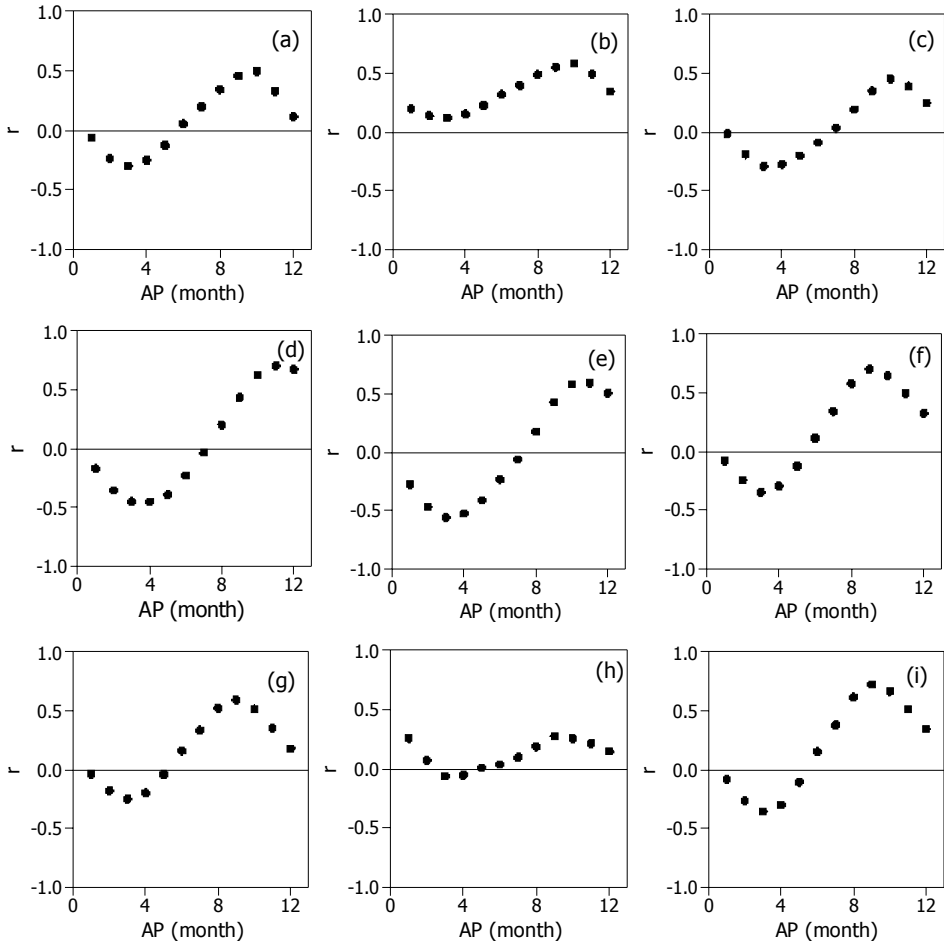


그림 4-9. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관계수 변화: (a) 공주(우목), (b) 공주(한천), (c) 부여(상천), (d) 청양(적누), (e) 보령(성연), (f) 보령(신구), (g) 보령(옥서), (h) 보령(진죽), (i) 청양(매산), (j) 청양(수정), (k) 청양(화암), (l) 금산(화림), (m) 논산(강청), (n) 서천(축동), (o) 아산(동암), (p) 아산(상성), (q) 아산(성내), (r) 아산(신희), (s) 아산(월랑), (t) 아산(죽산)

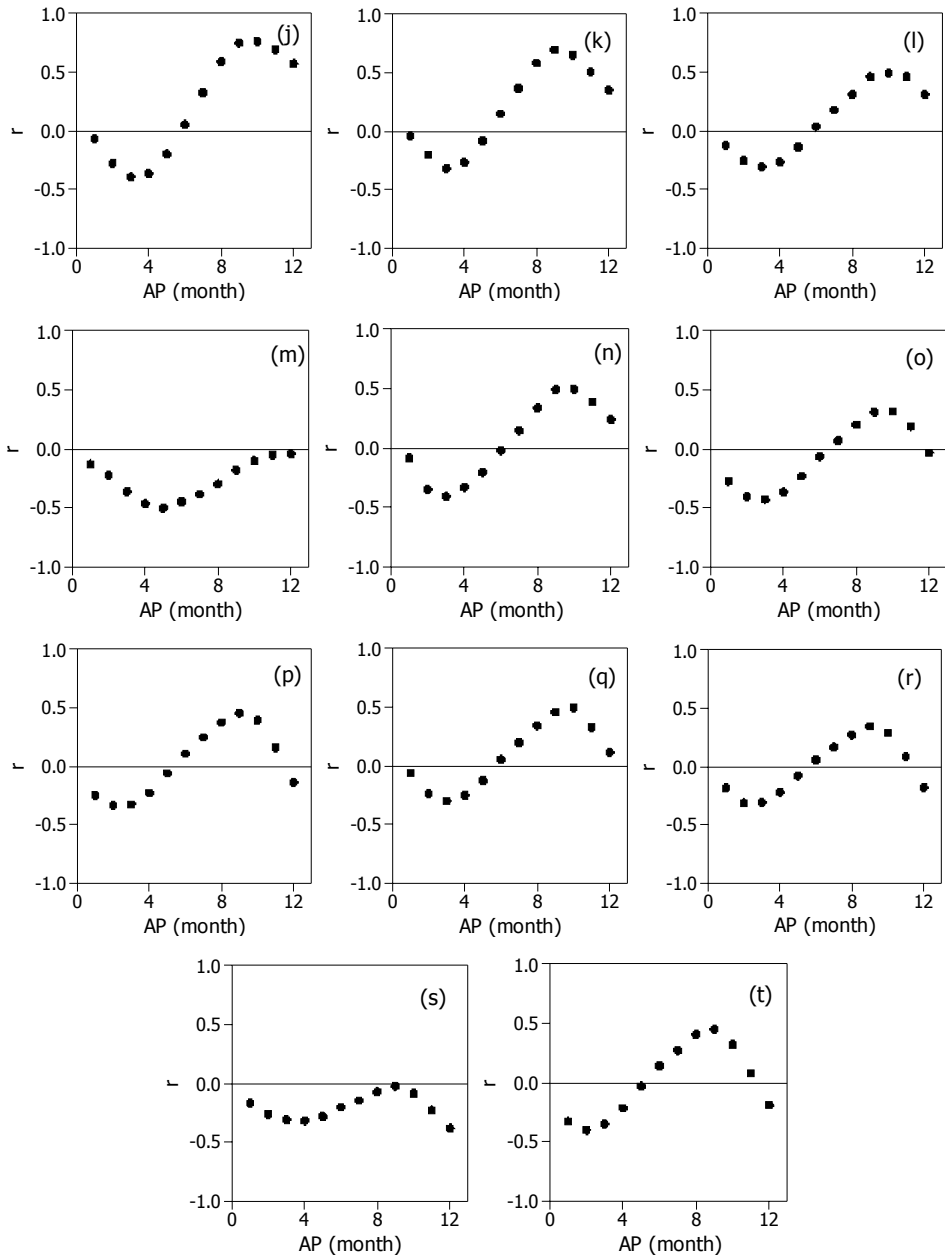


그림 4-9. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관관계수 변화(계속)

- 공주(우목), 부여(상천), 청양(적누), 보령(성연), 보령(신구), 보령(옥서), 청양(매산), 청양(수정), 청양(화암), 서천(축동), 아산(동암), 아산(상성), 아산(성내) 및 아산(신희) 저수지의 경우, 짧은 AP에서 가뭄기간에 상관

도가 감소하였다. 금산(화림), 논산(강청) 및 아산(월량) 저수지의 경우 긴 AP에서 가뭄기간에 상관도가 증가하였으며<그림 4-9(l)><그림 4-9(m)><그림 4-9(s)>, 아산(죽산) 관측소의 경우 감소하였다<그림 4-9(t)>. 한편, 논산(강청)과 아산(월량) 저수지의 경우 가뭄기간에 대한 분석에서 AP에 관계없이 상관계수가 음의 값으로 산정되어, 전체기간에 대한 분석 결과와 큰 차이를 보였다<그림 4-9(m)><그림 4-9(s)>.

## (2) 댐

- <그림 4-10>은 전체 관측기간에 대한 SPI와 댐 수위의 상관분석 결과이다. 댐 수위도 저수지와 마찬가지로 AP가 길어질수록 상관계수가 커지는 경향을 보여, 시계열자료의 비교에서 논의된 바와 같이 장기적인 강수량(또는 가뭄)의 변동에 동조화되는 것으로 해석된다. 한편, 수력발전용으로 주로 이용되는 의암댐의 경우, 매우 낮은 상관계수를 보여<그림 4-10(d)>, 강수량의 단기적 또는 장기적인 변동에 거의 영향을 받지 않는 것으로 분석된다.

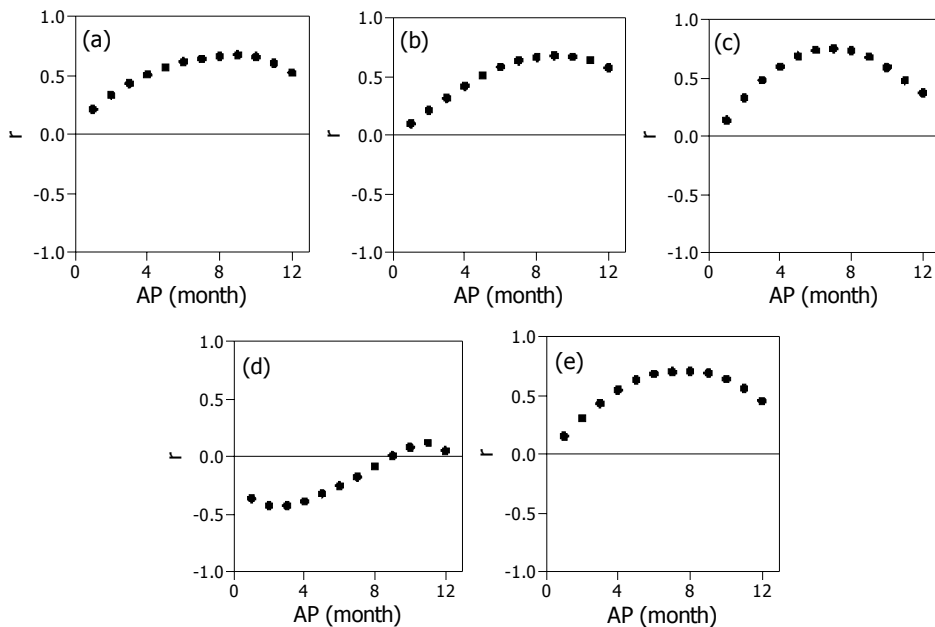


그림 4-10. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 댐 수위의 상관계수 변화:  
 (a) 대청댐, (b) 보령댐, (c) 소양강댐, (d) 의암댐, (e) 충주댐



- <그림 4-11>은 가뭄기간에 대한 SPI와 댐 수위의 상관분석 결과로, 가뭄기간의 분석 결과는 전체기간의 결과<그림 4-10>와 비교할 때 상관계수의 최대치가 나타나는 AP가 더 증가하는 경향을 보였다. 따라서 가뭄이 장기화될수록 댐의 수위는 가뭄에 더욱 민감하게 영향을 받게 되며, 가뭄에 대한 댐의 이러한 반응 특성은 최근 충남지역에서 발생한 극심한 가뭄 동안 일부 댐에서 관측된 저수율 자료에 잘 나타난다.

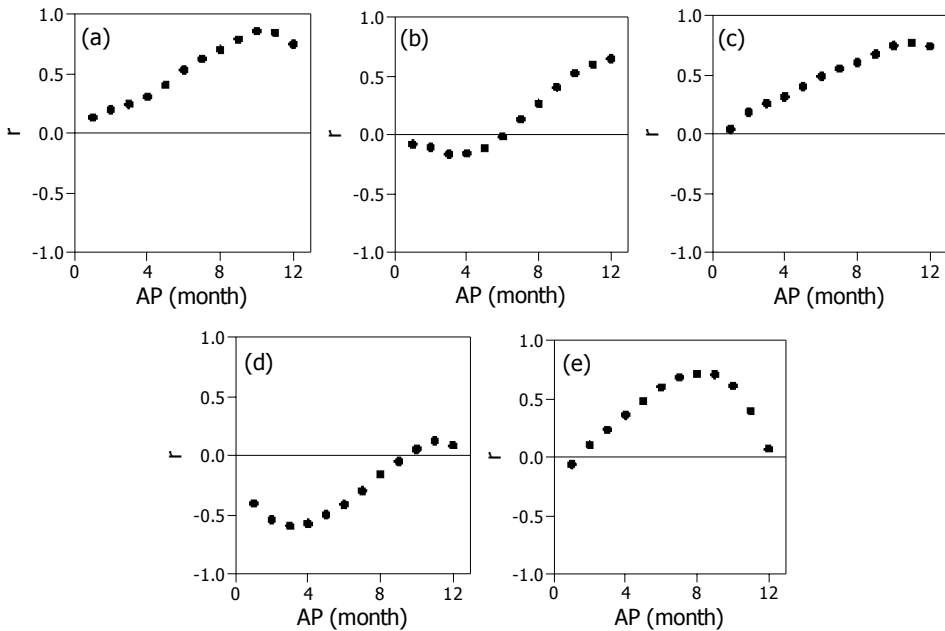


그림 4-11. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 댐 수위의 상관관계수 변화: (a) 대청댐, (b) 보령댐, (c) 소양강댐, (d) 의암댐, (e) 충주댐

### (3) 하천수위

- <그림 4-12>는 전체 관측기간에 대한 SPI와 하천수위의 상관분석 결과이다. 저수지와 댐의 분석 결과와 비교할 때 SPI와 하천수위의 상관성은 상대적으로 낮게 나타났다. 소양강의 경우 AP에 관계없이 SPI와의 상관성이 거의 없으며, 가평천과 남한강의 경우 단기간의 AP에서 SPI와 다소의 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 즉, 하천수위는 단기간의 강수량 변동에 민감하게 반응하며, 가뭄과 같이 장기적인 강수량 변화에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 해석될 수 있다.

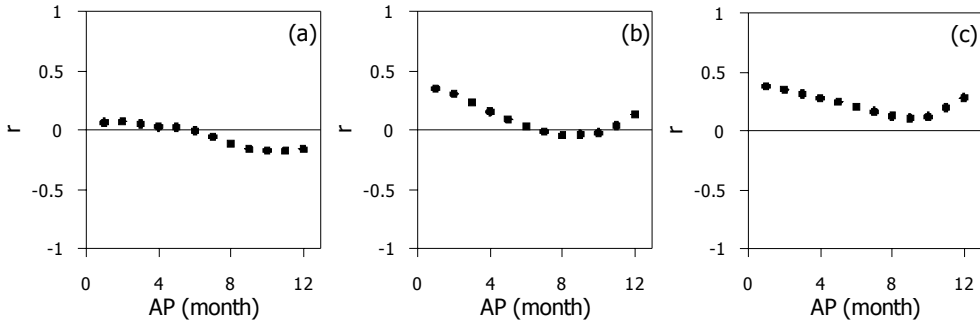


그림 4-12. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 하천수위의 상관계수 변화:  
 (a) 소양강(춘천관측소), (b) 가평천(가평관측소), (c) 남한강(목계관측소)

◦ <그림 4-13>은 가뭄기간에 대한 상관분석 결과로, 전체기간에 대한 상관분석에서 SPI와의 상관성이 보이지 않았던 소양강의 수위는 가뭄기간에 대한 분석에서는 장기간의 AP에서 SPI와의 상관성이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 소양강의 상류에 위치한 소양강 댐이 장기적인 강수량 변화, 즉 장기 가뭄에 민감하게 반응하여 결과적으로 소양강의 수위에 영향을 주었기 때문인 것으로 해석된다. <그림 4-12>와 <그림 4-13>에서 보여주는 바와 같이 하천의 상류지역에 댐 또는 저수지가 위치하는 경우, 하천으로의 방류량이 인위적으로 조절되면서 인공 구조물이 없는 자연하천과는 다른 특징적인 하천수위 변동을 보이며, 결과적으로 가뭄에 대한 반응도 크게 달라진다.

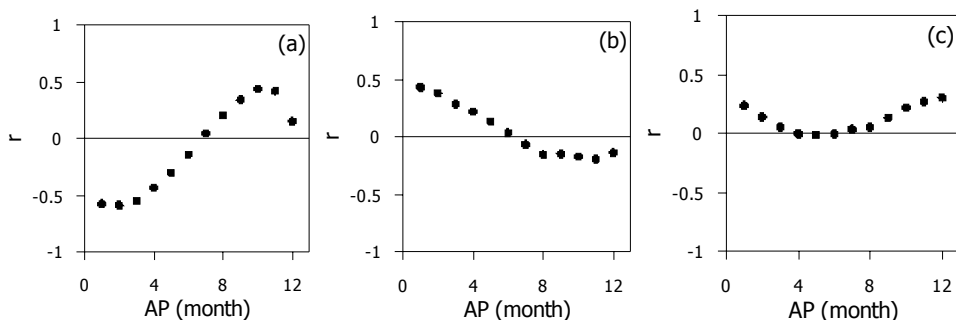


그림 4-13. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 하천수위의 상관계수 변화: (a) 소양강(춘천관측소), (b) 가평천(가평관측소), (c) 남한강(목계관측소)

#### (4) 지하수위

- 지하수위는 다양한 요인에 의하여 변동하지만, 주로 강수의 함양과 유출에 의하여 끊임없이 상승과 하강을 반복한다. 하천 주변 대수층의 경우 하천과 대수층의 상호작용을 통하여 지하수위 변동이 발생하기도 한다. 국내의 경우 대부분의 지하수 관정이 하천 주변에 위치하고 있어, 하천-대수층 상호작용에 의한 지하수위 변동이 크게 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 수변지역 대수층의 경우 강수 함양과 함께 하천-대수층 상호작용이 중첩되어 지하수위 변동으로 나타난다(구민호 외, 2013). 국내의 많은 하천은 상류지역에 설치된 저수지 또는 댐의 영향을 받으므로, 결국 저수지(댐), 하천 그리고 대수층은 수리적으로 연결된 수체라고 할 수 있다.
- <그림 4-14>는 전체 관측기간에 대한 지하수위의 상관분석 결과이며, SPI와의 상관성이 지표수(저수지와 댐)와는 매우 다르게 나타났다. 지하수위는 대체적으로 짧은 AP의 SPI와 높은 상관성을 보였으며<그림 4-14(a)><그림 4-14(b)><그림 4-14(d)><그림 4-15(g)>, 최대 상관계수를 나타내는 AP가 길어지거나<그림 4-14(c)><그림 4-14(h)>, AP에 관계없이 상관성의 크게 달라지지 않거나<그림 4-14(e)>, SPI와 상관성이 거의 없는<그림 4-14(f)> 등 매우 다양한 상관분석 결과를 보였다.
- <그림 4-15>는 가뭄기간에 대한 지하수위의 상관분석 결과이며, 일부 관측소를 제외하고 전체기간에 대한 분석 결과와 유사하다. 가뭄기간의 지하수위는 다른 수문자료에 비해 SPI와의 상관성이 비교적 낮으며, 대체적으로 AP가 짧을 때 SPI와 높은 상관도를 보였다. 이는 전술한 바와 같이, 지하수위는 개별 강수 사상에 빠르게 반응하면서 단기적인 변동을 나타내기 때문이다. 한편, 2014년~2016년의 장기 가뭄 동안에도 갈수기에 관측되는 저수위는 더 떨어지지 않고 평년과 거의 유사하게 유지되므로<그림 4-7>, AP가 길어지면서 SPI와의 상관성이 떨어지는 결과로 나타났다. 장기가뭄이 발생하여도 지하수 공급능력을 유지되는 것을 보여주는 통계적 자료이다.

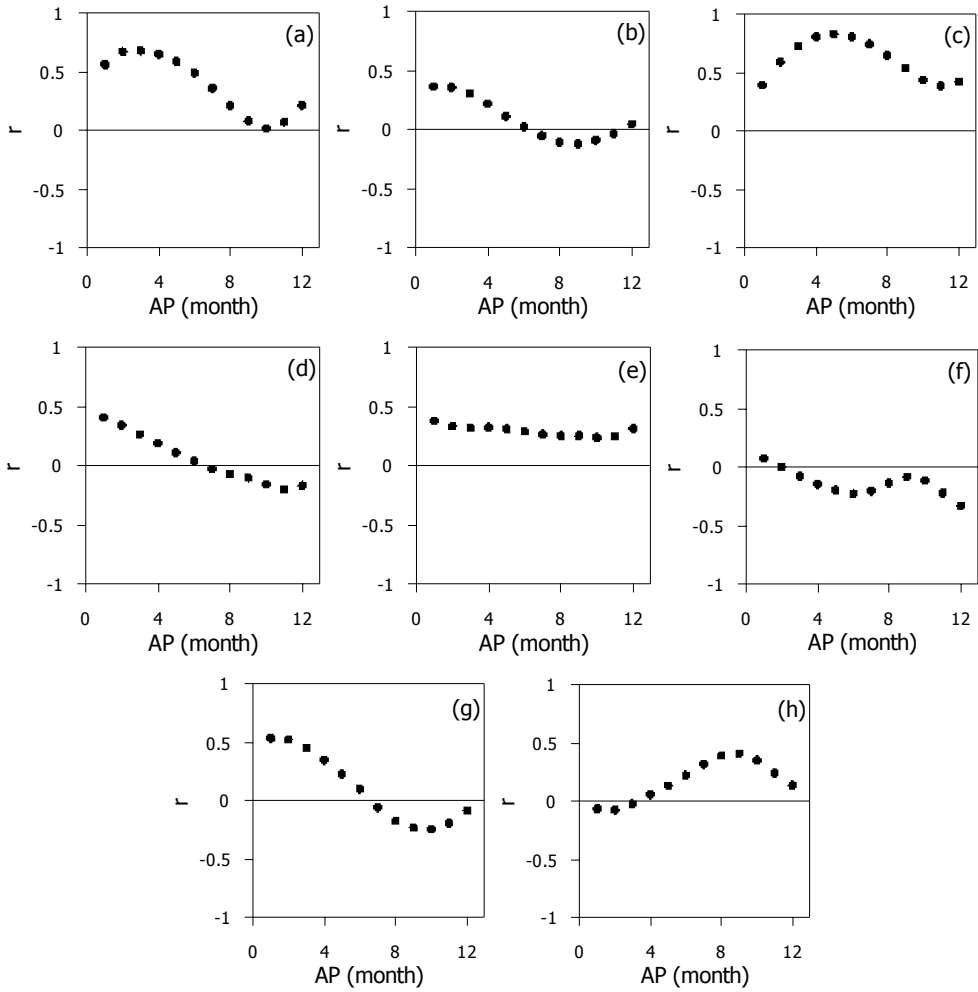


그림 4-14. 전체기간 동안 AP에 따른 SPI와 지하수위의 상관계수 변화:  
 (a) 춘천(우두), (b) 가평(가평), (c) 충주(가금), (d) 공주(우성),  
 (e) 금산(금성), (f) 아산(선장), (g) 아산(영인), (h) 아산(음봉)

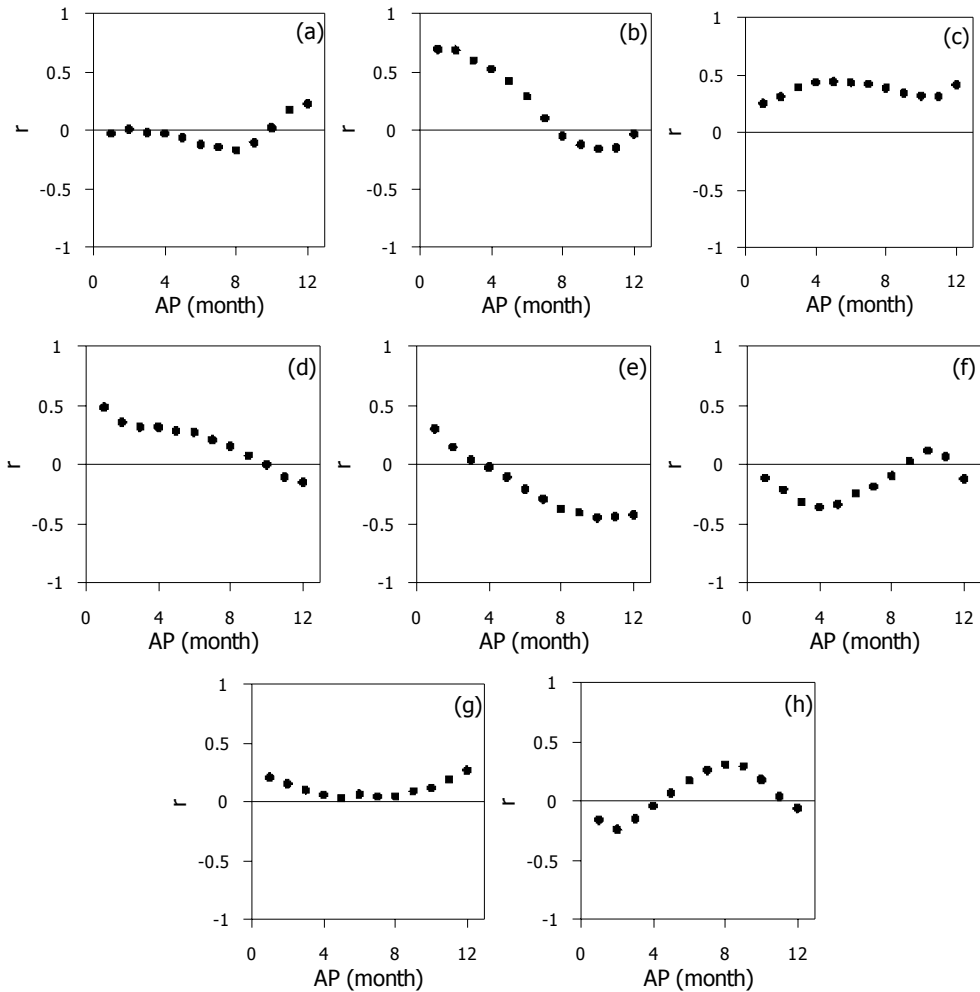


그림 4-15. 가뭄 시 AP에 따른 SPI와 지하수위의 상관관계수 변화: (a) 춘천 (우두), (b) 가평(가평), (c) 충주(가금), (d) 공주(우성), (e) 금산 (금성), (f) 아산(선장), (g) 아산(영인), (h) 아산(음봉)

#### 나. 최대상관계수

- 시계열 상관분석을 통해 지표수(댐과 저수지)와 지하수의 강수(또는 가뭄)에 반응이 어떻게 달라지는지 분석하였다. 강우의 누적기간에 따라 상관분석을 실시하여 수문자료들의 변동성을 알아보았다. 본 절에서는 SPI와의 상관관계수가 최대가 되는 AP가 수문자료에 따라 어떻게 달라지는지 분석하였다.

(1) 저수지 저수율

- (표 4-2)는 SPI와 저수지 저수율의 최대상관계수 및 그때의 AP를 보여 준다. 전체 관측기간에 대한 결과를 보면, SPI와 저수지 저수율의 최대상관계수는 0.27~0.61의 범위를 가지며, 주로 9개월~11개월의 긴 AP에서 상관계수가 최대로 나타났다.

표 4-2. 관측소별 SPI와 저수지 저수율의 최대상관계수

관측소	전체시기		가뭄시기	
	AP	최대상관계수	AP	최대상관계수
공주(우목)	9	0.51	10	0.50
공주(한천)	10	0.53	10	0.59
부여(상천)	11	0.45	10	0.45
청양(적누)	11	0.63	11	0.71
보령(성연)	10	0.56	11	0.60
보령(신구)	11	0.59	9	0.70
보령(옥서)	10	0.47	9	0.60
보령(진죽)	9	0.31	9	0.28
청양(매산)	10	0.56	9	0.73
청양(수정)	10	0.61	10	0.76
청양(화암)	10	0.58	9	0.70
금산(화림)	11	0.27	10	0.49
논산(강청)	11	0.55	12	-0.04
서천(축동)	10	0.54	10	0.50
아산(동암)	10	0.45	10	0.32
아산(상성)	9	0.49	9	0.46
아산(성내)	9	0.43	9	0.43
아산(신희)	10	0.34	9	0.35
아산(월량)	9	0.44	9	-0.02
아산(죽산)	10	0.14	9	0.45

- 가뭄기간의 경우, 최대상관계수가 0.28~0.76로 다소 범위가 넓어졌으며, AP는 거의 동일한 결과를 보였다. 논산(강청)과 아산(월량)은 최대상관계수 값이 각각 -0.04, -0.02로 음의 상관계수를 보였으며, 가뭄 시 강수

와 저수율의 상관성이 없다고 볼 수 있다. 가뭄기간의 최대상관계수가 다소 증가한 것은 저수지가 장기적인 가뭄에 취약한 것으로 해석될 수 있다.

## (2) 댐

- (표 4-3)은 SPI와 댐 수위의 최대상관계수 및 그때의 AP를 보여준다. 의암댐을 제외하면 최대상관계수가 전체적으로 0.67 이상의 높은 값을 보이며, AP도 7개월 이상으로 분석되었다. 이러한 결과는 국내 대부분의 다목적댐이 저수지와 마찬가지로 장기적인 강수량의 변동 또는 가뭄에 동조화되어 민감하게 반응하는 것을 보여준다.

표 4-3. 관측소별 SPI와 댐 수위의 최대상관계수

관측소	전체시기		가뭄시기	
	AP	최대상관계수	AP	최대상관계수
보령댐	9	0.68	12	0.69
대청댐	9	0.67	10	0.86
소양강댐	7	0.75	11	0.77
충주댐	8	0.71	8	0.71
의암댐	11	0.12	11	0.13

## (3) 하천수위

- (표 4-4)는 하천수위에 대한 최대상관계수와 AP의 결과로 소양강(춘천 관측소)의 경우 전체 관측기간에 대한 분석에서는 SPI와의 상관성이 거의 없었으나, 가뭄기간에는 10개월의 AP에서 상관계수가 0.44로 크게 증가하였다. 전술한 바와 같이 가뭄에 민감하게 반응하는 소양강댐 방류량의 영향을 받아 나타난 결과로 해석된다. 이러한 댐-하천의 연동성은 충주댐 하류 남한강(목계관측소)의 분석 결과에서도 잘 나타난다.

표 4-4. 관측소별 SPI와 하천수위의 최대상관계수

관측소	전체시기		가뭄시기	
	AP	최대상관계수	AP	최대상관계수
소양강(춘천관측소)	2	0.07	10	0.44
가평천(가평관측소)	1	0.35	1	0.43
남한강(목계관측소)	1	0.38	12	0.30

(4) 지하수

- (표 4-5)는 지하수위에 대한 최대상관계수와 AP의 결과이다. 전체 관측 기간에 대한 분석 결과를 보면, 아산(음봉)을 제외하면 최대상관계수는 1개월~5개월의 짧은 AP에서 0.37~0.68 사이의 값을 보였다. 일부 관측소의 경우(춘천우두, 아산선장, 아산영인) 가뭄시기에 AP가 10개월 또는 12개월로 증가한 결과를 보여 가뭄에 다소 반응하는 것으로 나타났다. 그러나 상관계수가 0.3 이하로 감소하여 실제 가뭄에 민감하게 영향을 받는다고 보기 어렵다. 시계열 자료에 나타난 바와 같이 대부분 관측소의 지하수위는 갈수기의 저수위가 장기 가뭄기간에도 지속적으로 유지되는 경향을 보인다.

표 4-5. 관측소별 SPI와 지하수위의 최대상관계수

관측소	전체시기		가뭄시기	
	AP	최대상관계수	AP	최대상관계수
춘천(우두)	3	0.68	12	0.23
가평(가평)	1	0.37	1	0.69
충주(가금)	5	0.83	5	0.44
공주(우성)	1	0.41	1	0.49
금산(금성)	1	0.38	1	0.30
아산(선장)	1	0.08	10	0.12
아산(영인)	1	0.53	12	0.27
아산(음봉)	9	0.41	8	0.31



## 4.2 지하수 공급능력 평가 모델 개발

### 4.2.1 개념모델 설계

- 본 연구에서는 용수구역 대수층의 지하수 공급능력을 평가하기 위해 Visual MODFLOW를 이용하여 국내 하천변 충적대수층을 단순화한 모델을 개발하였다.

#### 가. 모델영역 및 격자망 설정

- <그림 4-16(a)>는 공주시 정안천 유역의 지형 및 수계도로 유역 중앙으로 유량이 풍부한 지방하천인 정안천이 흐르며, 산지에서 발원한 여러 개의 소하천이 정안천으로 유입되는 것을 볼 수 있다.

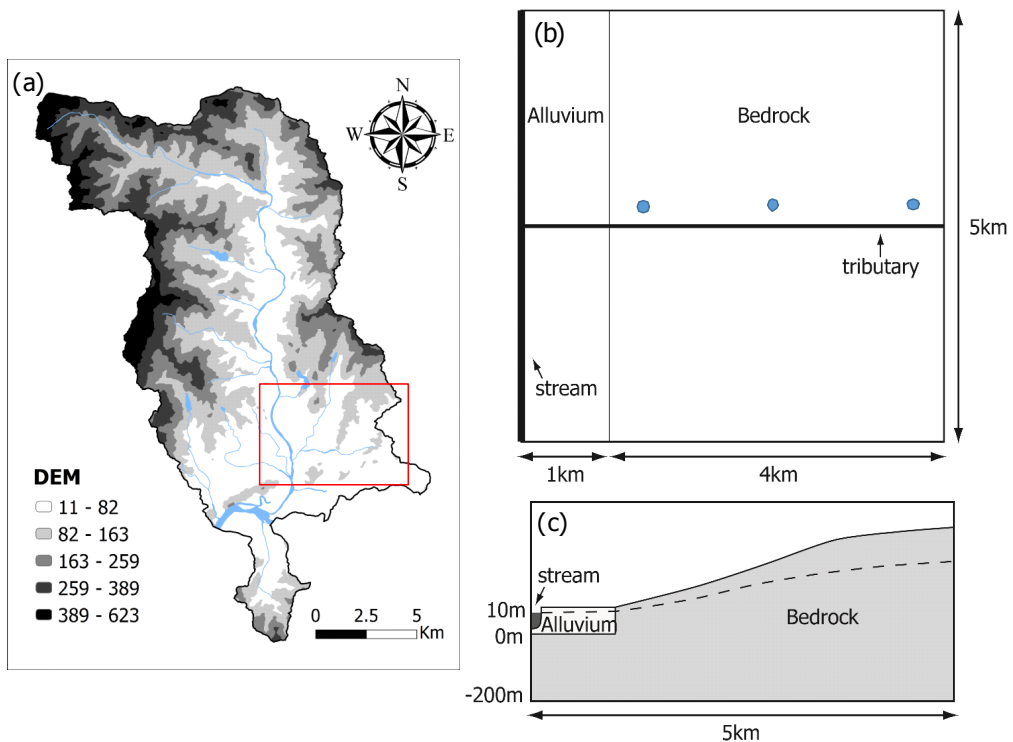


그림 4-16. (a) 공주시 정안천 표준유역과 (b) 개념모델 평면도 및 (c) 단면도

- 소하천의 상류에는 대부분 농업용 저수지가 위치한다. 국토의 대부분이 산지로 이루어진 국내에서 쉽게 볼 수 있는 유역(또는 용수구역)의 수문지형학적 조건이다.
- <그림 4-16(b)>와 <그림 4-16(c)>는 <그림 4-16(a)>의 사각형(붉은색) 영역과 같은 소하천 유역에서의 지하수 흐름계를 모의하기 위해 설정한 가상의 개념 모델이다. 모델영역은 5×5 km의 정사각형 모양으로 설정하였으며, 2개의 층으로 구성된 균질, 등방성의 자유면대수층을 가정하였다. 격자의 크기는 20×20 m이며, 총 125,000개의 격자로 구성하였다. 층적대수층의 경우, 실제 국내 하천변 대수층을 고려하여 본류하천으로부터 1 km 떨어진 지점까지 분포하는 것으로 가정하였으며, 상부 10 m 두께로 설정하였다. 또한 산악지대가 많은 국내의 지형을 고려하여 하천에서 1 km 이상 떨어진 곳과 하부층은 암반층으로 설정하였다.

## 나. 경계조건

### (1) 함양량

- 강수량의 계절적 및 가뭃기의 변화를 모델에 반영하기 위하여 부여 관측소에서 1997년부터 2016년 까지 20년 동안 관측된 일강수량 자료를 사용하였다<그림 4-17>. 이때 강수량의 일정비율(10%)이 함양되는 것으로 가정하여 함양 모델을 단순화하였다(구민호와 이대하, 2002).

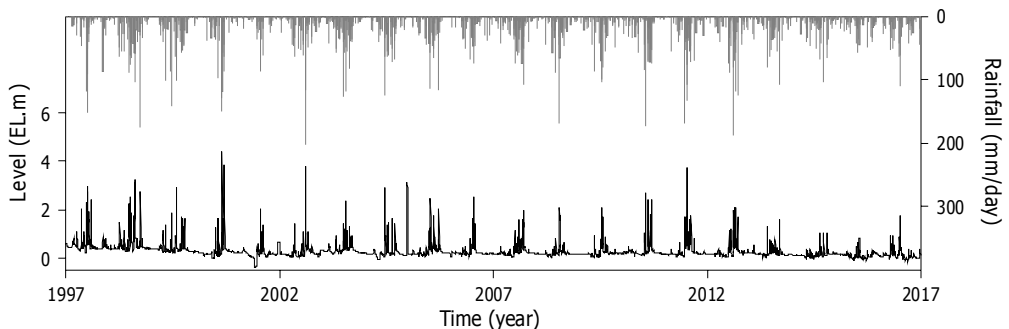


그림 4-17. 모델에 사용된 강수량 및 하천수위 관측 자료

### (2) 하천

- 본류하천은 상부층 모델 영역의 서쪽 끝단에 일정수두경계(constant

head boundary)로 설정하였으며, 시간에 따른 하천수위의 변화를 모델에 반영하기 위해 부여 지천교에서 1997년부터 2016년까지 20년 동안 관측된 하천수위 자료를 입력하였다<그림 4-17>.

#### 다. 대수층 수리상수

- 전술한 바와 같이 본 모델에서는 충적층 및 암반층 두 개의 층으로 구분하였으며, 각각의 층은 균질하다고 가정하였다. 충적층과 암반층의 수리전도도는 10 m/day와 0.1 m/day로 설정하였으며, 각 층의 비산출률은 0.2와 0.02, 비저류계수는 0.0001  $m^{-1}$ 로 동일하게 설정하였다(표 4-6).

표 4-6. 모델에 적용한 수리상수

구분	충적층	암반층
수리전도도(m/day)	10	0.1
비산출률	0.2	0.02
비저류계수( $m^{-1}$ )	0.0001	

#### 라. 동적순환 초기조건

- 시계열 자료를 모델에 입력할 경우 지하수위 변동은 시간에 따라 주기성을 가지며, 이 경우 동적순환 초기조건(dynamic cyclic initial conditions)을 이용하여 모사를 수행한다(Anderson and Woussner, 1992). 이는 모델의 초기조건이 갖는 불확실성을 줄이기 위해 모사 과정에서 주기성을 갖는 함양률의 시계열 자료를 수 년 동안 되풀이하여 지하수위 변동이 1년 주기로 동일하게 반복되도록 하는 방법이다(구민호와 이대하, 2002). 본 연구에서는 20년 동안의 관측자료를 이용하여 총 40년 동안의 지하수 흐름을 모사하여 동적인 평형상태에 도달하도록 하였으며, 이때 계산된 마지막 10년 지하수 자료를 분석에 이용하였다.

### 4.2.2 지하수 흐름 모사 결과

#### 가. 지하수위 변화

- <그림 4-18>은 강수량 및 하천수위의 계절적 변화에 의한 지하수위 변동을 보여주는 그림이다. 지하수위는 우기에 상승하고 건기에 하강하는

계절적 변동을 보였으며, 관측정 위치에 관계없이 유사한 지하수위 변동을 보였다.

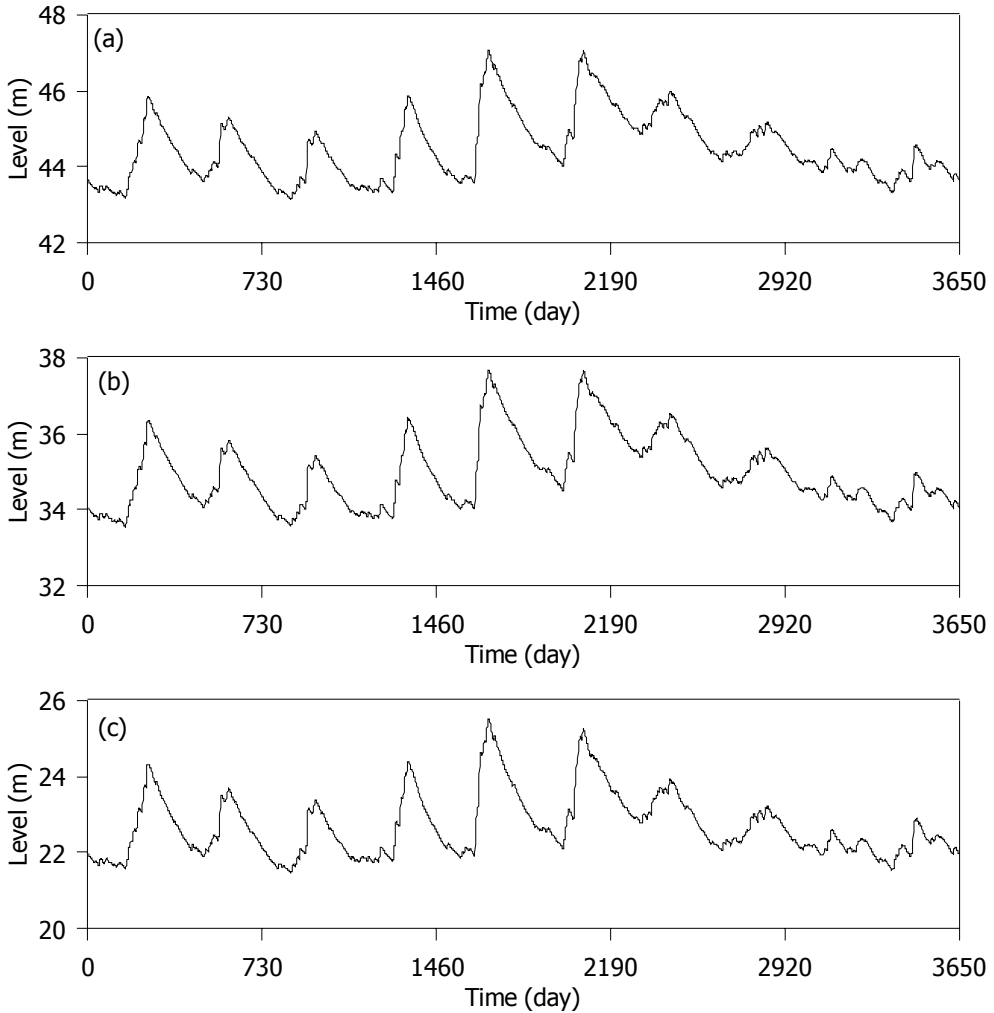


그림 4-18. 양수 전 지하수위 변화: (a) 상류지역, (b) 중류지역, (c) 하류지역

- 기상학적 가뭄이 발생했던 2014년-2016년의 지하수위 변동을 살펴보면 (그래프의 마지막 3년), 강수량 감소로 인해 평년에 비해 지하수위 상승 폭이 감소하였으나, 평년의 저수위가 유지되면서 가뭄에 의한 지하수 부존량 감소는 크게 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

나. 물수지 변화

- <그림 4-19>는 10년 동안의 물수지 변화를 보여주는 그림이다. 하천으로의 지하수 유출량은 지하수위와 마찬가지로 주로 우기에 증가하였다가 건기에 감소하는 주기적인 변동을 보였다. 가뭄 시기의 지하수 유출량은 지하수 함양량 감소로 인해 감소하는 것으로 나타났다.

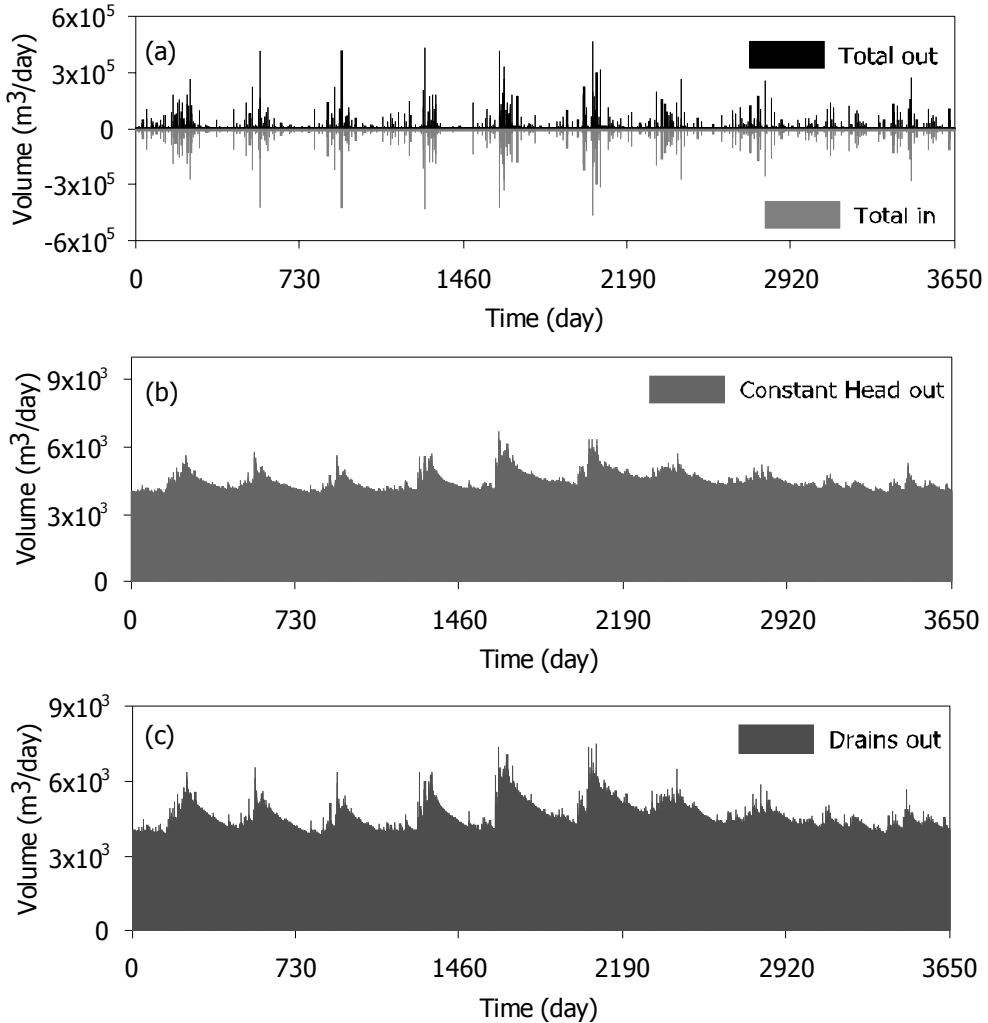


그림 4-19. 양수 전 물수지 변화: (a) 총 지하수 함양량 및 유출량, (b) 분류 하천으로의 지하수 유출량, (c) 소하천으로의 지하수 유출량 변화

- <그림 4-20>은 평년(2010년)과 가뭄 시기(2015년)의 소하천으로의 지하수 유출량 변화를 비교한 그림이다. 우기에 지하수 유출량이 증가하는 평년과 다르게 가뭄기의 경우 여름철에도 지하수 유출량이 크게 증가하지 않고, 연중 일정하게 유지되는 모습을 보였다.

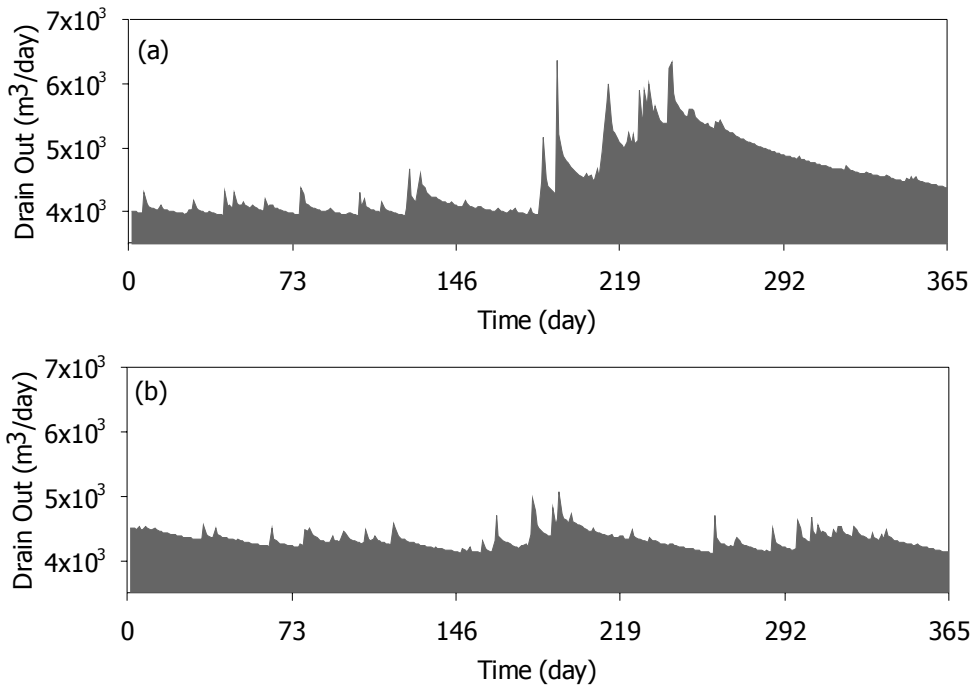


그림 4-20. 소하천으로의 지하수 유출량 변화: (a) 평년(2010년), (b) 가뭄기 (2015년)

#### 4.2.3 지하수 공급능력 평가 방법

- 본 연구에서는 가상의 개념모델을 통하여 지하수 공급능력을 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 지하수 공급능력이란 지하수 관리계획 수립에 이용되는 지하수 개발 가능량(적정개발량)과는 다른 개념으로 관정을 통해 공급할 수 있는 단기적인 취수가능량을 의미한다. 즉, 지표수자원이 부족한 가뭄기에 일시적(3~4개월)으로 공급할 수 있는 최대 취수가능량으로 정의할 수 있다.

가. 지하수 공급능력 평가인자

- 용수구역별 지하수 공급능력은 관정의 수 및 배치, 관정의 허용수위강하량, 대수층의 수리전도도, 지하수 함양량 및 하천과의 상호작용 등 다양한 요인에 의하여 결정되며, 이러한 모든 인자들이 반영된 지하수 흐름 모델의 개발을 통하여 평가할 수 있다.

나. 관정의 공급능력 평가방법

- 본 연구에서는 관정의 허용수위 강하량을 가정하고 지하수 공급기간 동안의 관정의 공급능력을 평가하였다. 지하수 공급기간은 농번기인 5월~8월 초까지 총 100일로 가정하였다. 관정은 배수경계조건으로 설정하였으며, 허용수위 강하량은 30 m로 가정하였다.
- 한편, 수치모델에서 우물이 설치된 격자에서 계산된 수두는 실제 우물에서의 수두와 다른 값을 가지며, 이는 우물과 격자의 크기에 따라 달라진다. 따라서 우물의 수위를 일정하게 고정시키기 위해서는 우물의 수두와 격자의 수두와의 관계식이 필요하며, 아래와 같은 Thiem의 방정식이 이용될 수 있다(Thiem, 1906).

$$h_w = \sqrt{h_{ij}^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (1)$$

여기서  $h_w$ 와  $h_{ij}$ 는 실제 우물 수위(L) 및 우물 격자 수위(L)이며,  $r_w$ 와  $r_e$ 는 실제 우물 반경(L) 및 유효 우물 반경(L)을 나타낸다.  $Q$ 는 양수량( $L^3/T$ )이며,  $K$ 는 수리전도도( $L/T$ )이다. 정사각형 격자의 경우,  $r_e$ 는 Prickett(1967)의 방정식에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$r_e = \exp\left(-\frac{\pi}{2}\right)\Delta x = 0.208\Delta x \quad (2)$$

여기서  $\Delta x$ 는 정사각형 격자의 크기이다.

- 따라서 본 연구에서는 지하수 공급기간의 실제 우물에서의 허용수위강하량이 모델에서 가정한 30 m가 되도록 위 식을 이용하여 우물 수두를

계산하는 일련의 연산과정을 반복하였다.

#### 4.2.4 지하수 공급능력 평가 결과

##### 가. 가뭃 시 지하수위 및 공급가능량 변화

- <그림 4-21>은 한 개의 양수정이 모델 영역 내 소하천의 중류지역에 위치할 경우, 농번기 지하수 양수에 따른 양수정의 수위변화를 보여주며, <그림 4-22>는 이때 관정을 통해 양수되는 물의 양을 보여준다.

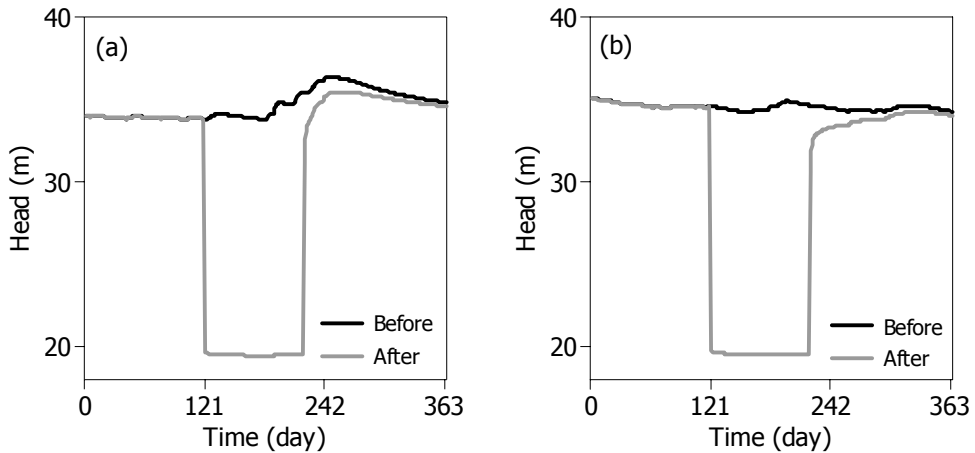


그림 4-21. 농번기 양수에 의한 중류지역 양수정의 수위변화: (a) 평년(2010년), (b) 가뭃기(2015년)

- 지하수위는 양수를 시작하는 121일 시점으로부터 급격히 하강하여 일정한 수위를 유지하였으며, 양수가 종료되는 220일 시점에는 다시 회복되어 양수 이전의 상태로 돌아가는 모습을 보였다. 양수 초기 양수량은 급격하게 감소하지만, 수 일이 경과한 후부터 공급능력이 지속되며, 가뭃 시기(2015년)의 지하수 공급능력은 평년(2010년)과 거의 동일한 것으로 계산되었다. 이는 시계열 상관분석에서 보여준 가뭃 시기 지하수의 장기적인 저수량 지속 능력과 일치되는 결과인 것으로 해석된다. 즉, 장기 가뭃이 지속되어도 평년과 비슷한 양의 지하수 공급능력을 가지며, 양수 중단 후 지하수위가 빠른 속도로 회복되어 지하수계에 큰 영향이 없는 것을 의미한다.



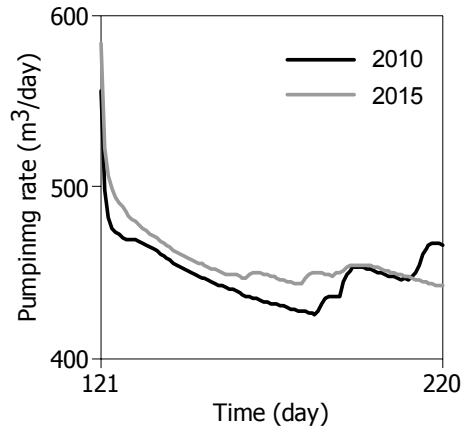


그림 4-22. 중류지역 양수정의 농번기 지하수 공급능력 변화

나. 관정 위치에 따른 공급가능량 변화

- <그림 4-23>은 한 개의 관정을 각각 상류, 중류, 하류에 설치했을 때 관정 위치에 따른 공급가능량 변화를 보여준다. 용수구역 내에서 관정의 위치(상류, 중류, 및 하류)에 따라 공급능력이 다소 달라지는 것으로 나타났다. 관정이 하류지역에 위치할 때 하천-대수층 상호작용에 의해 지하수 공급이 비교적 원활하여 지하수 공급가능량이 가장 많은 것으로 확인되었다. 관정이 중류지역에 위치할 때 지하수 공급가능량이 가장 작은 것으로 나타났다.

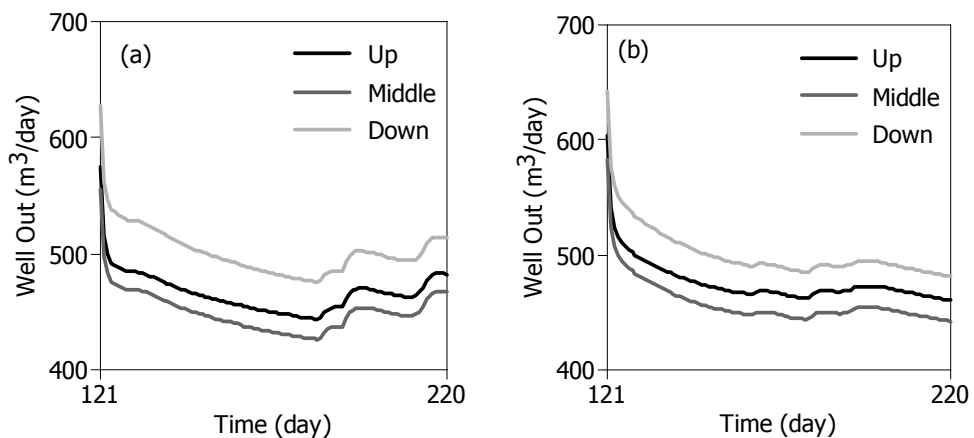


그림 4-23. 관정 위치에 따른 지하수 공급가능량 변화: (a) 비가뭄기(2010년), (b) 가뭄기(2015년)

다. 허용수위 강하량에 따른 공급가능량 변화

- <그림 4-24>는 중류지역에 위치한 관정의 허용수위 강하량에 따른 지하수 공급가능량의 변화를 보여준다. 허용수위 강하량이 10 m, 30 m, 50 m로 증가할 때 지하수 공급가능량도 이에 비례하여 150 m<sup>3</sup>/day, 450 m<sup>3</sup>/day, 700 m<sup>3</sup>/day로 증가하였으며, 가뭃기의 공급가능량은 평년과 유사한 값을 보였다.

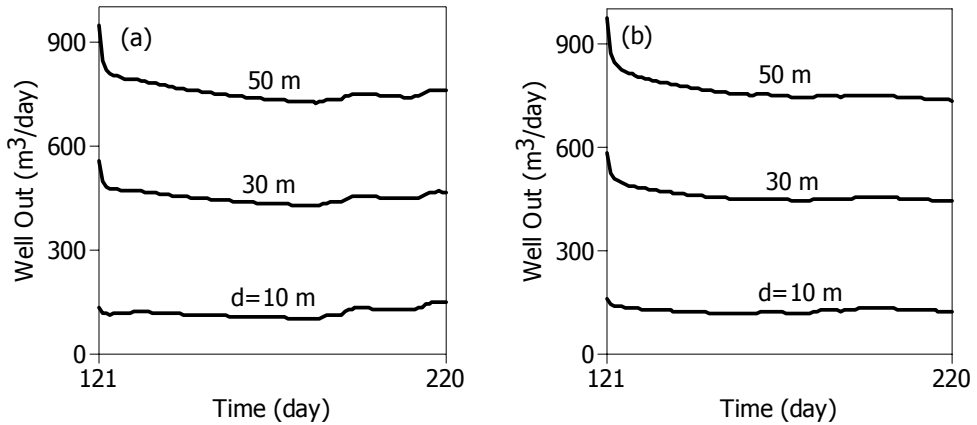


그림 4-24. 허용 수위강하량에 따른 지하수 공급가능량 변화: (a) 평년(2010년), (b) 가뭃기(2015년)

- 따라서 관정 위치에 따른 변화와 비교할 때<그림 4-23> 관정의 허용수위 강하량이 지하수 공급능력을 결정하는 중요한 인자인 것으로 확인되었다.

라. 관정 수에 따른 공급가능량 변화

- 중류지역에 위치한 관정을 중심으로 동서방향으로 100 m 간격으로 양수정의 수를 늘려가며 관정 수에 따른 지하수 공급가능량 변화를 살펴 보았다.
- <그림 4-25(a)>는 관정군의 위치를 보여주며, <그림 4-25(b)>는 관정 수에 따른 관정당 평균 지하수 공급가능량 변화를 보여준다. 관정 수가 증가할수록 우물간 간섭효과에 의해 개별 관정의 양수공급능력이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 관정 수가 어느 정도 늘어나면 개별 관

정의 지하수 양수량의 감소폭이 줄어들어 일정하게 유지되었다. 가뭄 시기(2015년)의 개별 관정의 양수량이 평년(2010년)과 유사하게 나타나 가뭄 시기에도 평년과 유사한 지하수 공급능력을 가지는 것으로 나타났다.

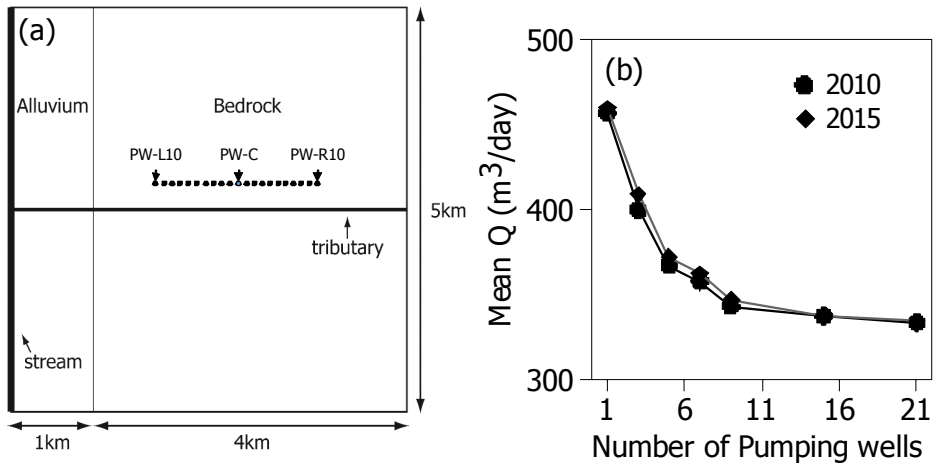


그림 4-25. (a) 관정군 위치 및 (b) 관정 개수에 따른 관정 하나당 평균 양수량 변화

- <그림 4-26>은 관정 수에 따른 소하천으로의 지하수 유출량 변화를 보여준다. 소하천으로의 지하수 유출량은 양수정의 수가 많아질수록 점차 감소하였으며, 양수가 중단된 후 회복되었다. 이는 관정 수 증가에 의해 지하수 양수량이 증가하면 농번기 소하천 유량을 감소시킬 수 있으며, 양수가 중단되면 점점 양수 이전의 상태로 회복되는 것을 의미한다.

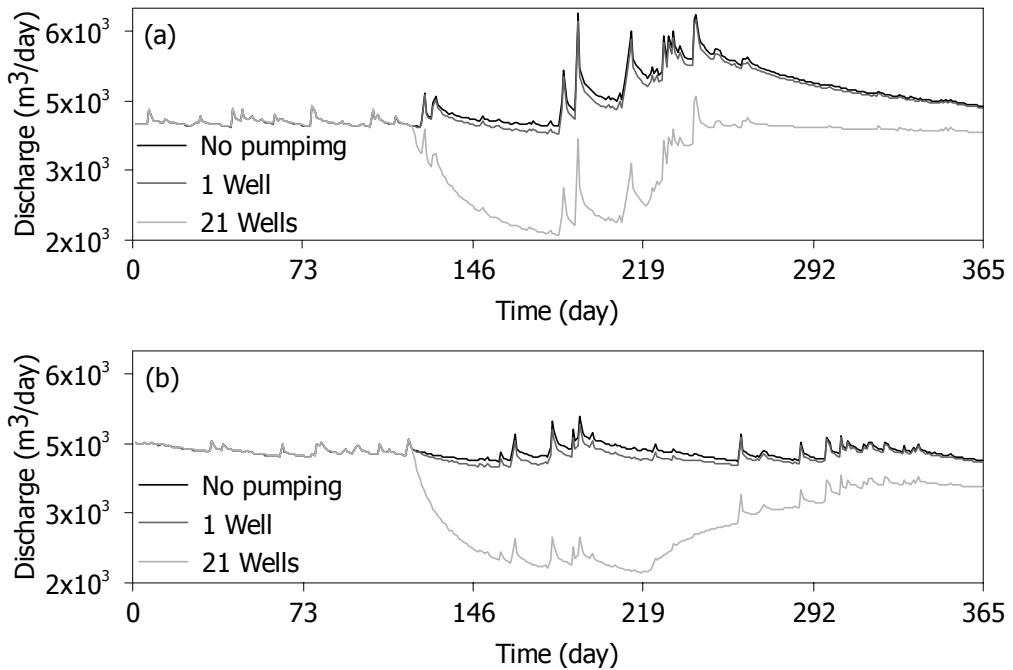


그림 4-26. 관정 개수에 따른 소하천으로의 지하수 유출량 변화: (a) 평년 (2010년), (b) 가뭄기(2015년)

#### 마. 관정 이격거리에 따른 공급가능량 변화

- <그림 4-27>과 <그림 4-28>은 관정 이격거리에 따른 지하수 공급가능량 변화를 보여주는 것으로, 40 m와 100 m의 관정 이격거리에 대한 모델 결과를 비교한 것이다. 관정 이격거리가 감소하면 양수 시 우물간 간섭 효과가 커져서 양수량이 감소하는 것으로 나타났으며, 관정군의 개수가 증가하면 그 영향이 더 증가하여 양수량은 크게 감소하였다. 총 양수량은 관정군의 개수에 비례하여 선형적으로 증가하지 않았으며, 이러한 현상은 관정 이격거리가 짧을수록 더 잘 나타났다<그림 4-27>.
- 따라서 관정 이격거리는 허용수위 강하량 및 관정 수와 더불어 관정의 공급가능량을 결정하는 중요한 인자인 것으로 확인되었다. 관정당 평균 양수량은 관정의 개수가 증가할수록 감소하였으며, 관정 이격거리가 작을수록 간섭효과에 의해 더 크게 감소하였다<그림 4-28>.

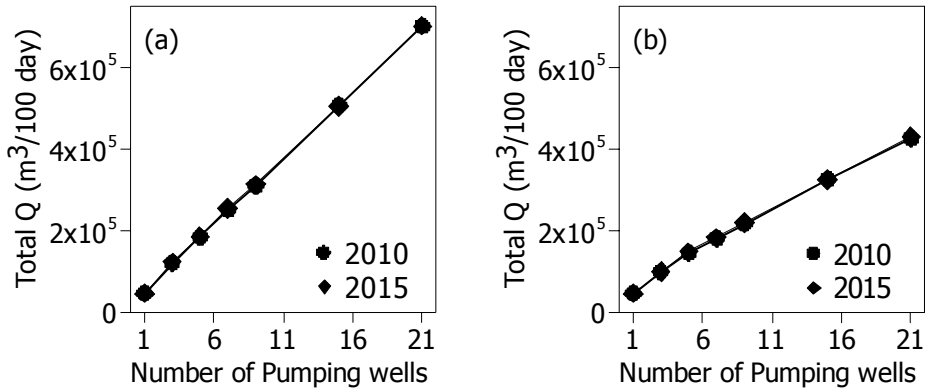


그림 4-27. 관정 이격거리에 따른 지하수 공급기간 동안(100일)의 총 양수량 변화: (a) 100 m, (b) 40 m

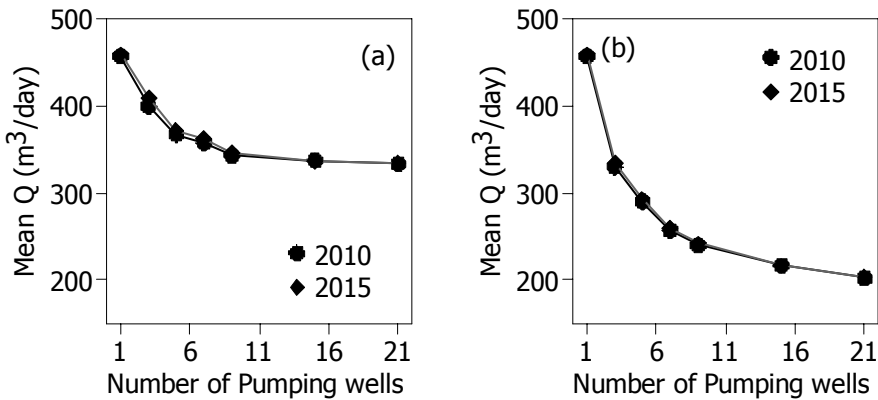


그림 4-28. 관정 이격거리에 따른 관정당 평균 양수량 변화: (a) 100 m, (b) 40 m

◦ <그림 4-29>는 관정을 21개 설치했을 때<그림 4-25(a)> 관정군의 중앙과 양쪽 끝에 위치한 관정의 양수량을 비교한 그림이다. 우물간 간섭효과에 의해 가운데 관정의 양수량이 가장 작게 나타났으며, 관정군의 양쪽에 위치한 두 관정의 양수량은 비슷하게 나타났다. 가뭄 시기(2015년)의 지하수 양수량은 관정 위치에 관계없이 평년과 유사하게 나타났다.

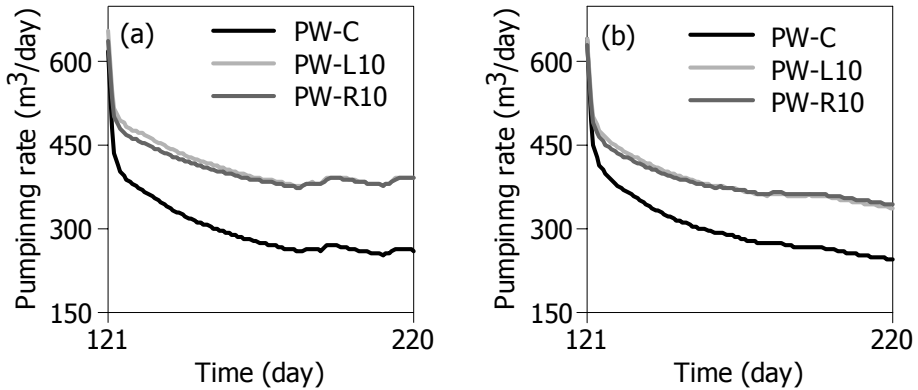


그림 4-29. 관정군 관정 위치에 따른 양수량 변화: (a) 평년(2010년), (b) 가뭄기(2015년)

사. 무작위 관정배치 시 공급가능량 변화

- 용수구역 내 산재해 있는 관정 배치를 모델에 반영하기 위하여 난수를 이용하여 무작위로 관정을 배치시킨 후 지하수 공급가능량의 변화를 살펴보았다. 관정 수를 10개, 20개, 30개, 40개로 증가시키면서 공급가능량 변화를 살펴보았다<그림 4-30>.
- <그림 4-31>은 무작위 관정배치 시 계산된 평균 양수량을 보여준다. 가뭄기와 비가뭄기의 지하수 공급가능량은 유사하게 나타나 가뭄기에도 지하수 공급능력은 유지되는 것으로 확인되었다. 관정 개수가 증가하면 평균 양수량은 감소하였지만, 무작위 관정 배치 시 일정한 간격으로 관정을 배치한 경우에 비해 관정 이격거리가 증가하여 양수량도 크게 감소하지 않았다.

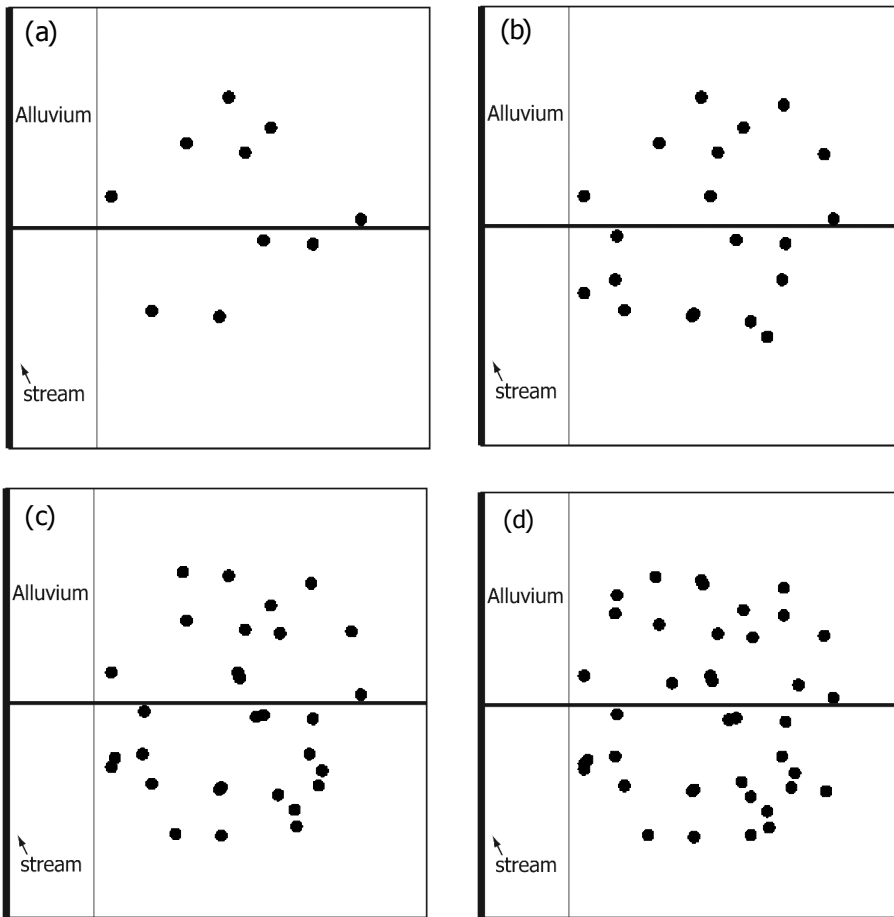


그림 4-30. 무작위 관정군 위치: (a) 10개, (b) 20개, (c) 30개, (d) 40개

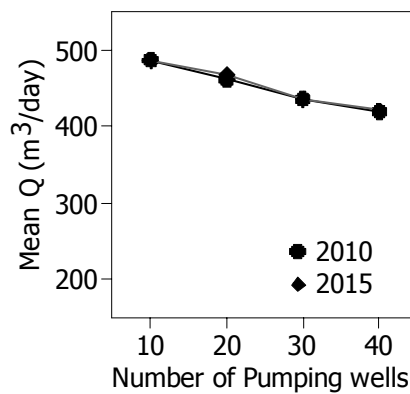


그림 4-31. 무작위 관정배치 시 관정 개수에 따른 평균 양수량 변화





# Chapter 05

## 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립

- 5.1 | 표준지하수위지수(SGI) 기준
- 5.2 | 농업가뭄과 연계한 지하수위 저하 한계치 기준
- 5.3 | 기존 농업가뭄 예·경보 인자와의 통합 운영 방안 제시



## 5. 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립

### 5.1 표준지하수위지수(SGI) 기준

- 표준지하수위지수(standardized groundwater level index, SGI)는 Bloomfield and Marchant(2013)가 제시한 지하수 가뭄의 특성화를 위한 새로운 지수로, 강수량의 시계열 자료를 이용한 표준화 지수인 SPI와 자료처리 과정이 동일하다.
- 따라서, 관측공에서 측정되는 지하수위 시계열 자료를 적절한 정규화 과정을 거치는 경우, 가뭄 기간 중의 지하수자원의 변동을 정량적으로 평가할 수 있는 장점이 있다.

#### 5.1.1 관측공 주변 지하수위와 토양수분함량 상관성 평가

- 본 연구에서는 강수가 지표면을 침투한 이후 토양층 통과 시 토양수분함량 변화 및 지하수위와의 상관성을 분석하기 위하여, 심도별 토양수분 측정센서를 설치하여 장기간 모니터링을 실시하였다. 또한 인근 관측공의 지하수 수질과 관측공 인근 하천수의 수질을 비교하여, 지표수-지하수 연계성과 가뭄 발생 시 하천수 고갈에 따른 지하수 수질 악화의 가능성을 평가하였다.
- 관측장비는 3개 지점(공주1, 청양1, 논산1 관측공)에 대하여 지표면 하부 30~110 cm 구간에 대하여 매 10 cm 깊이별로 토양수분 측정센서(모델명: 5TE, 미국 Decagon Devices사)를 설치하였으며, 각 지점별로 지표 상부 1.3~1.5 m 높이에 강수량 자동측정 장치(모델명: Pluvio, 독일 OTT사)를 설치하였다<그림 5-1>.



(a)



(b)

그림 5-1. 토양수분함량 측정 장치(a) 및 강수량 자동측정 장치(b)

- 관측 자료는 30분 간격으로 측정하여 심도별로 SPI와 SGI와의 상관분석을 통하여 가뭄에 따른 토양수분함량 변화를 계산하였으며, 지하수위와의 교차상관 분석을 통하여 토양수분함량 변화에 따른 지하수 함양 효과를 검증하였다.
- 또한 매시간 측정된 강수량을 시간별(1~30시간)로 정규화(SPI1~SPI30)시켜, 강수에 의한 지하수위 및 심도별 토양수분함량 변화의 정량적인 상관성을 평가하였다.

#### 가. 논산1 관측공

- 논산1 관측공 인근에 대하여 지표 하부 30 cm 깊이로부터 10 cm 간격으로 토양수분함량(volumetric water content, VWC)을 모니터링 하였다. 이때 토양수분함량 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 심도별(20 cm 간격)로 토양시료에 대한 입도분석을 실시하여 토양입도분포 곡선 (grain-size distribution curve)을 도출하였다<그림 5-2>. 분석 결과 전체적으로 토양입도는 심도 증가에 따라 sand의 함량이 증가 및 감소하지만, 심도별로 입도가 균질한 것으로 나타났다.

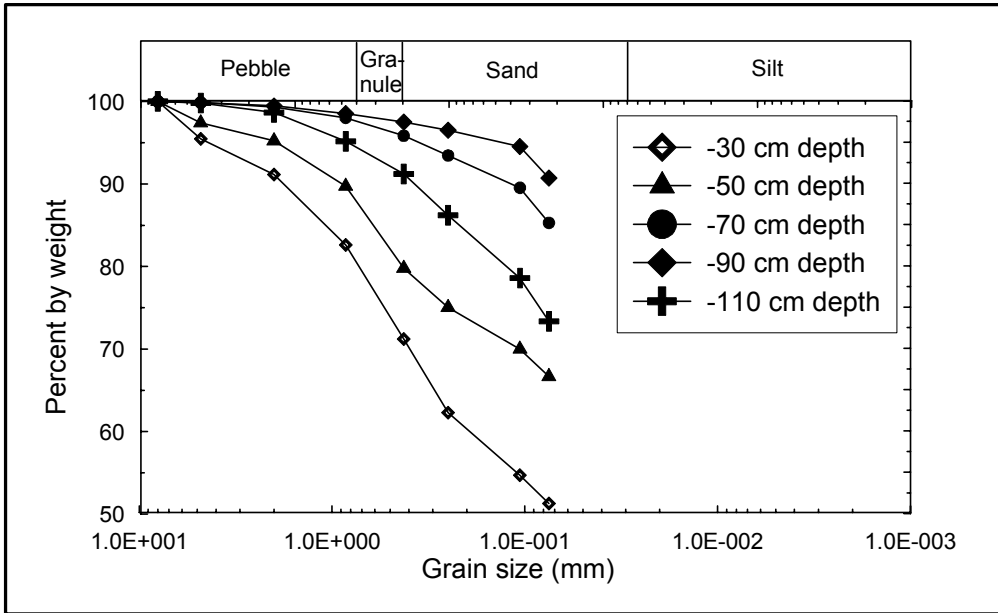
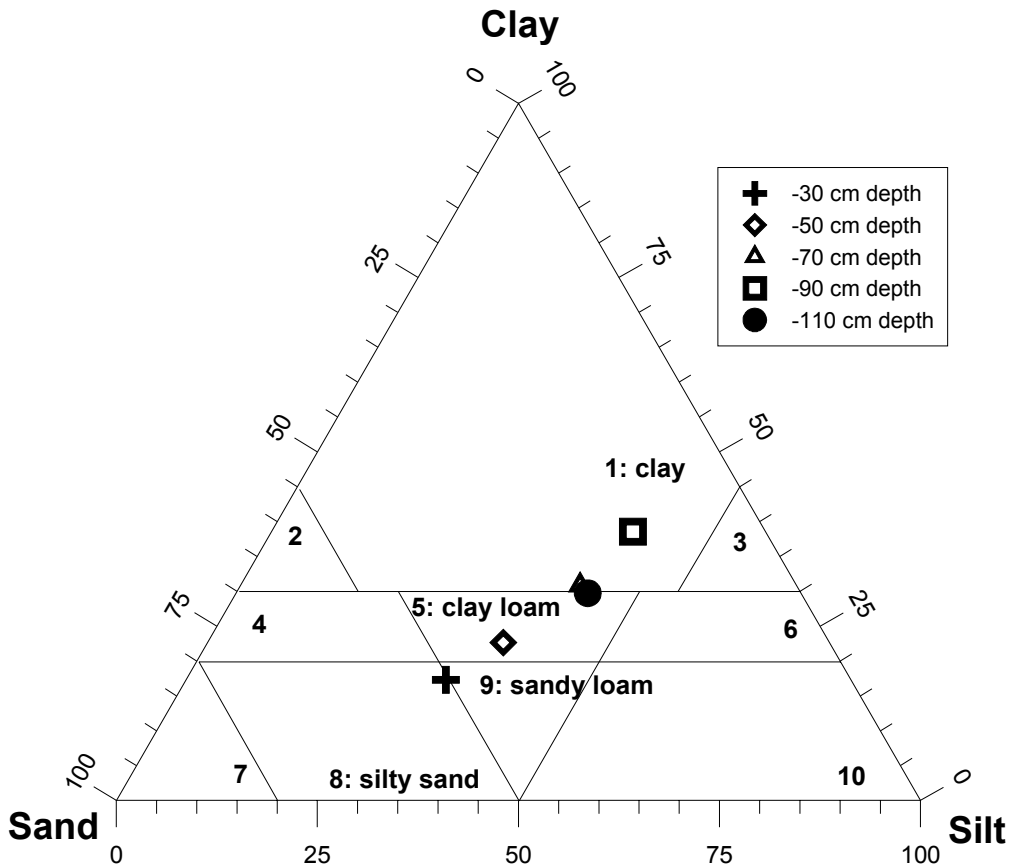


그림 5-2. 논산1 관측공 주변의 심도별 토양입도분포 곡선

- 조립토에 대한 통일분류법(unified soil classification system, USCS)으로 분석한 결과, 앞서 토양입도분포와 유사하게 silt와 clay에 대한 sand 함량이 심도 증가에 따라 증가 및 감소하는 결과가 나타났다<그림 5-3>. 심도별 토성(soil texture)는 각각 sandy loam, clay loam, clay loam, clay 및 clay loam으로 나타났다.

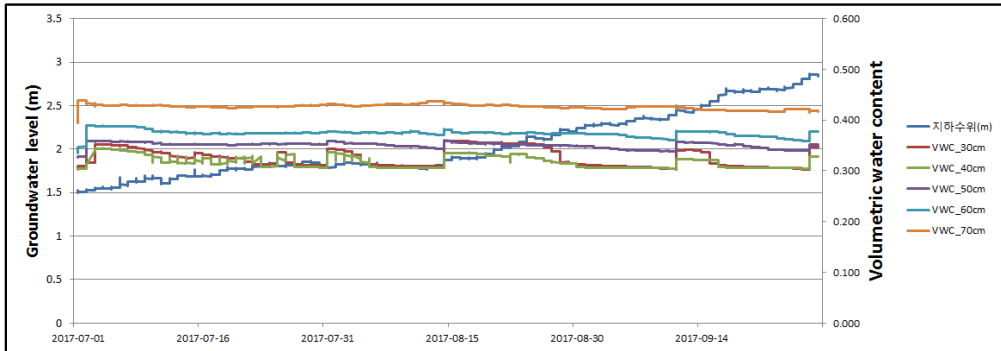


1 : clay, 2 : sandy clay, 3 : silty clay, 4 : silty clay loam, 5 : clay loam  
 6 : silty clay loam, 7 : sand, 8 : silty sand, 9 : sandy loam, 10 : loam  
 11 : silty loam, 12 : silt

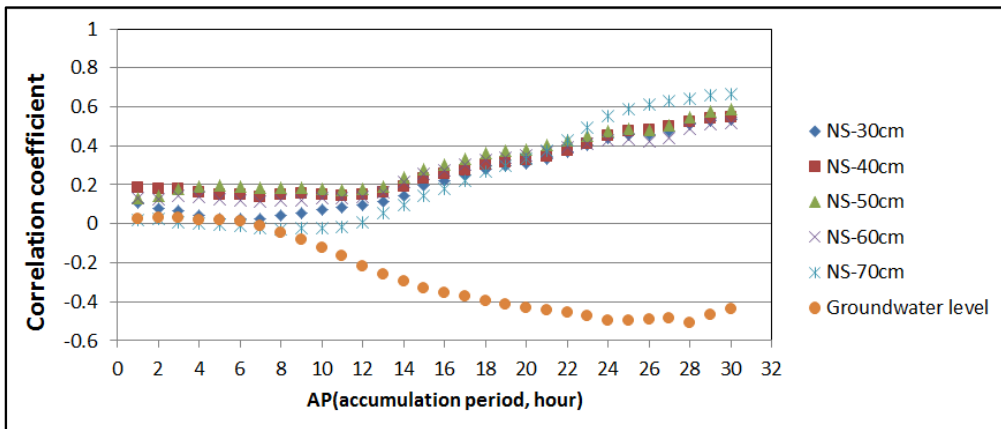
그림 5-3. 논산1 관측공 주변 심도별 토양의 통일분류법 분포

- 강수에 따른 심도별 토양수분의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 강수에 따른 심도별 토양수분 및 지하수위 변동을 분석하였다. <그림 5-4(a)>는 지하수위와 심도별 토양수분함량을 도시한 결과로, 두 인자들의 상관성은 나타나지 않았다. 이러한 결과는 <그림 5-4(b)>에서 제시된 시간별로 관측된 강수량과 심도별 토양수분함량 및 지하수위의 상관계수(correlation coefficient)를 이용한 누적시간(AP)를 분석한 결과에서도 나타나는데, 지하수위 및 토양수분함량의 AP는 각각 0.1 이하의 매우 낮은 값으로부터 두 인자가 각기 다른 경로로 나타남에 따라 상관성이

거의 없는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 5-4. 논산1 관측공 주변의 지하수위와 심도별 토양수분함량(a) 및 강수량과 토양수분함량/지하수위 누적시간 분석(b) 결과

#### 나. 공주1 관측공

- 공주1 관측공 인근에 대하여 지표 하부 30 cm 깊이로부터 10 cm 간격으로 토양수분함량을 모니터링 하였다. 이때 토양수분함량 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 심도별(20 cm 간격)로 토양시료에 대한 입도 분석을 실시하여 토양입도분포 곡선을 도시하였다<그림 5-5>. 분석 결과 전체적으로 토양입도는 심도 증가에 따라 균질한 것으로 나타났지만, 심도 110 cm에서는 sand의 함량이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

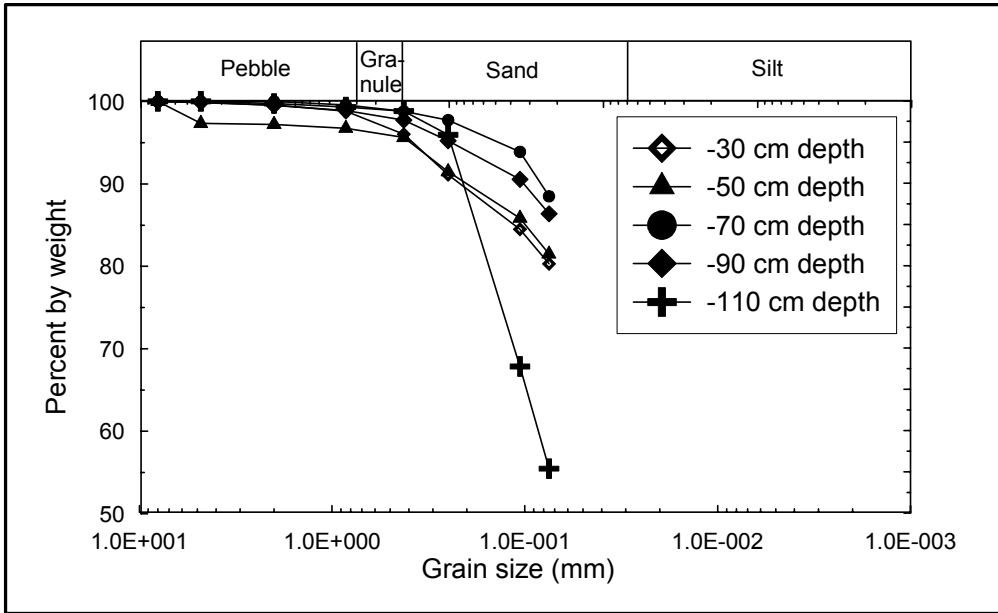
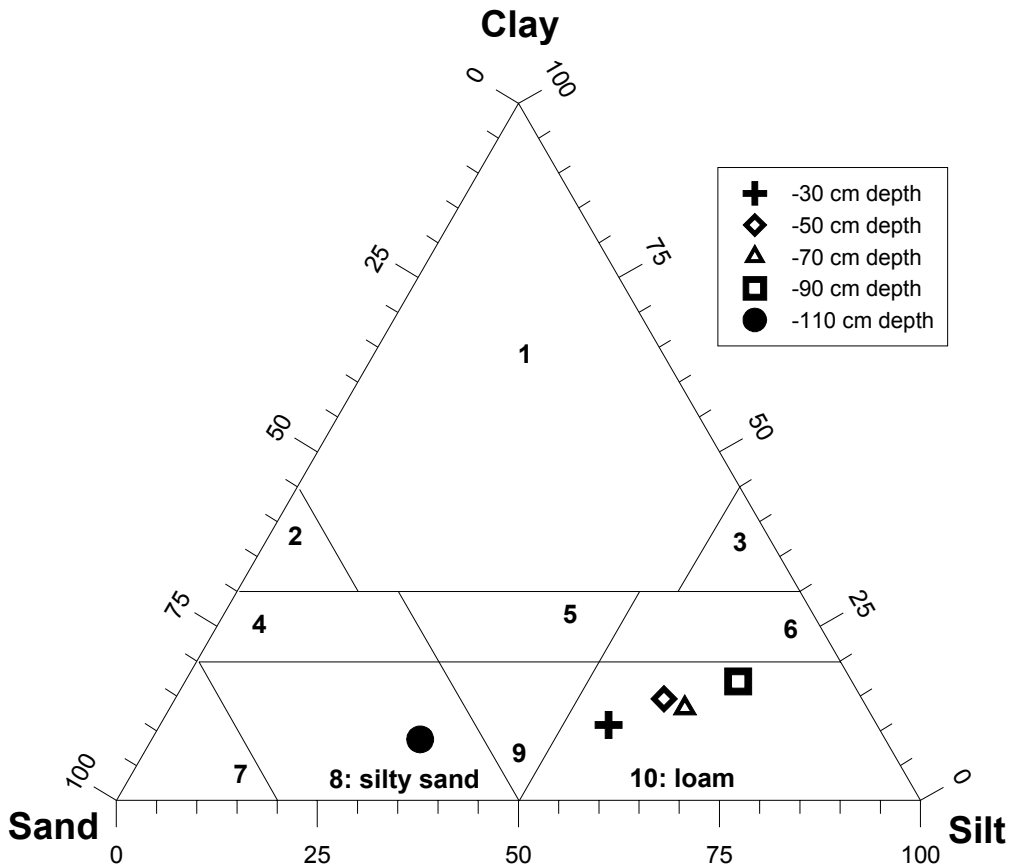


그림 5-5. 공주1 관측공 주변의 심도별 토양입도분포 곡선

- 조립토에 대한 통일분류법(USCS)으로 분석한 결과, 전체적으로 silt의 함량이 상대적으로 풍부한 loam의 토성이 우세하지만 심도 110 cm에서는 silty sand에 해당되는 것으로 나타났다<그림 5-6>.
- 강수에 따른 심도별 토양수분의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 강수에 따른 심도별 토양수분 및 지하수위 변동을 분석하였다. <그림 5-7(a)>는 지하수위와 심도별 토양수분함량을 도시한 결과로, 두 인자들의 상관성은 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 <그림 5-7(b)>에서 제시된 시간별로 관측된 강수량과 심도별 토양수분함량 및 지하수위의 상관계수를 이용한 누적시간(AP)를 분석한 결과에서도 나타나는데, 지하수위의 경우 AP가 약 16시간에서 상관계수가 최대값으로 나타났다.

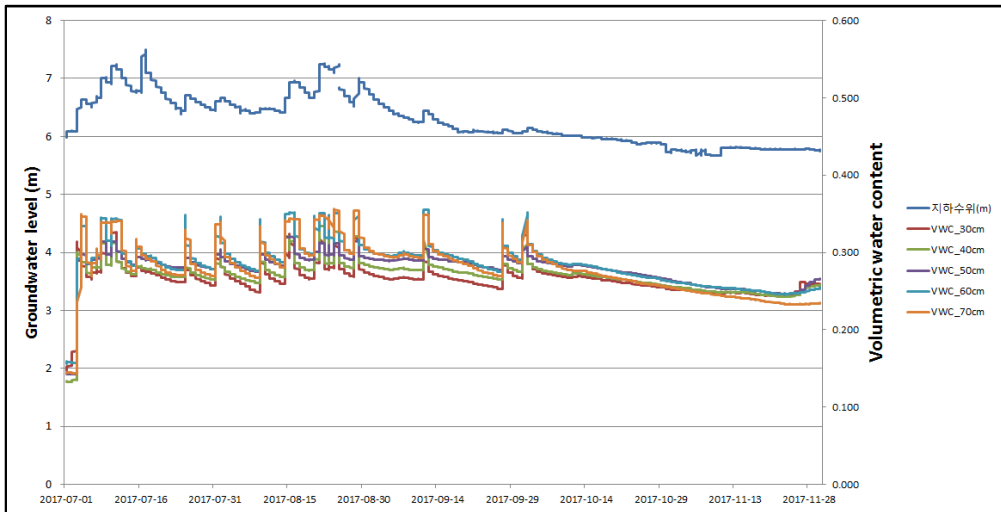




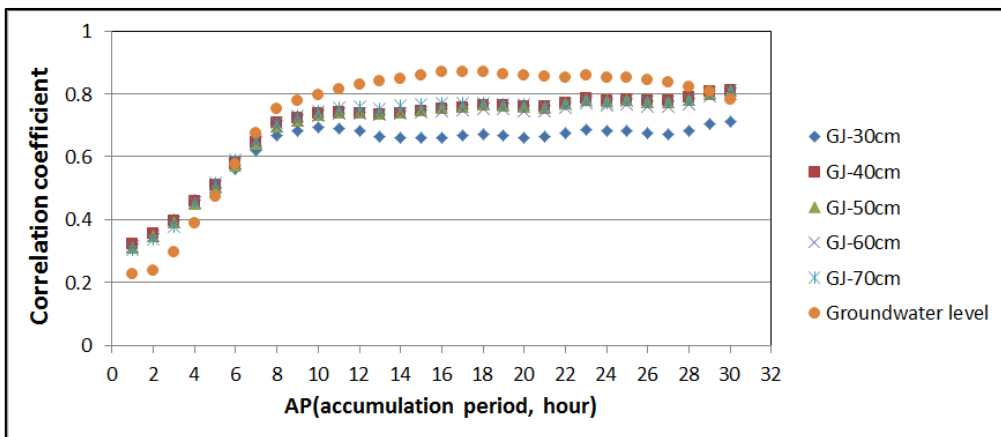
1 : clay, 2 : sandy clay, 3 : silty clay, 4 : silty clay loam, 5 : clay loam  
 6 : silty clay loam, 7 : sand, 8 : silty sand, 9 : sandy loam, 10 : loam  
 11 : silty loam, 12 : silt

그림 5-6. 공주1 관측공 주변 심도별 토양의 통일분류법 분포

- 반면 토양수분함량의 경우에는 AP가 9~11 시간으로 나타남에 따라 강수에 의한 반응이 지하수위 상부의 토양층에서 먼저 반응한 후, 하부의 지하수위 변동에 영향을 미치는 것으로 두 인자들의 상관성이 매우 큰 것으로 판단된다. 이는 토양의 입도 및 토양 특성이 유사한 특성을 반영하는 것으로 해석된다.



(a)



(b)

그림 5-7. 공주1 관측공 주변의 지하수위와 심도별 토양수분함량(a) 및 강수량과 토양수분함량/지하수위 누적시간 분석(b) 결과

#### 다. 청양1 관측공

- 청양1 관측공 인근에 대하여 지표 하부 30 cm 깊이로부터 10 cm 간격으로 토양수분함량을 모니터링 하였다. 이때 토양수분함량 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 심도별(20 cm 간격)로 토양시료에 대한 입도 분석을 실시하여 토양입도분포 곡선을 도시하였다<그림 5-8>. 분석 결과 전체적으로 토양입도는 심도 증가에 따라 균질한 것으로 나타났다.

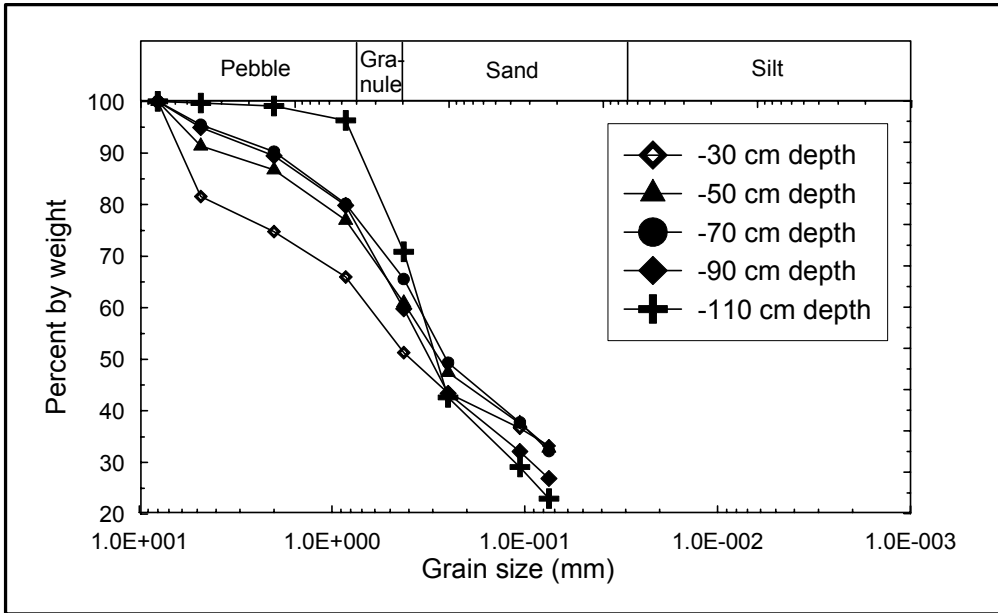
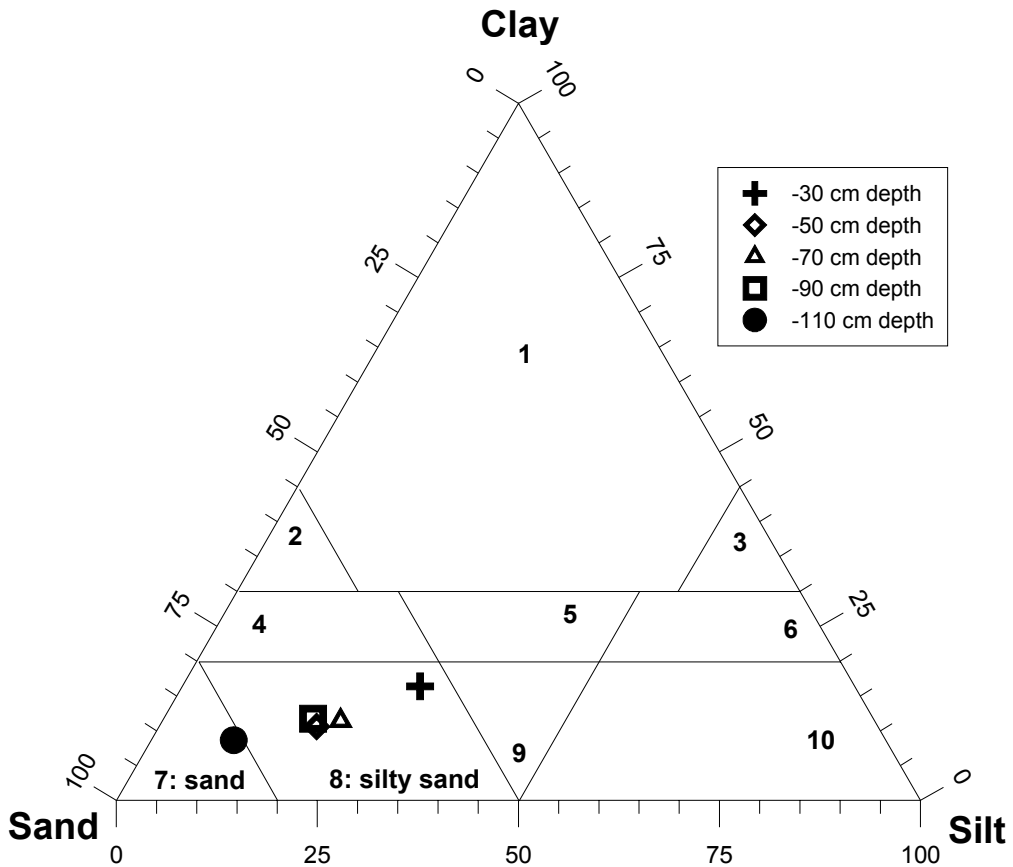


그림 5-8. 청양1 관측공 주변의 심도별 토양입도분포 곡선

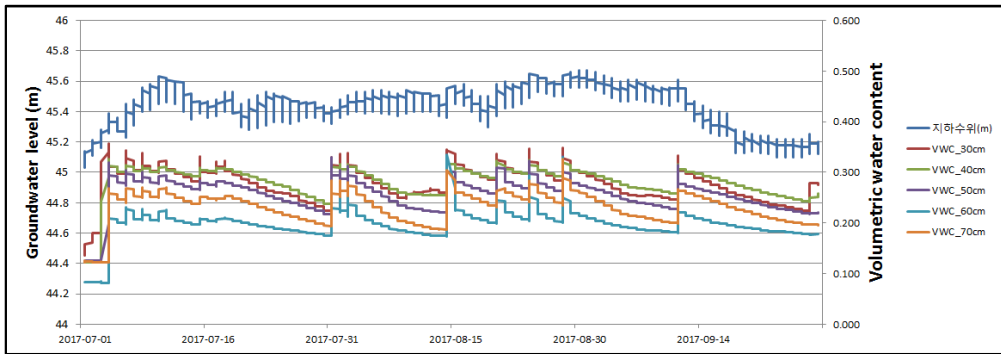
- 조립토에 대한 통일분류법(unified soil classification system, USCS)으로 분석한 결과, 전체적으로 silt의 함량이 상대적으로 풍부한 silty sand의 토성이 우세하지만 심도 110 cm에서는 sand에 해당되는 것으로 나타났다<그림 5-9>.
- 강수에 따른 심도별 토양수분의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 강수에 따른 심도별 토양수분 및 지하수위 변동을 분석하였다. <그림 5-10(a)>는 지하수위와 심도별 토양수분함량을 도시한 결과로, 두 인자들의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 <그림 5-10(b)>에서 제시된 시간별로 관측된 강수량과 심도별 토양수분함량 및 지하수위의 상관계수(correlation coefficient)를 이용한 누적시간(AP)를 분석한 결과에서도 나타나는데, 지하수위의 경우 AP가 약 30시간까지도 지속적으로 상승함에 따라 함양의 효과가 지속적으로 나타나는 것으로 분석되었다.



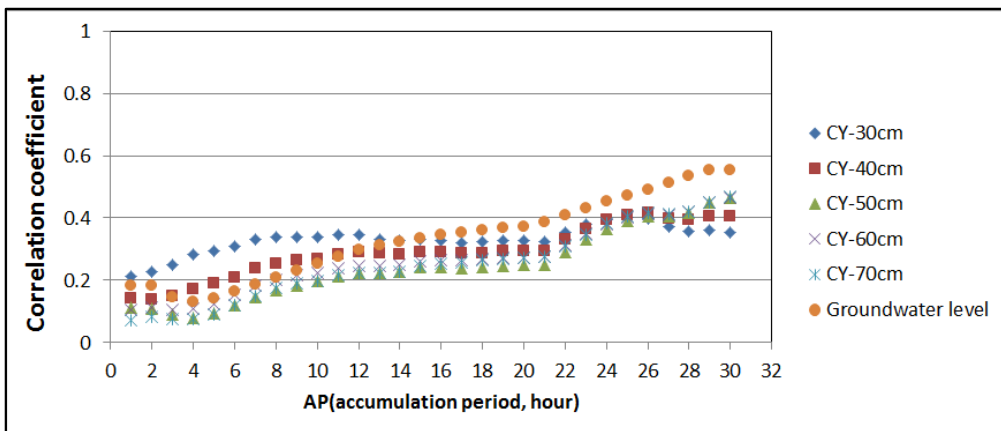
1 : clay, 2 : sandy clay, 3 : silty clay, 4 : silty clay loam, 5 : clay loam  
 6 : silty clay loam, 7 : sand, 8 : silty sand, 9 : sandy loam, 10 : loam  
 11 : silty loam, 12 : silt

그림 5-9. 청양1 관측공 주변 심도별 토양의 통일분류법 분포

- 토양수분함량의 경우에도 상관계수는 지하수위에 비해 적지만 AP가 9 ~11 시간과 약 22 시간을 경계로 지속적으로 상승함에 따라 강수에 의한 반응이 지하수위 상부의 토양층에서 먼저 반응한 후, 하부의 지하수위 변동에 영향을 미치는 것으로 두 인자들의 상관성이 매우 큰 것으로 판단된다. 이는 공주1 관측공과 마찬가지로 토양의 입도 및 토양 특성이 유사한 특성을 반영하는 것으로 해석된다.



(a)



(b)

그림 5-10. 청양1 관측공 주변의 지하수위와 심도별 토양수분함량(a) 및 강수량과 토양수분함량/지하수위 누적시간 분석(b) 결과

## 라. 수질분석 결과

### 1) 공주1 관측공

- 공주1 관측공 지하수와 주변 상·하류부 하천수에 대하여 14개 농업용수질 분석을 실시한 결과, 농도가 검출된 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 3개 항목은 모두 수질기준 이내로 분석되었고, 나머지 11개 항목은 모두 불검출되어 지하수와 하천수를 농업용수로 이용하였을 때 문제가 없는 것으로 분석되었다(표 5-1).

표 5-1. 토양수분측정기 설치 지역 농업용 수질 분석 결과(14개 항목)

항목	공주			논산			청양			수질 기준 (mg/L)
	지하수	상류 하천수	하류 하천수	지하수	상류 하천수	하류 하천수	지하수	상류 하천수	하류 하천수	
수소이온농도	8	7.8	7.6	8.4	7.8	8	7.7	7.6	7.7	6.0-8.5
질산성질소	2.7	3.5	3.9	3.5	6.2	6.4	2.0	3.0	3.0	20
염소이온	65.7	27.8	27.1	13.9	57	54.9	15.5	21.8	21.3	250
카드뮴	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
비소	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
시안	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
수은	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001
유기인	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0005
페놀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.005
납	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
6가크롬	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
트리클로로에틸렌	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
테트라클로로에틸렌	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
1,1,1-트리클로로에탄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3

- 농도가 검출된 3개 항목 중, 수소이온농도(pH)는 지하수와 하천수에서 유사하였다. 염소이온 농도는 지하수가 하천수보다 약 2배 이상 검출되었다. 이는 하천수와 지하수가 제방을 경계로 상호간 유동이 느리거나 유동량이 상대적으로 적다는 것을 의미한다<그림 5-11>.
- 염소이온은 비반응물질로서 일반적으로 지반에 정제되거나 흡착되지 않고, 지하수 유속과 동일하게 이동하는 특성을 보이기 때문에, 제방을 통해 지하수와 하천수의 상호유동이 활발하다면 염소이온 농도가 유사하여야 한다. 또한 수직거리 600 m 내외의 상류부 하천수와 하류부 하천수의 수질이 거의 유사함에 비해, 직선거리 50 m 이내의 지하수와 하천수의 수질이 서로 다른 것은 지하수와 하천수의 상호 유동이 상대적으로 덜 이루어짐을 알 수 있다. 또한 일반적인 농촌지하수에 비해 상대

적으로 높은(65.7 mg/L) 지하수의 염소이온 농도는 토양수분측정기가 설치지의 지하수가 상대적으로 정체되어 있는 것으로 분석된다.

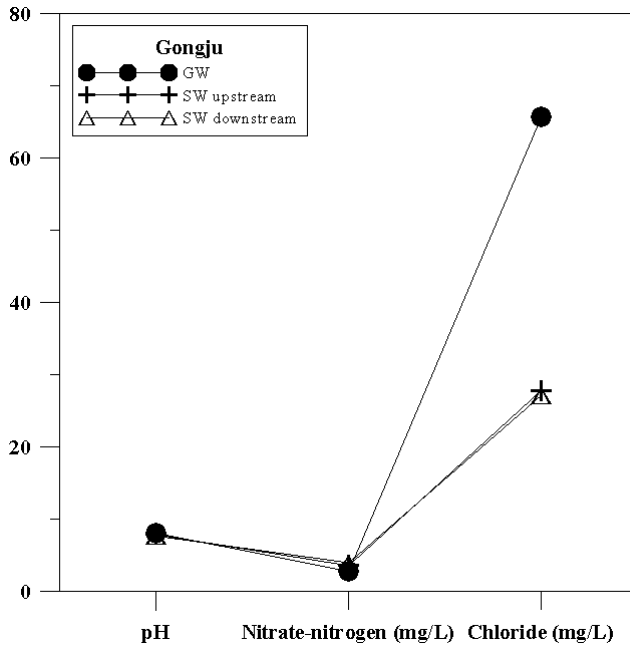


그림 5-11. 공주1 관측공 지하수 및 하천수의 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 농도

- 질산성질소 농도는 미량이나마 지하수에서 약 1 mg/L로 적은 양이 검출되었지만, 지하수 및 하천수 시료가 상대적으로 저농도(지하수 2.7 mg/L, 하천수 3.5~3.9 mg/L)이고 자연상태 배경농도(2~3 mg/L) 수준을 보이므로, 이들 간의 차이를 분석하는 것은 크게 의미가 없다. 다만, 지하수와 하천수의 상호 유동을 명확히 논하기 위해서는 추적자 시험 및 동위원소 분석 등 좀 더 다양한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 이온분석 결과를 토대로, 이 지역에서처럼 지하수와 하천수의 상호유동이 활발하지 않은 경우, 가뭄발생 시 하천수의 과잉양수로 인해 지하수가 하천으로 유입되어 결과적으로 지하수마저 고갈되는 우려는 상대적으로 적은 편으로 볼 수 있다.

## 2) 논산1 관측공

- 토양수분측정기가 설치된 논산1 관측공 부지 지하수와 주변 상·하류부 하천수에 대하여 14개 농업용 수질 분석을 실시하였다. 농도가 검출된 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 3개 항목은 모두 수질기준 이내로 분석되었고, 나머지 11개 항목은 모두 불검출되어 지하수와 하천수를 농업용수로 이용하였을 때 문제가 없는 것으로 분석되었다(표 5-1).
- 농도가 검출된 3개 항목 중, 수소이온농도(pH)는 지하수와 하천수에서 유사하였다. 염소이온 농도는 하천수가 지하수보다 약 4배 이상 검출되었다. 또한 질산성질소 농도도 하천수가 지하수보다 약 2배 이상 검출되었다<그림 5-12>.

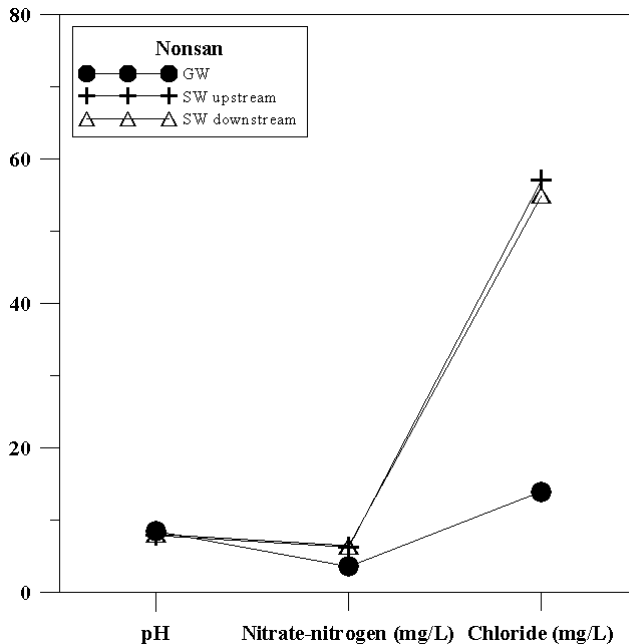


그림 5-12. 논산1 관측공 지하수 및 하천수의 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 농도

- 일반적으로 지하수는 대수층 물질과 상호반응 시간이 길기 때문에 하천수에 비하여 용존이온 농도가 높은 편이다. 그러나 이 지역의 경우, 하천수의 용존이온 농도가 지하수보다 높은 반대의 결과를 보인다. 지하수와 하천수의 유동이 활발하다면, 질산성질소는 제방에서 탈질과정을



거쳐 농도의 감소가 될 수 있지만, 염소이온은 비반응물질로서 제방에 정체되거나 흡착되지 않고, 지하수 유속과 동일하게 이동하는 특성을 보이기 때문에, 하천수와 지하수의 염소이온 농도가 유사하여야 한다. 그러나 하천수와 지하수의 염소이온 농도가 차이가 크게 차이 나기 때문에, 이는 하천수와 지하수가 제방을 경계로 상호간 유동량이 적다는 것을 의미한다.

- 결과적으로, 이 지역은 오염물질이 상대적으로 많이 부하된 하천수가 지하수로 유입되는 양이 적어서 지하수는 청정한 수질을 유지하는 관계를 나타낸다. 다만 지하수와 하천수의 상호 유동을 명확히 논하기 위해서는 추적자 시험 및 동위원소 분석 등 좀 더 다양한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이온분석 결과를 토대로 이 지역에서처럼 지하수와 하천수의 상호유동이 활발하지 않은 경우, 가뭄발생 시 하천수의 과잉양수로 인해 지하수가 하천으로 유입되어 결과적으로 지하수마저 고갈되는 우려는 상대적으로 적은 편으로 볼 수 있다.

### 3) 청양1 관측공

- 토양수분측정기가 설치된 청양1 관측공 부지 지하수와 주변 상·하류부 하천수에 대하여 14개 농업용 수질 분석을 실시하였다(표 5-1). 농도가 검출된 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 3개 항목은 모두 수질기준 이내로 분석되었고, 나머지 11개 항목은 모두 불검출되어 지하수와 하천수를 농업용수로 이용하였을 때 문제가 없는 것으로 분석되었다(표 5-1).
- 청양1 관측공은 앞서와 다르게 농도가 검출된 3개 항목(수소이온농도(pH), 질산성질소, 염소이온)의 분석값이 지하수와 하천수에서 유사하게 나타났다. 질산성질소 농도는 미량이나마 지하수에서 약 1 mg/L 적은 양이 검출되었지만, 지하수 및 하천수 시료가 상대적으로 저농도(지하수 2.0 mg/L, 하천수 3.0 mg/L)이고 자연상태 배경농도(2~3 mg/L) 수준을 보이므로, 이들 간의 차이를 분석하는 것은 크게 의미가 없다. 염소이온농도도 지하수(15.5 mg/L)와 하천수(21.3~21.8 mg/L)에서 유사하여 제방을 통한 지하수와 하천수의 유동이 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타났다<그림 5-13>.

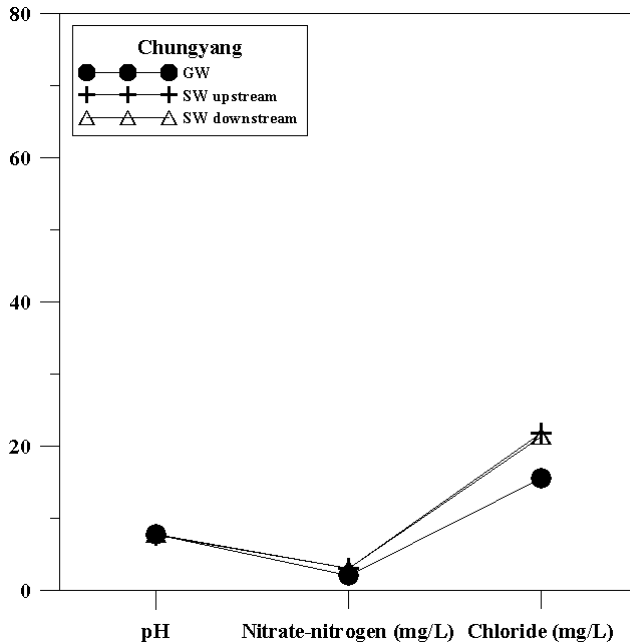


그림 5-13. 청양1 관측공 지하수 및 하천수의 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온 농도

- 그러나 지하수와 하천수의 상호 유동을 명확히 논하기 위해서는 추적자 시험 및 동위원소 분석 등 좀 더 다양한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이온분석 결과를 토대로, 이 지역에서처럼 지하수와 하천수의 상호유동이 활발하게 이루어지는 경우, 가뭄발생 시 하천수와 지하수의 과학적인 양수량 조절과 배분만이 수자원의 고갈을 예방할 수 있을 것으로 판단되며, 최적 배분에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.
- 3개 지역 지하수와 하천수 시료에 대해 상관분석을 실시한 결과 상류부 하천수 시료와 하류부 하천수 시료간의 수질분석결과는 유사하였으나, 지역적으로 지하수와 하천수의 수질이 매우 달라서 지하수와 하천수의 유동이 매우 적은 것으로 판단되는 지역(논산1)도 있고, 다소 적은 것으로 판단되는 지역(공주1)도 있으며, 유동이 활발한 것으로 분석되는 지역(청양1)도 있었다.
- 이러한 결과는 가뭄 발생 시, 하천수와 지하수의 이용에 중요한 시사점

을 제공한다. 즉, 하천수의 과잉양수가 지하수 고갈로 직접 연결될 수 있는지 여부를 알려줄 수 있으며, 지하수와 하천수의 유동이 활발하여 수리적으로 긴밀하게 연결된 경우, 하천수와 지하수의 적정 배분과 이용에 과학적인 사전대응이 가능함을 알려준다.

### 5.1.2 관측공별 SGI 분석

- 본 연구에서는 최소 4년 이상의 관측자료가 축적된 관측공을 대상으로 SGI를 분석하기 위하여, 용수구역별로 2012년 이전에 설치된 농촌지하수관리 관측망 중 3장에서 제시한 상관성과 변동유형 결과를 기준으로 행정구역별로 대표적인 관측공 1개씩 총 68개소를 선정하였다(표 5-2).

표 5-2. SGI 분석에 이용된 농촌지하수관리 관측망(n=68)

경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남
9개소	9개소	8개소	8개소	8개소	10개소	6개소	10개소
가평1	고성1	괴산1	공주1	고창1	무안2	문경1	거제1
광주1	양구1	보은1	금산1	남원1	보성1	봉화1	거창1
김포1	원주2	영동1	논산1	무주1	순천1	상주3	김해1
여주1	인제1	옥천1	보령1	부안1	신안1	안동2	밀양1
용인1	춘천1	음성1	부여1	순창1	영광1	영천1	사천1
이천1	평창1	제천1	서천1	장수1	장성1	청송1	산청1
파주1	홍천1	증평1	청양1	정읍1	장흥1		진주1
평택1	화천1	진천1	홍성1	진안1	진도1		창녕2
화성4	횡성1				함평1		하동4
					화순1		합천1

- SGI 계산은 전체 관측기간 중 전국적으로 가뭄이 발생된 3년(2014~2016년) 기간 동안의 지하수위를 기준으로 매일 12시 기준의 지하수위를 정규분포로 전환하여 계산하는데, 이때 분석 기준은 SPI 정의에서 5개 단계의 구분을 적용하고 확률분포의 평균값과 표준편차를 각각 1과 0으로 설정하였다.
- <그림 5-14(a)>는 여주1 관측공(관측기간 6년: 2011~2016년)과 이천1 관측공(관측기간 9년: 2008~2016년)에 대한 일별 SGI와 강수량의 시계열 자료를 분석하여 도시한 결과이다. 전체적으로 강수량 변화에 따른

SGI 변화가 일치되며, 여주1 관측공은 2015년의 경우 6~7월 기간의 강수량이 매우 적게 나타남에 따라 SGI가 낮게 분포하는 것으로 나타났다.

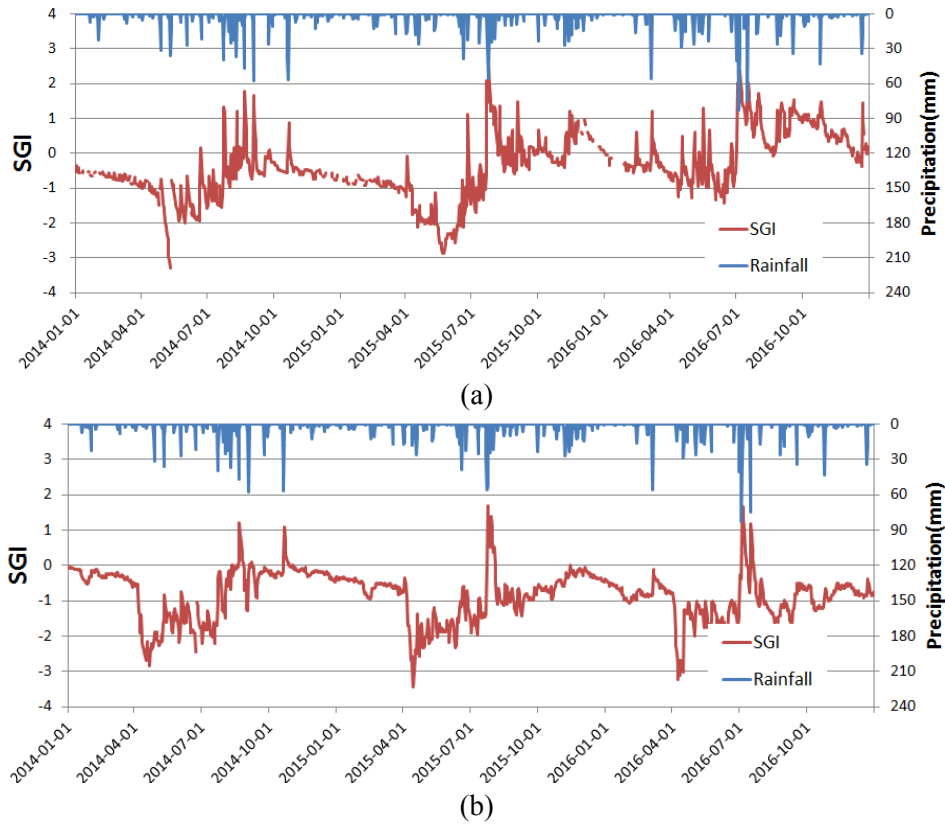


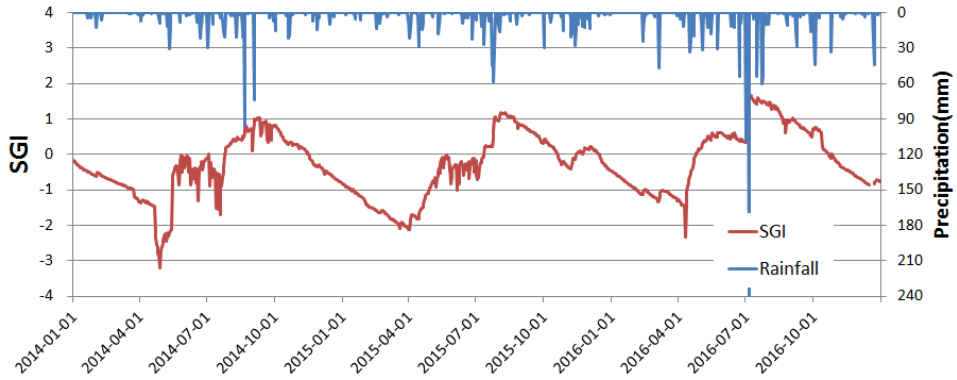
그림 5-14. 강수량과 SGI 분석 결과: (a) 여주1 관측공, (b) 이천1 관측공

- 이천1 관측공은 2014~2016년 모두 6~7월 기간의 강수량 감소에 따른 SGI 감소 현상이 잘 나타남에 따라<그림 5-14(b)>, SGI를 이용한 정량적인 농업가뭄의 평가가 가능함을 확인할 수 있다.

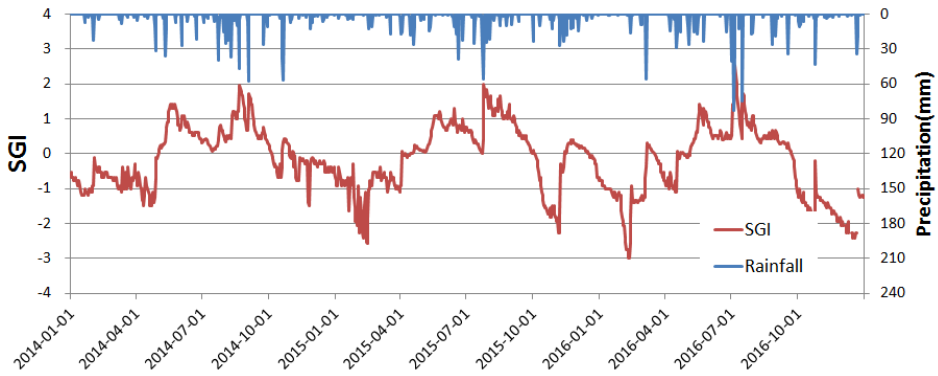
가. 경기도 관측공(n=9)

- 경기도에 분포하는 9개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 관측공들 간의 차이는 있지만, 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-15>.

- 그러나 가평1, 김포1, 파주1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 광주1, 용인1, 파주1, 평택1, 화성4 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.

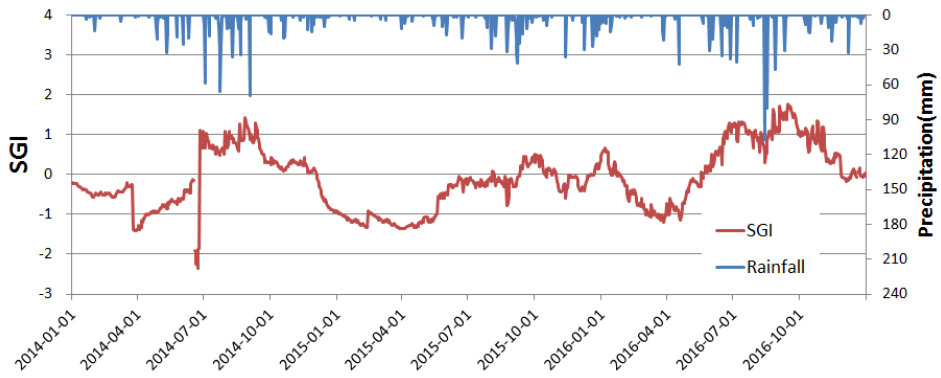


(a) 가평1

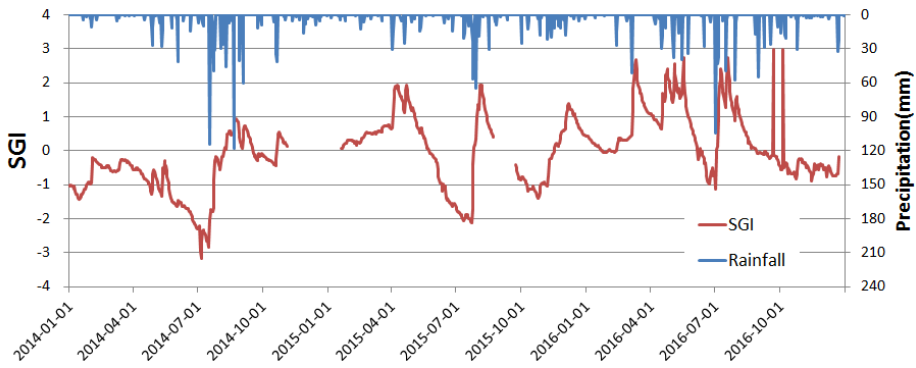


(b) 광주1

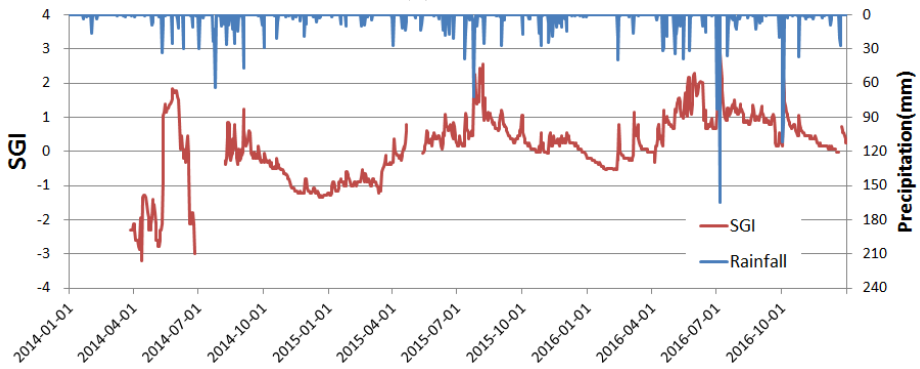
그림 5-15. 경기도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(c) 김포1

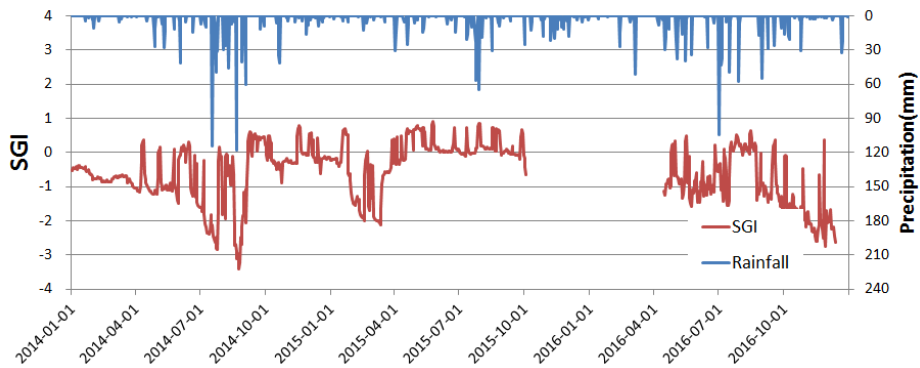


(d) 용인1

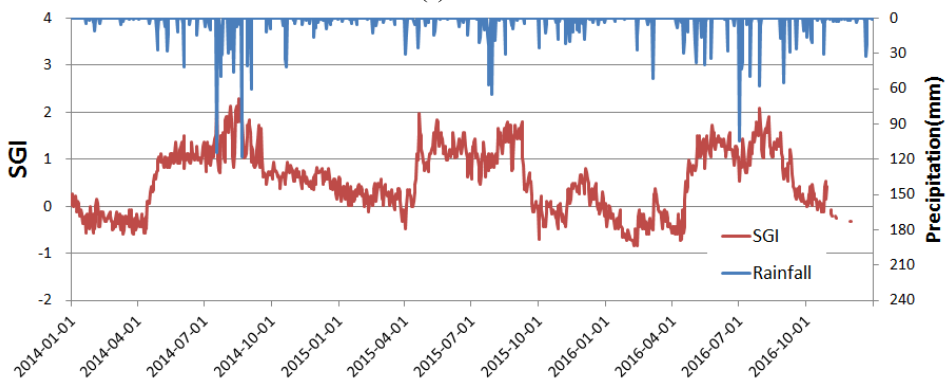


(e) 파주1

그림 5-15. 경기도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(f) 평택1

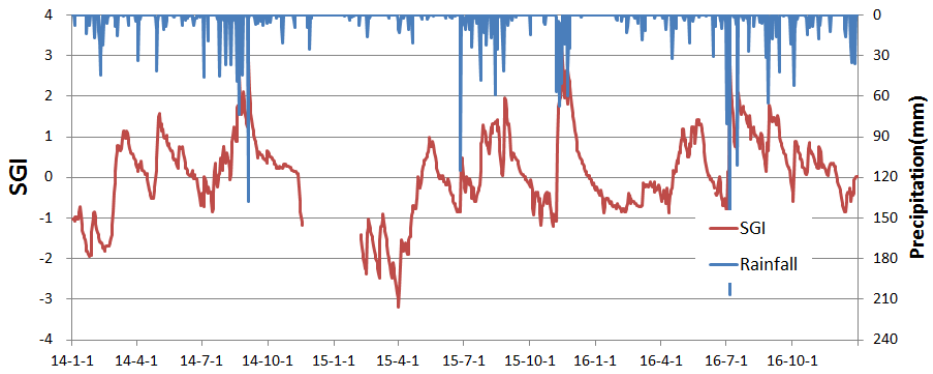


(g) 화성4

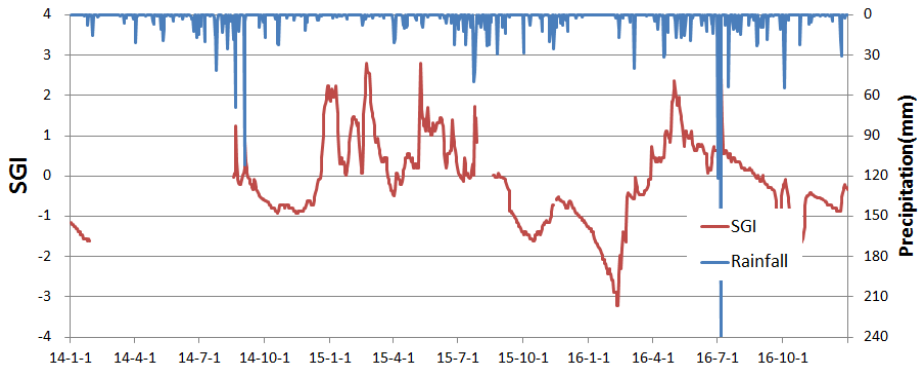
그림 5-15. 경기도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

나. 강원도 관측공(n=9)

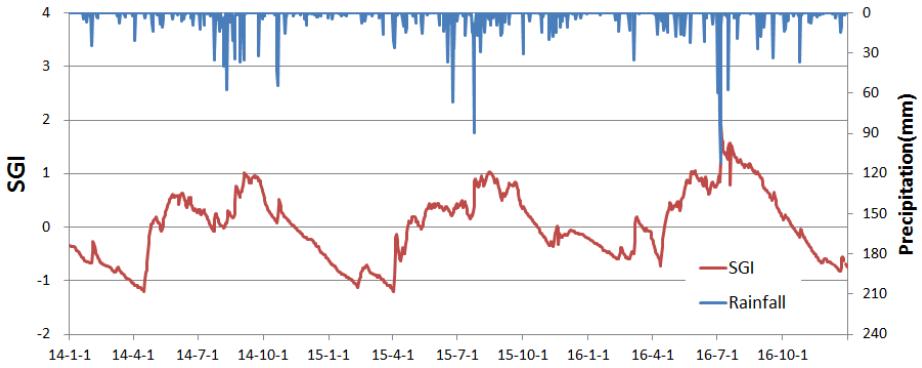
- 강원도에 분포하는 9개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 경기도의 관측공들과와 마찬가지로 약간의 차이는 있지만, 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-16>.
- 그러나 원주2, 춘천1, 홍천1, 횡성1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 고성1, 양구1, 인제1, 평창1, 화천1 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.



(a) 고성1



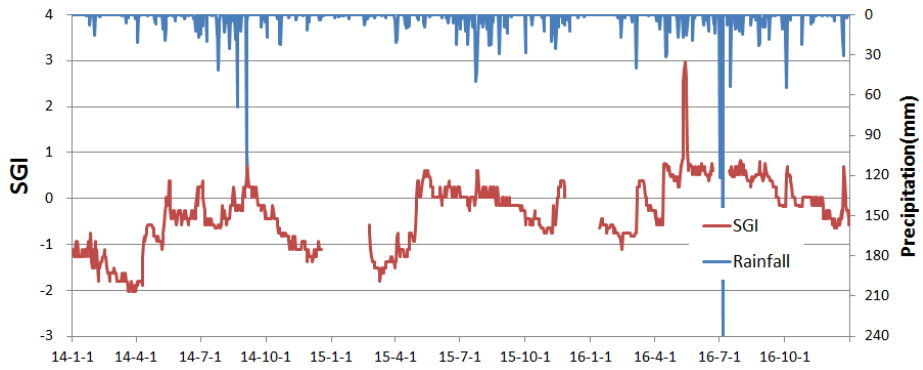
(b) 양구1



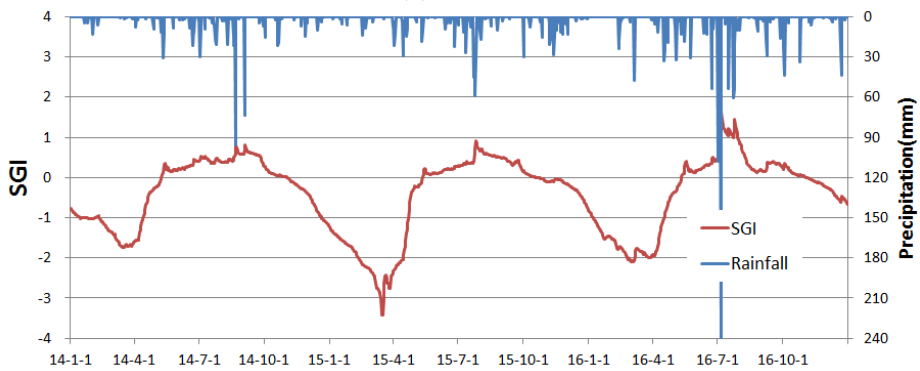
(c) 원주2

그림 5-16. 강원도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과

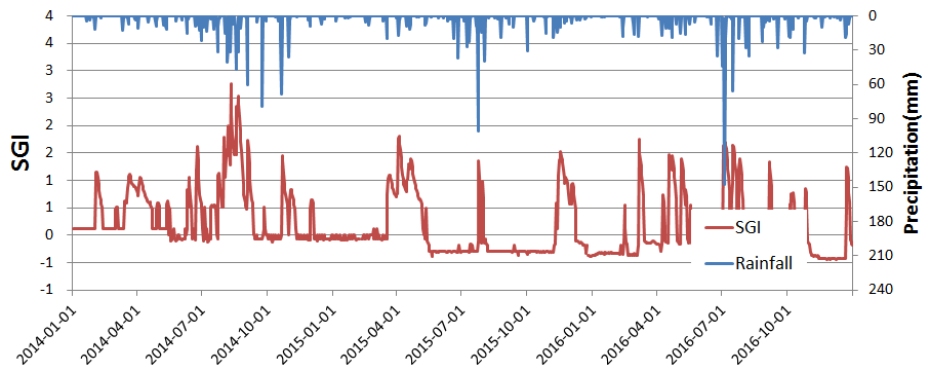




(d) 인제1

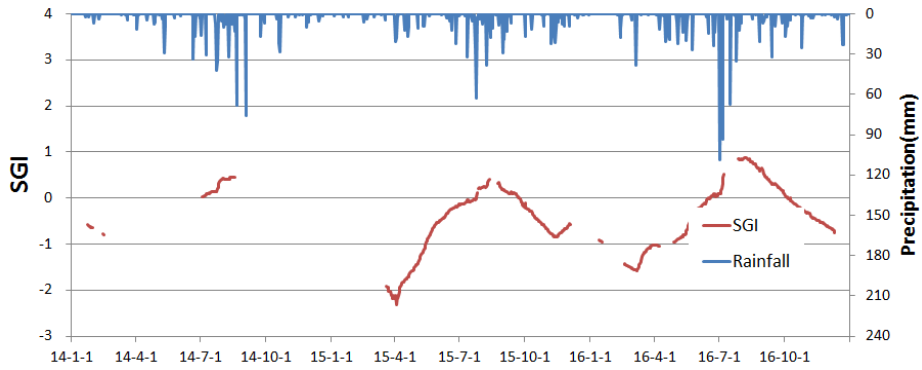


(e) 춘천1

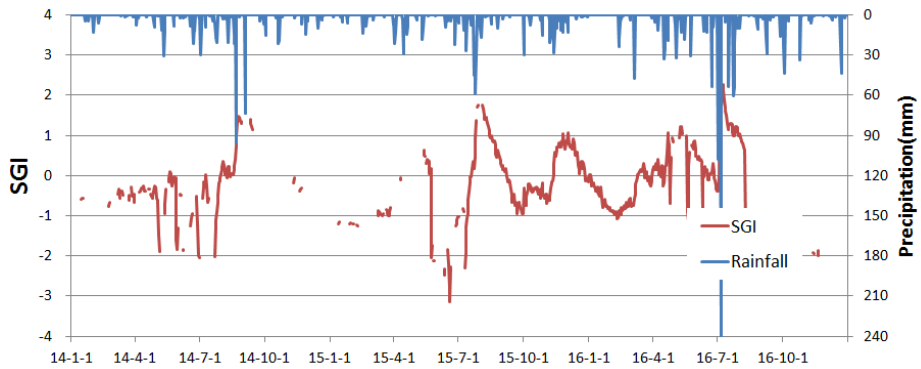


(f) 평창1

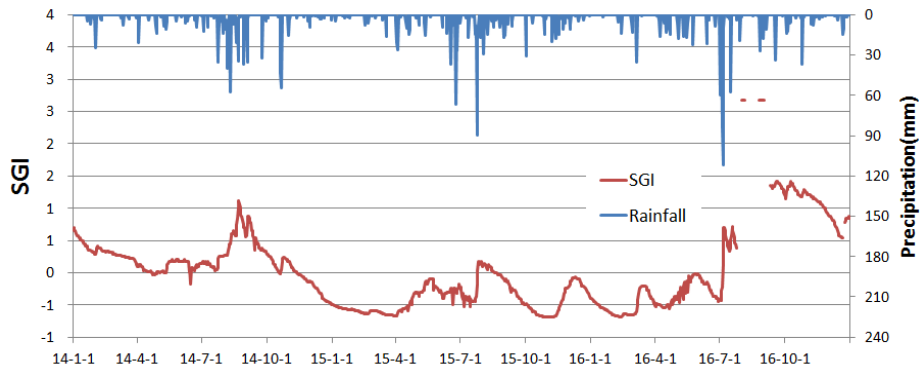
그림 5-16. 강원도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(g) 홍천1



(h) 화천1



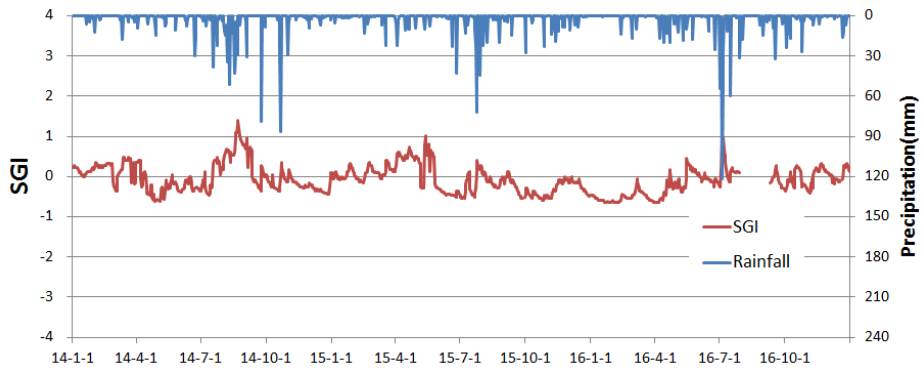
(i) 황성1

그림 5-16. 강원도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

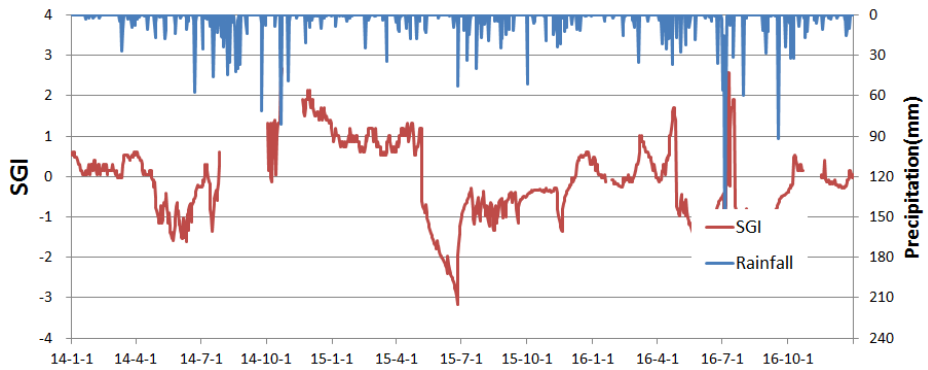
다. 충청북도 관측공(n=8)

- 충청북도에 분포하는 8개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 앞서 분석된 관측공과 마찬가지로 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에

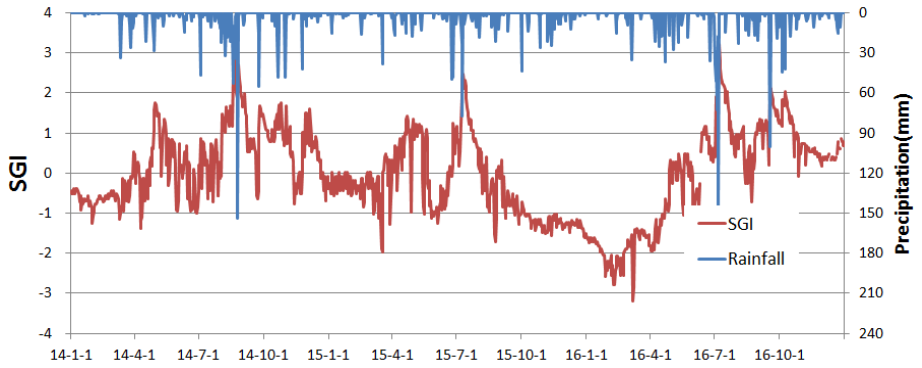
낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-17>.



(a) 괴산1

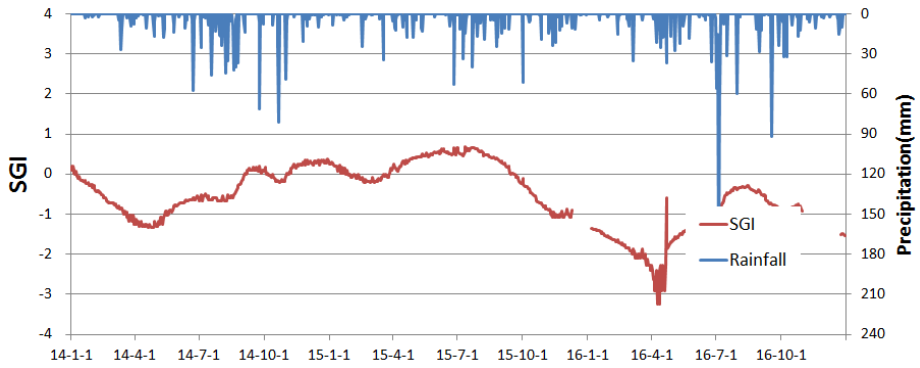


(b) 보은1

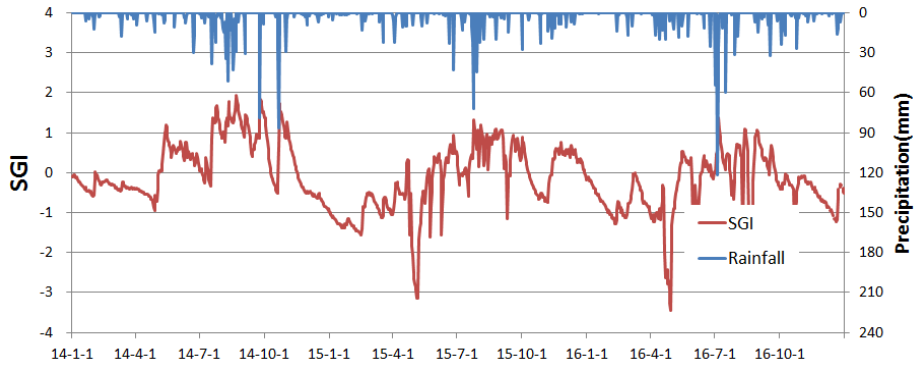


(c) 영동1

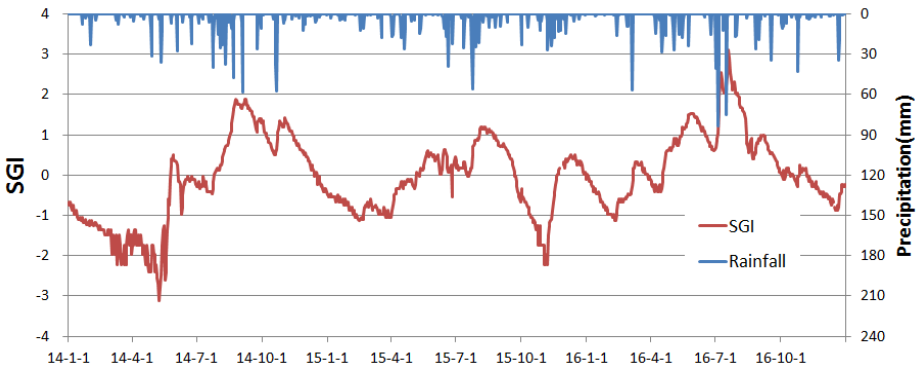
그림 5-17. 충청북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(d) 옥천1

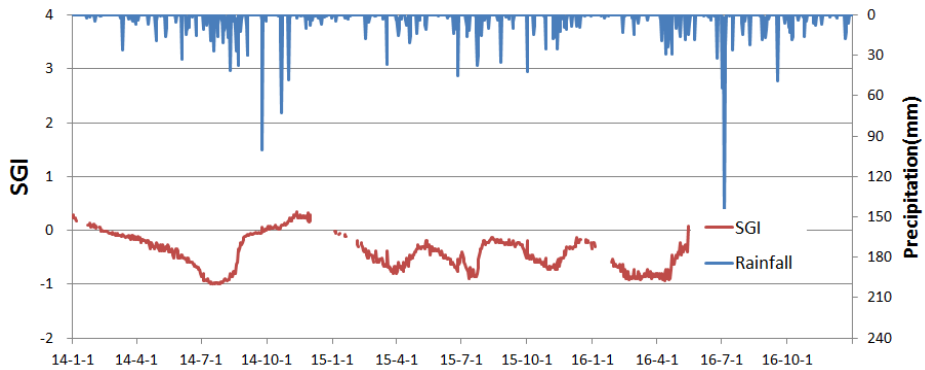


(e) 음성1

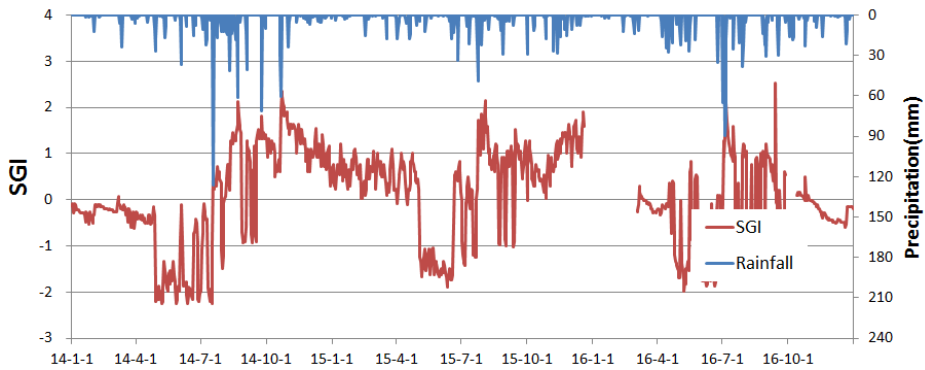


(f) 제천1

그림 5-17. 충청북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(g) 증평1



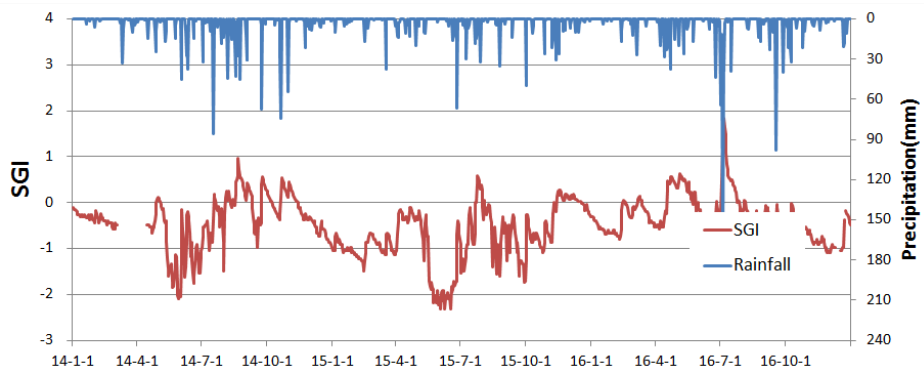
(h) 진천1

그림 5-17. 충청북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

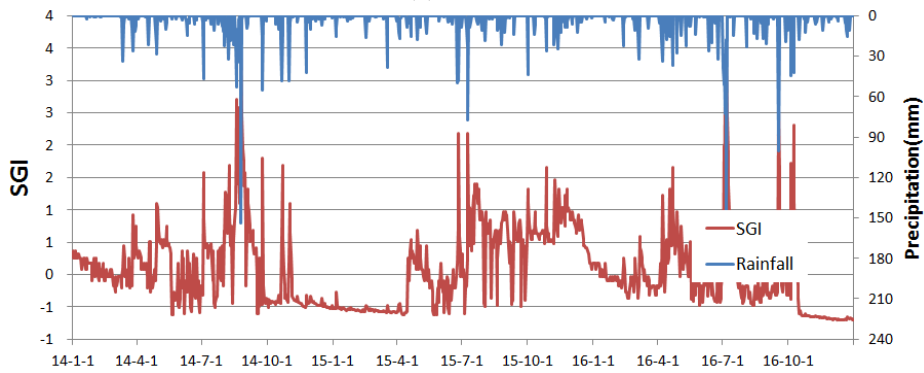
- 옥천1, 제천1, 증평1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 괴산1, 보은1, 영동1, 음성1, 진천1 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.

라. 충청남도 관측공(n=9)

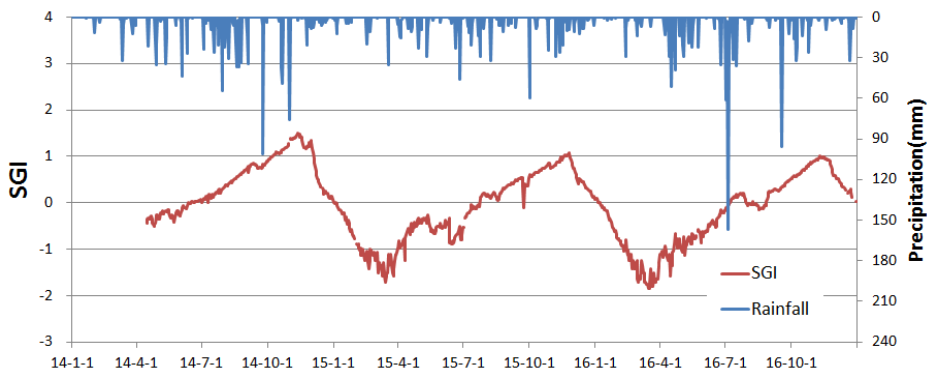
- 충청남도에 분포하는 9개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 앞서 분석된 관측공과 마찬가지로 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-18>.
- 논산1, 부여1, 청양1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 공주1, 금산1, 보령1, 서천1, 아산1, 청양1, 홍성1 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.



(a) 공주1

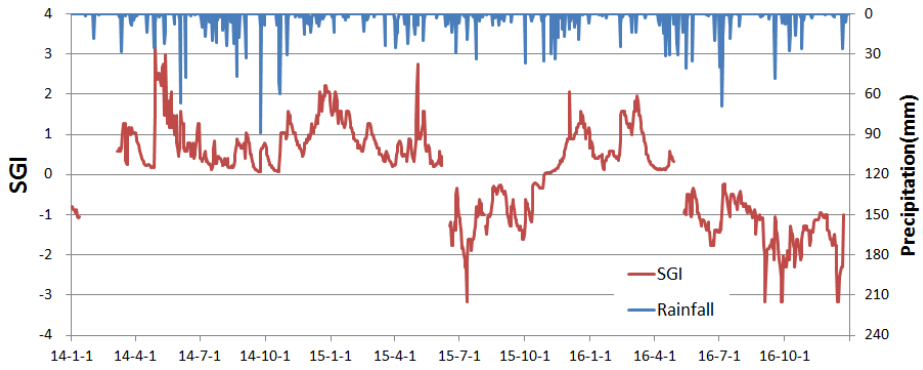


(b) 금산1

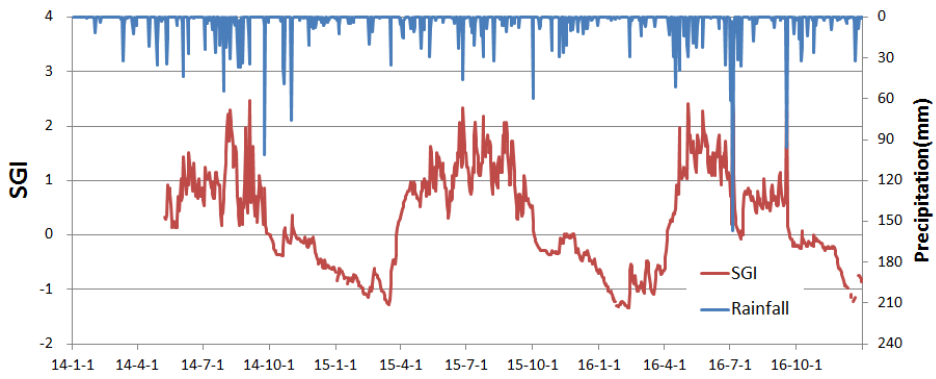


(c) 논산1

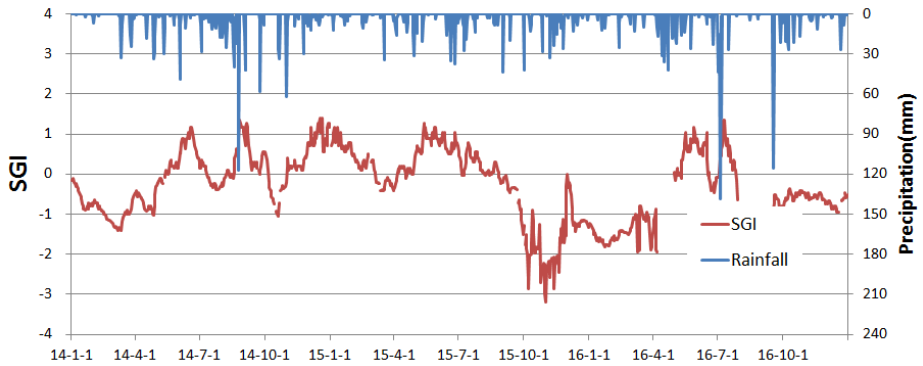
그림 5-18. 충청남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(d) 보령1

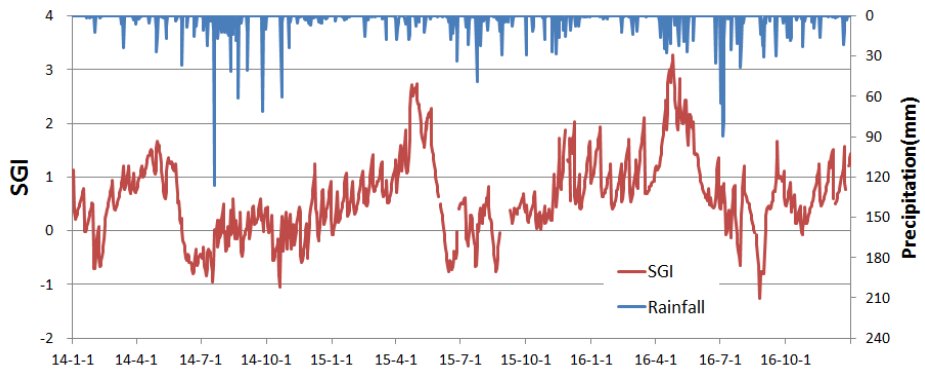


(e) 부여1

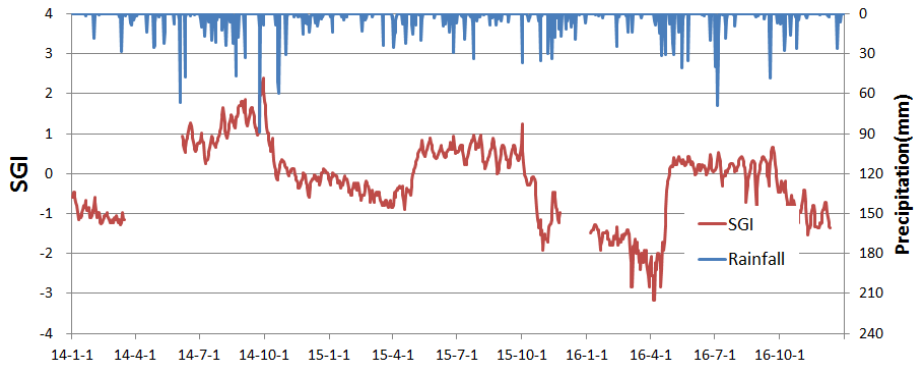


(f) 서천1

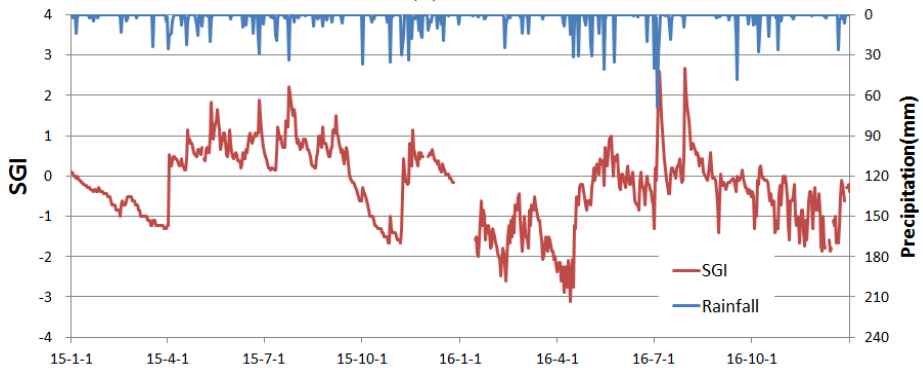
그림 5-18. 충청남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(g) 아산1



(h) 청양1



(i) 홍성1

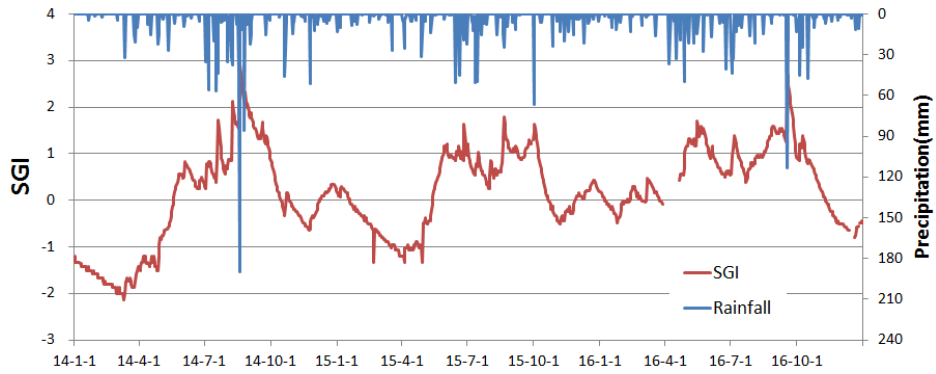
그림 5-18. 충청남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

마. 전라북도 관측공(n=8)

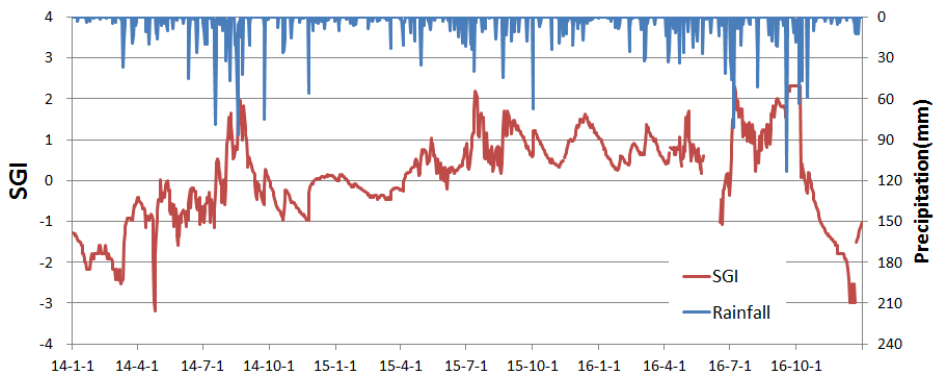
◦ 전라북도에 분포하는 8개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 앞서



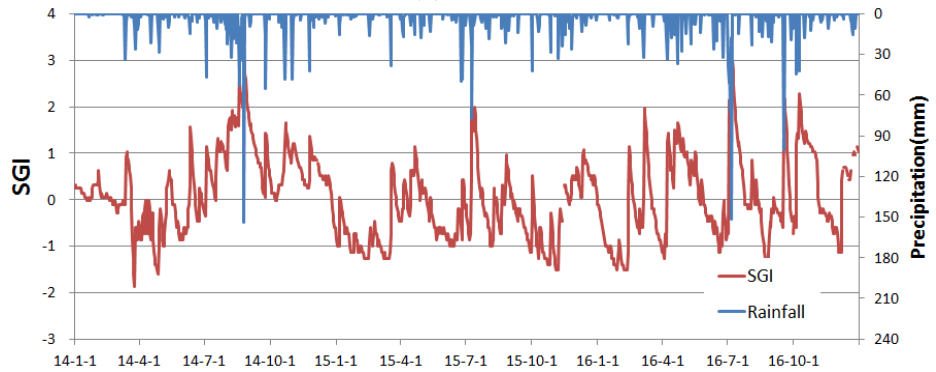
분석된 관측공과 마찬가지로 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-19>.



(a) 고창1

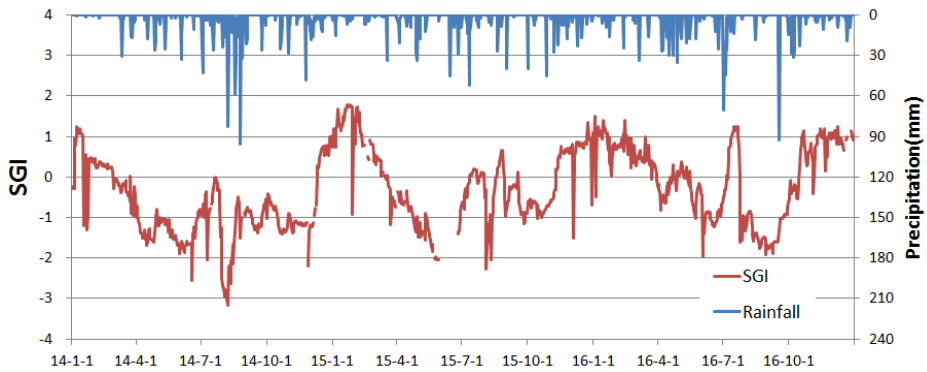


(b) 남원1

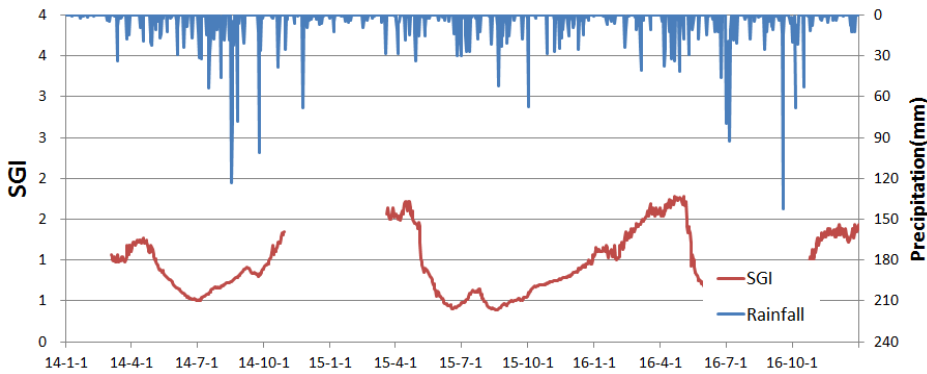


(c) 무주1

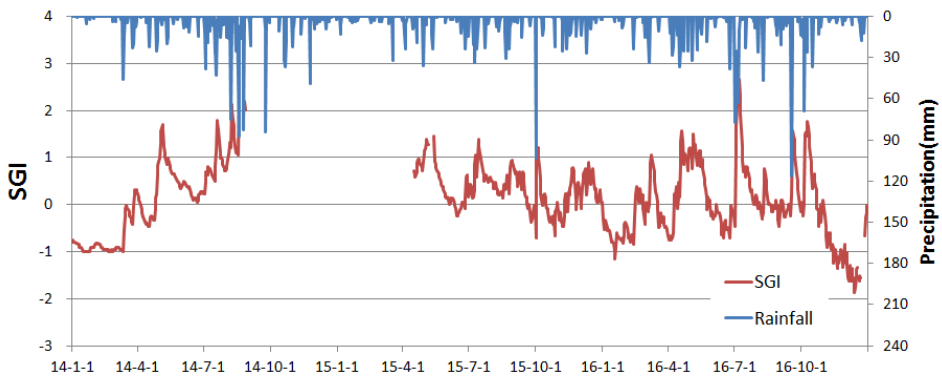
그림 5-19. 전라북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(d) 부안1

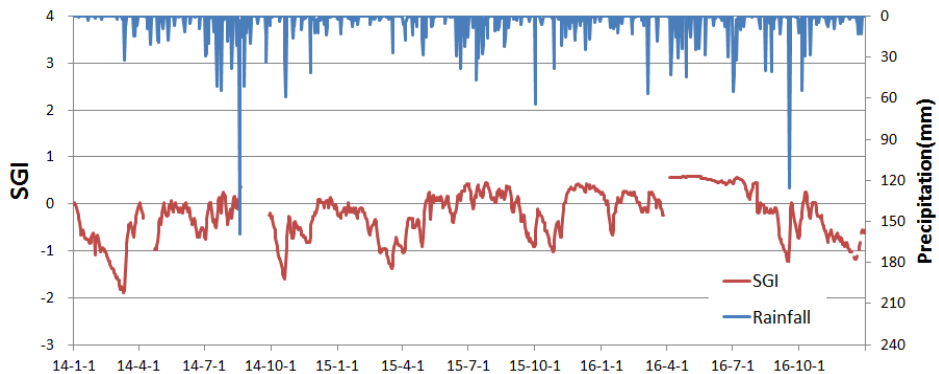


(e) 순창1

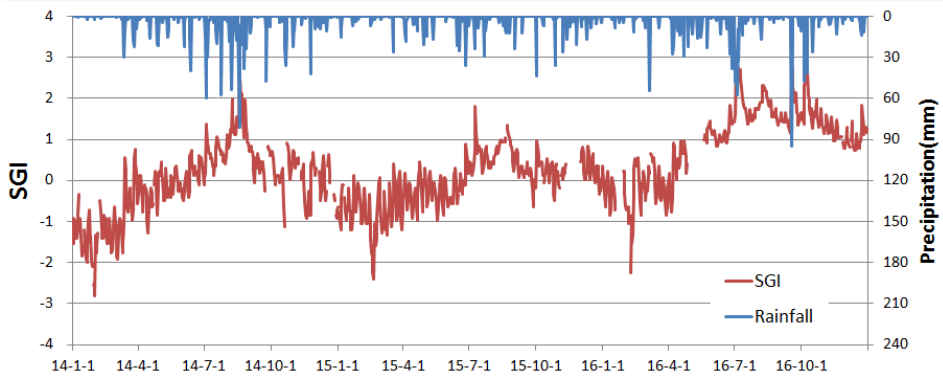


(f) 장수1

그림 5-19. 전라북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(g) 정읍1



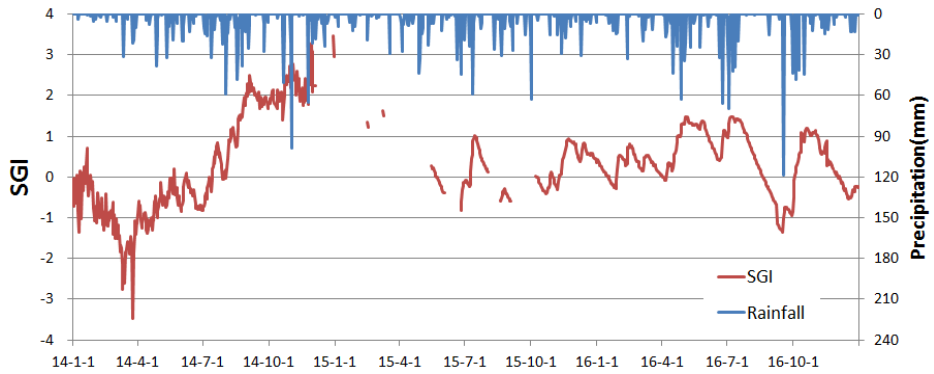
(h) 진안1

그림 5-19. 전라북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

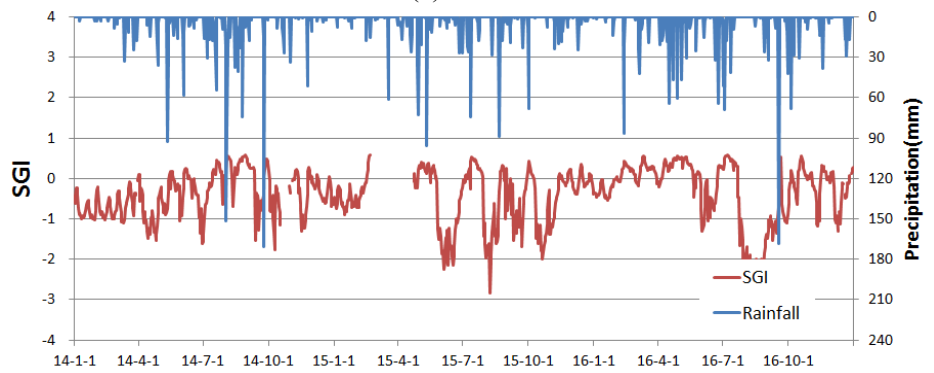
- 고창1, 순창1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 남원1, 무주1, 부안1, 장수1, 정읍1, 진안1 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.

바. 전라남도 관측공(n=10)

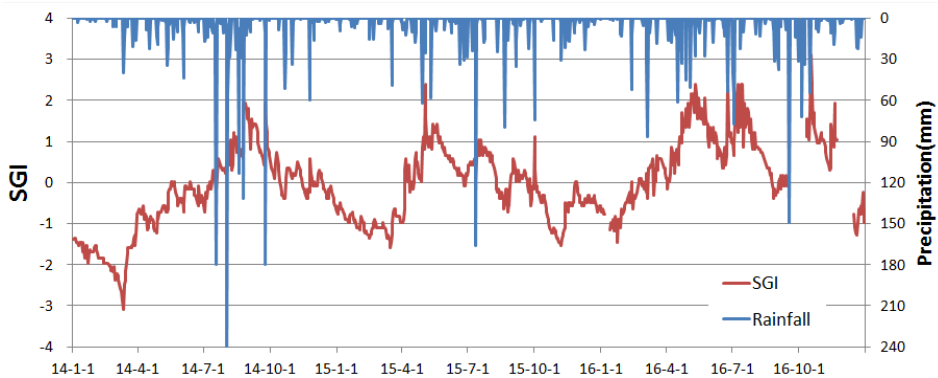
- 전라북도에 분포하는 10개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 앞서 분석된 관측공과 마찬가지로 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-20>.



(a) 무안2

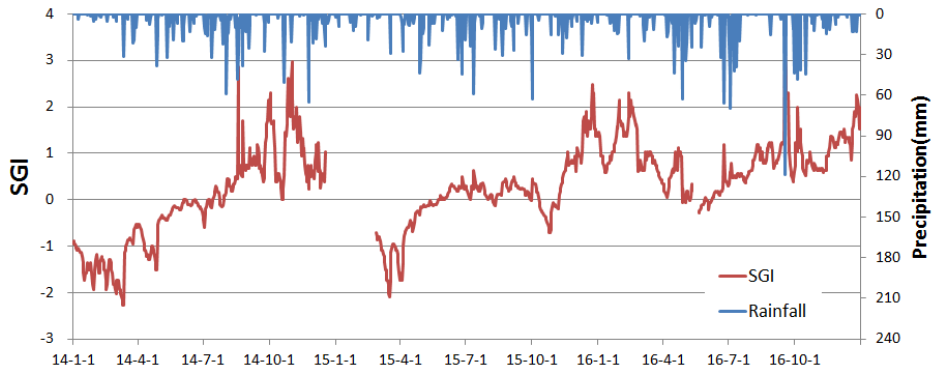


(b) 보성1

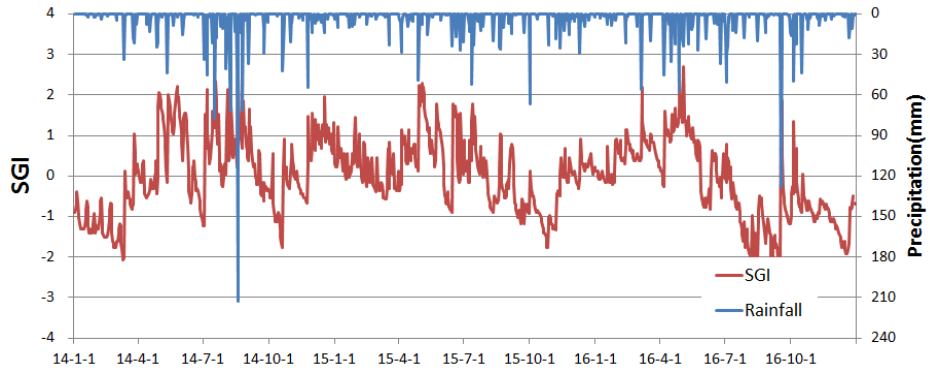


(c) 순천1

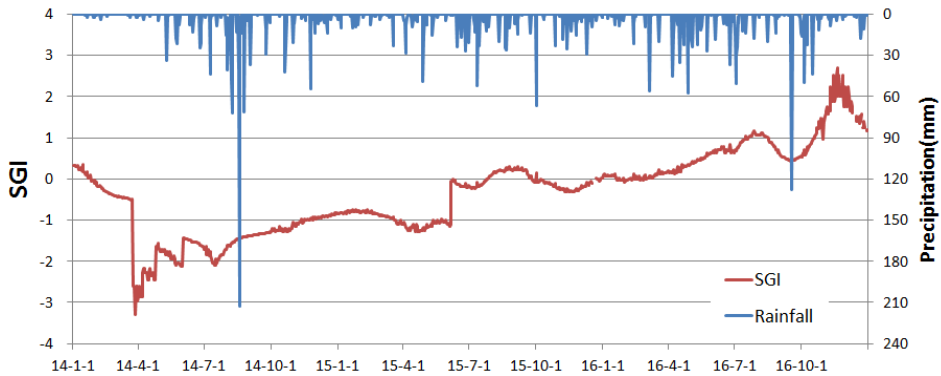
그림 5-20. 전라남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(d) 신안1

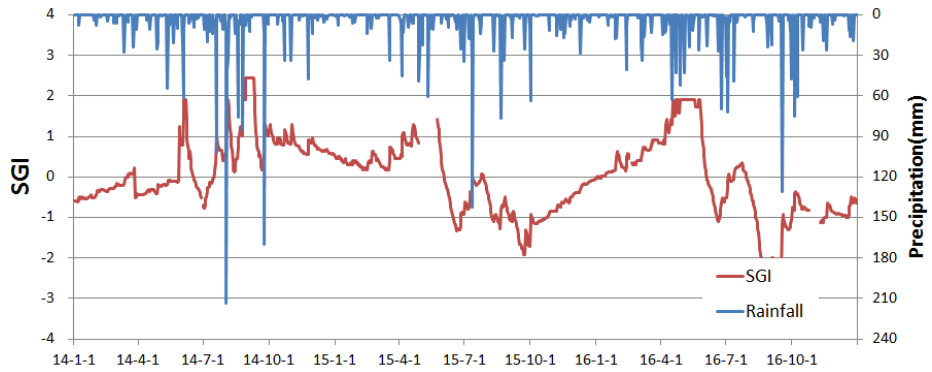


(e) 영광1

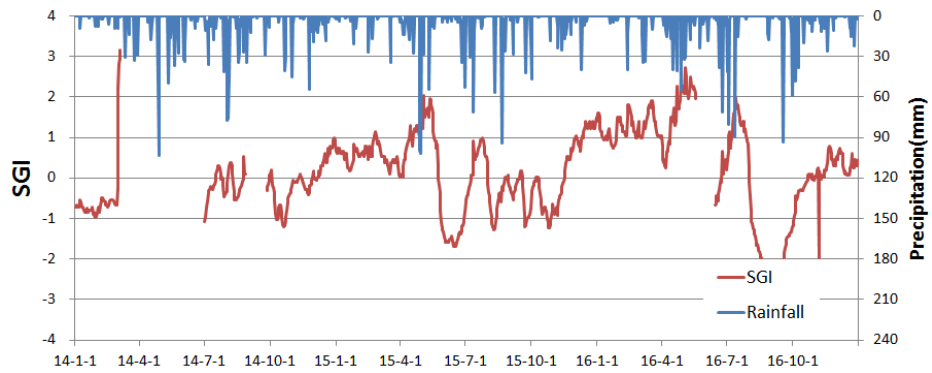


(f) 장성1

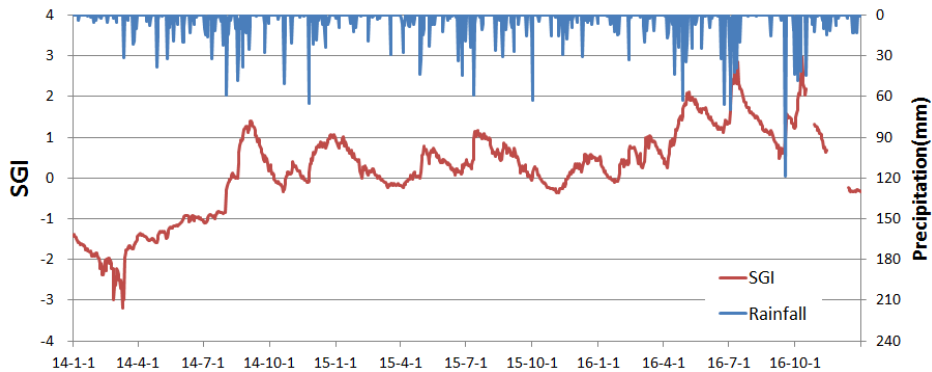
그림 5-20. 전라남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(g) 장흥1

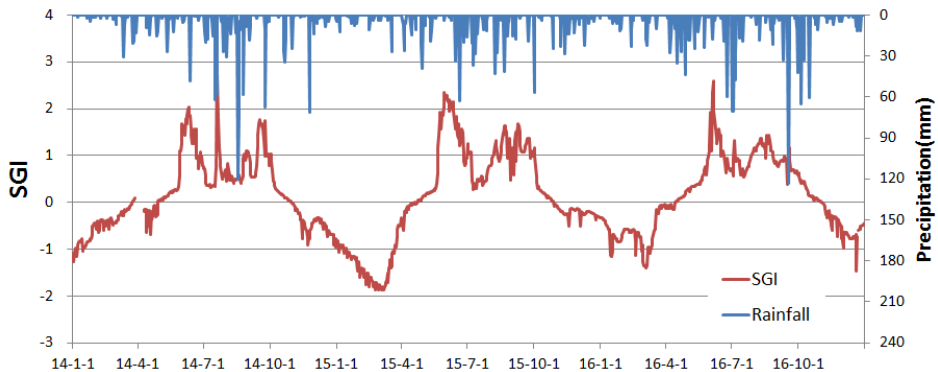


(h) 진도1



(i) 함평1

그림 5-20. 전라남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



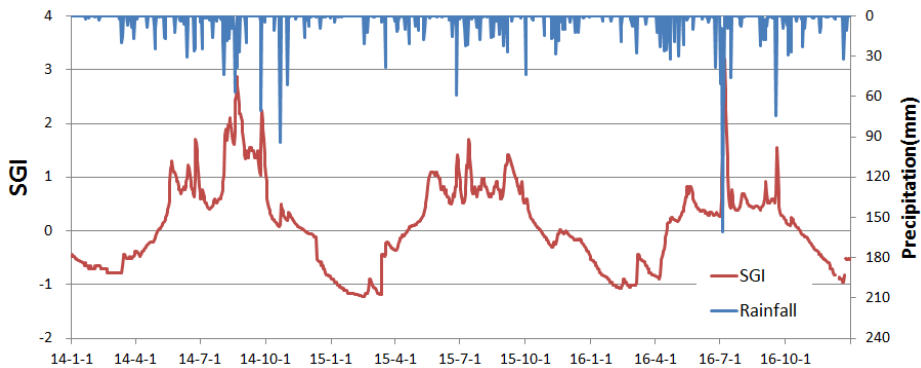
(j) 화순1

그림 5-20. 전라남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

- 장성1, 장흥1, 화순1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 무안2, 보성1, 순천1, 신안1, 영광1, 진도1, 함평1 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.

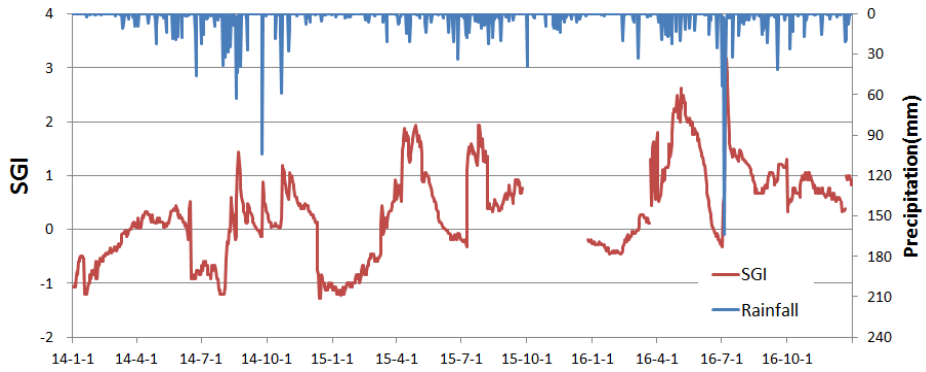
사. 경상북도 관측공(n=6)

- 경상북도에 분포하는 6개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 앞서 분석된 관측공과 마찬가지로 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-21>.

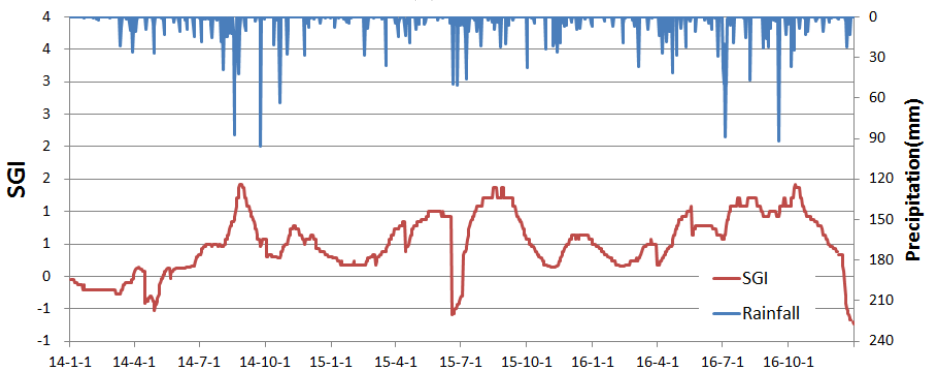


(a) 문경1

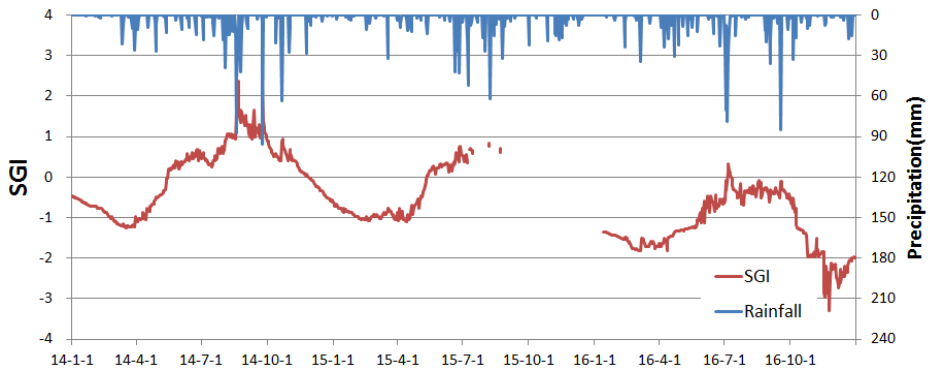
그림 5-21. 경상북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(b) 봉화1



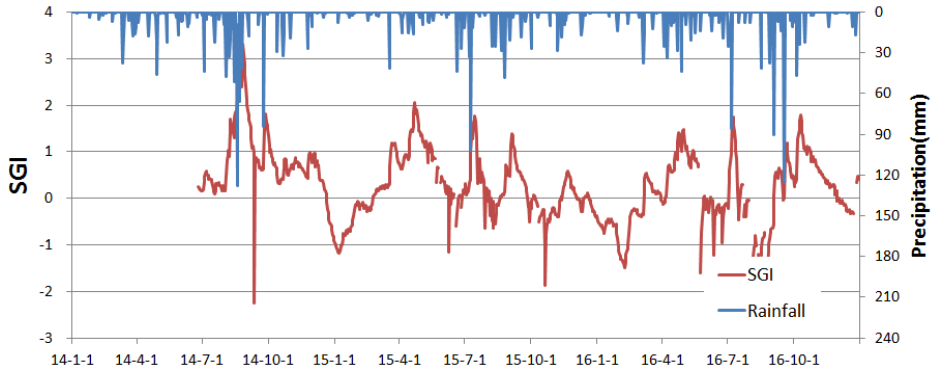
(c) 상주3



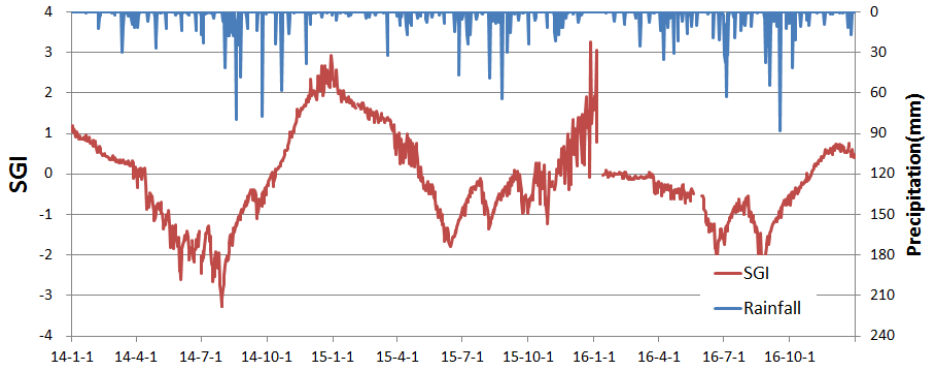
(d) 안동2

그림 5-21. 경상북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)





(e) 영천1



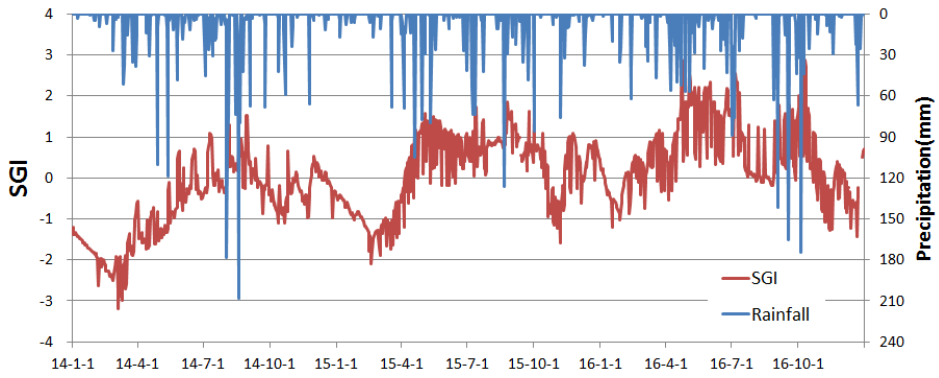
(f) 청송1

그림 5-21. 경상북도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

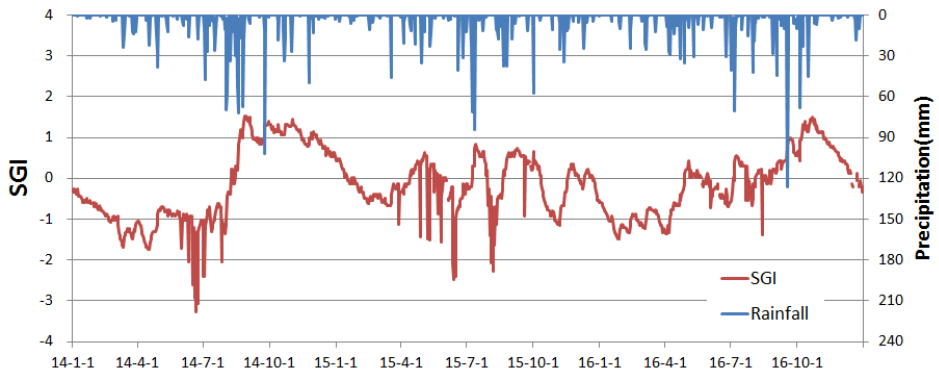
- 문경1, 안동2, 청송1 관측공의 경우에는 SGI의 변화 경향이 장기간에 걸쳐 나타나는 반면, 봉화1, 상주3, 영천1 관측공의 경우에는 강수량 변화에 상대적으로 민감한 반응 결과가 나타났다.

아. 경상남도 관측공(n=10)

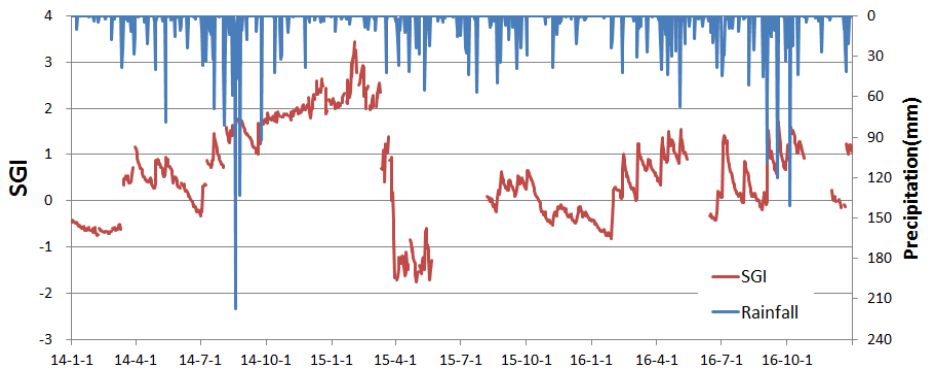
- 경상북도에 분포하는 6개 관측공의 가뭄 기간 동안의 SGI 변화는 앞서 분석된 관측공과 마찬가지로 전체적으로 강수량이 부족한 기간 동안에 낮은 분포를 보이고 있다<그림 5-22>.



(a) 거제1

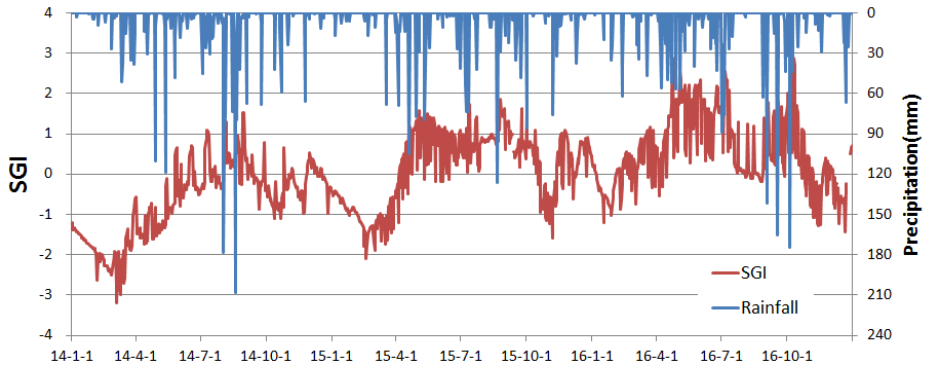


(b) 거창1

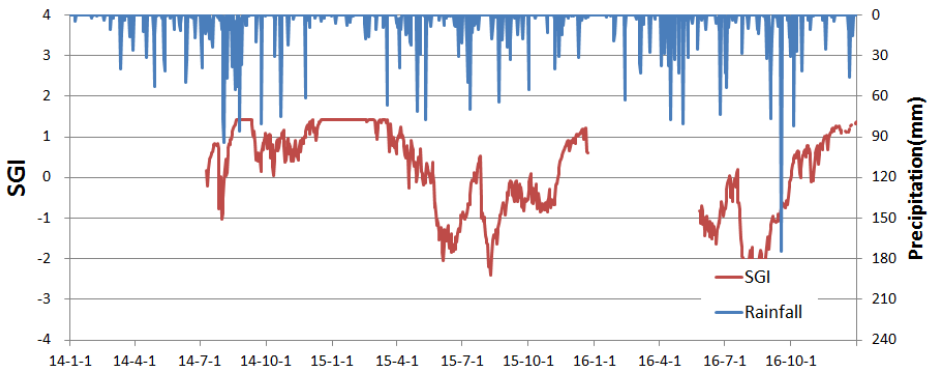


(c) 김해1

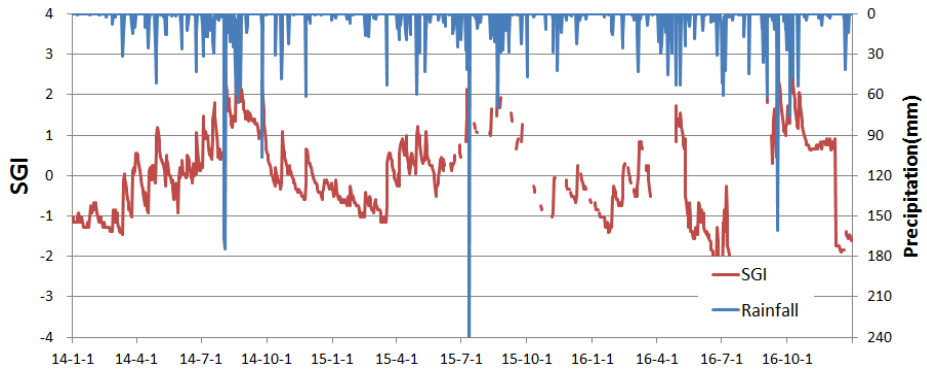
그림 5-22. 경상남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과



(d) 밀양1

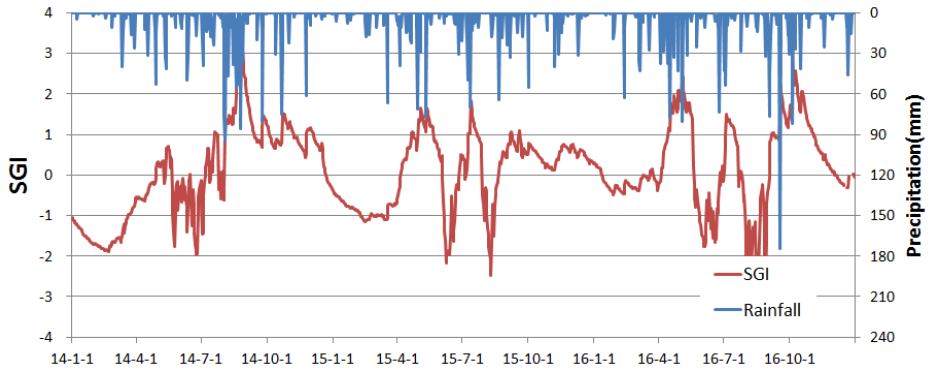


(e) 사천1

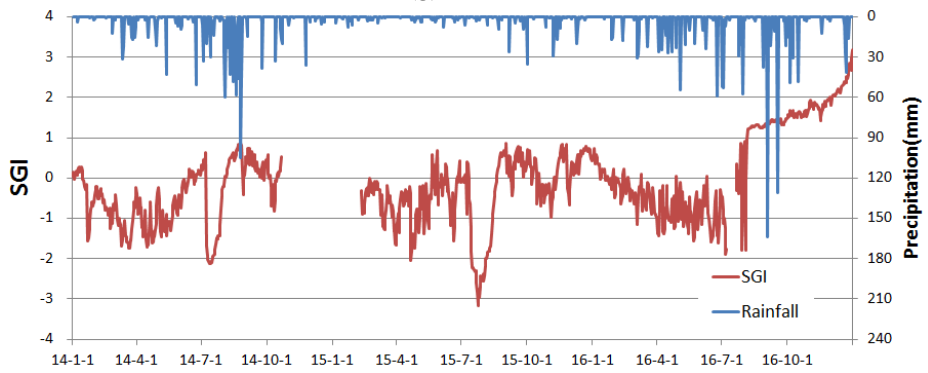


(f) 산청1

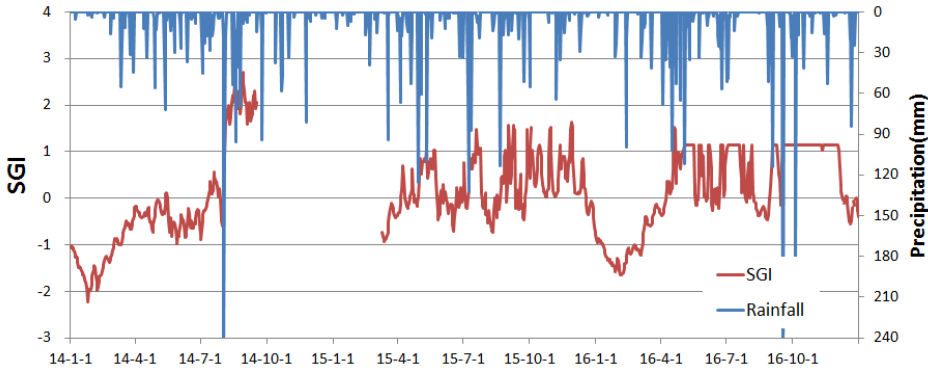
그림 5-22. 경상남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(g) 진주1

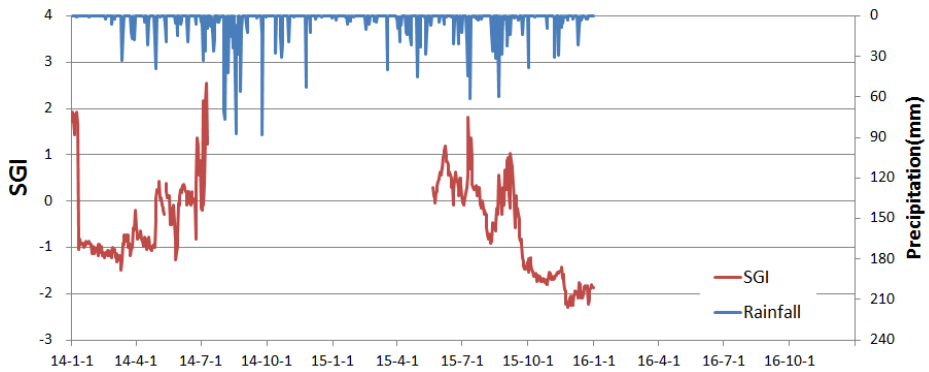


(h) 창녕2



(i) 하동4

그림 5-22. 경상남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)



(j) 합천1

그림 5-22. 경상남도 관측공들의 강수량과 SGI 분석 결과(계속)

### 5.1.3 SGI-SPI 상관분석을 통한 행정구역별 누적기간(AP) 결정

#### 가. 상관분석(correlation analysis)

- 상관분석은 두 변량을 X와 Y라고 할 때, 두 변량 사이의 상관관계의 정도인 상관계수(correlation coefficient)를 계산하는 분석 기법이다.
- 이때 상관계수는 상관 및 종속의 유형을 정량화하는 숫자로, 기본 통계에서 둘 이상의 값 사이의 통계적 관계를 의미한다. 따라서 상관 계수 r은 산점도가 직선에서 떨어지는 정도를 나타낸다.
- 상관계수 r의 절대 값이 1에 가까울수록 데이터가 선형에 가까운 반면, 0에 가까운 데이터 세트는 선형적인 관계가 나타나지 않는다.
- 상관계수는 두 변량 X, Y 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 수치로, 측정값 (x, y)에 대하여 n개인 측정값 (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>), (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>), … (x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>)이 주어졌을 때 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}_i)}{(n-1)s_x s_y}$$

이때,  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 각각 x, y의 평균값이고,  $s_x$ 와  $s_y$ 는 각각 x와 y의 표준편

차,  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 는 x와 y의 공분산이다.

나. 누적기간(accumulation period) 결정

- SGI와 SPI는 두 인자 모두 평균과 표준편차가 각각 0과 1인 정규분포 모형을 이용하고 있기 때문에, 관측공별로 계산된 SGI와 1개월 단위로 계산된 SPI에 대한 상관분석을 실시하였다.
- 상관분석 결과는 SGI와 1개월 단위의 SPI 사이의 상관계수 최대값을 갖는 개월을 관측공별로 누적기간으로 정하였으며, 이 기간이 해당 관측공에서 가뭄의 영향을 최대로 나타나는 것으로 해석이 가능하다.
- 총 68개 관측공(경기 9개소, 강원 9개소, 충북 8개소, 충남 8개소, 전북 8개소, 전남 10개소, 경북 6개소, 경남 10개소)을 대상으로, 1~12개월 기간 동안 매 1개월 단위로 SGI와 SPI의 상관분석을 수행하였다.
- <그림 5-23>~<그림 5-30>은 각 도별 관측공에 대한 상관분석 결과로, AP는 주로 1~3개월이 주를 이루고 있지만 7~10개월까지 큰 값을 갖는 관측공도 나타났다<그림 5-31>.

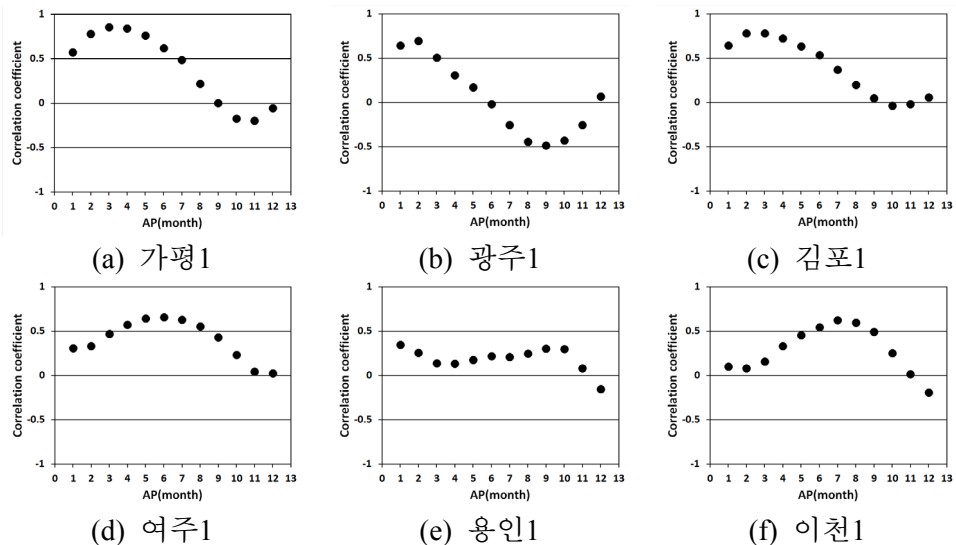
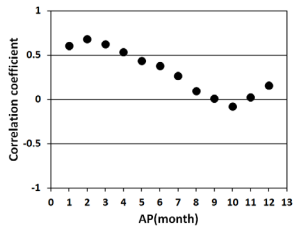
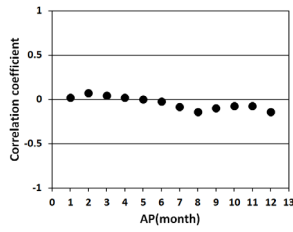


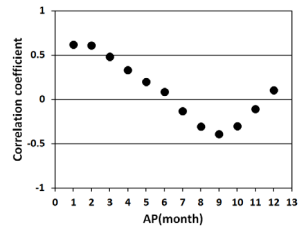
그림 5-23. 경기도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과



(g) 광주1

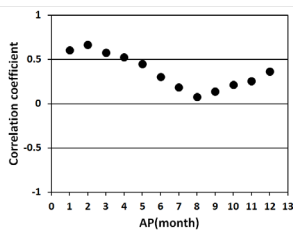


(h) 평택1

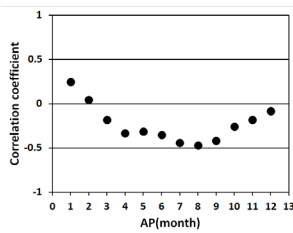


(i) 화성4

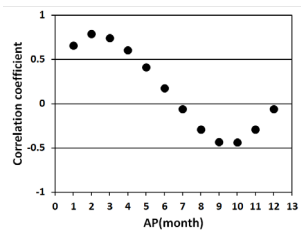
그림 5-23. 경기도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과(계속)



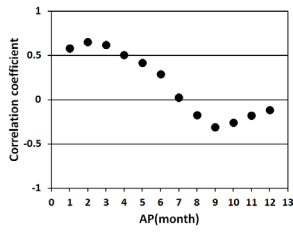
(a) 고성1



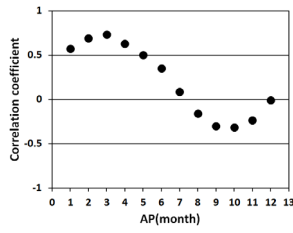
(b) 양구1



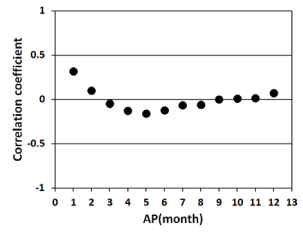
(c) 원주2



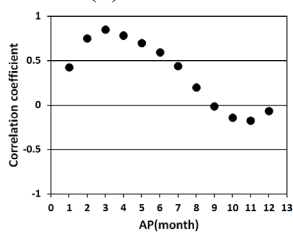
(d) 인제1



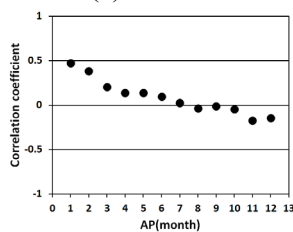
(e) 춘천1



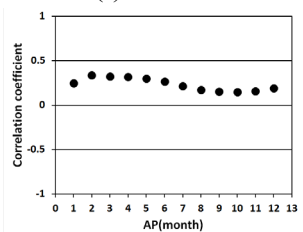
(f) 평창1



(g) 홍천1



(h) 화천1



(i) 횡성1

그림 5-24. 강원도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과

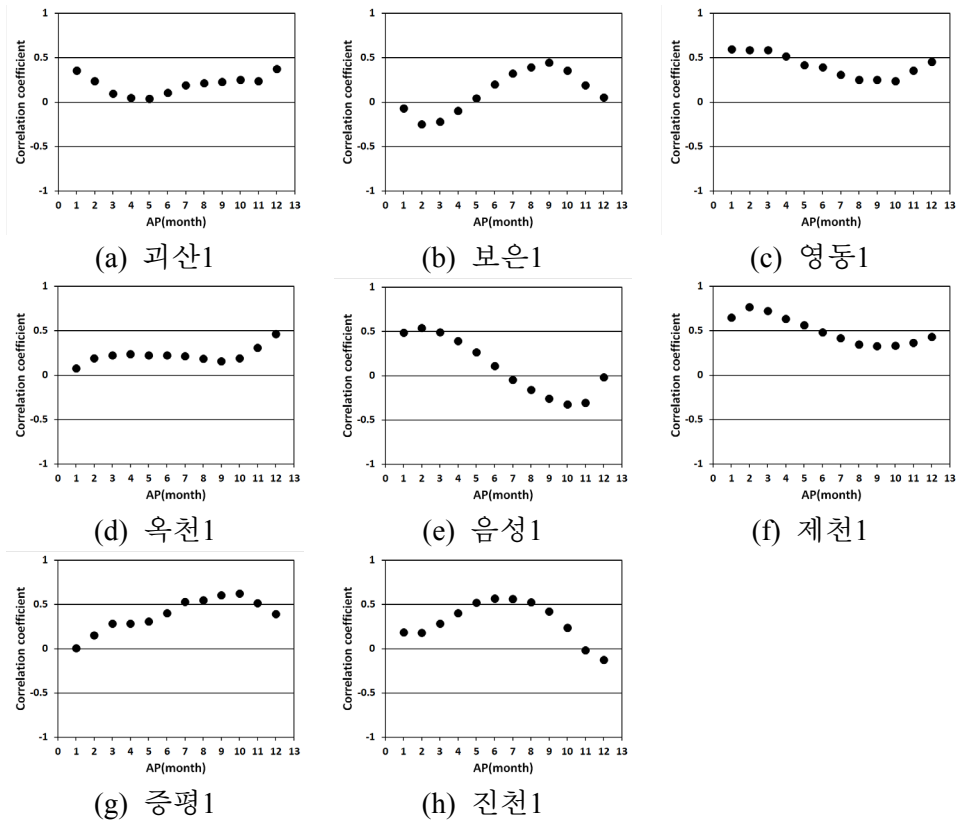


그림 5-25. 충청북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과

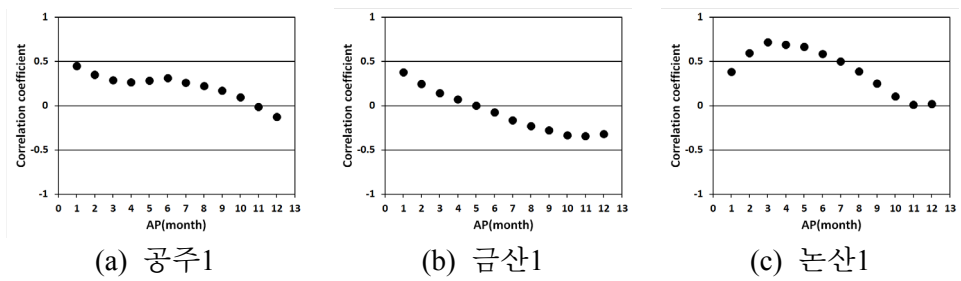
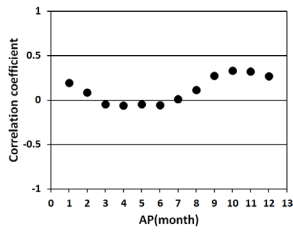
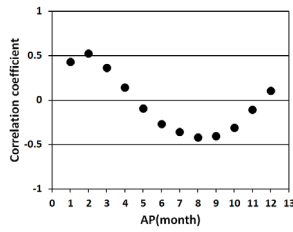


그림 5-26. 충청남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과

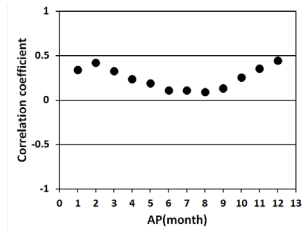




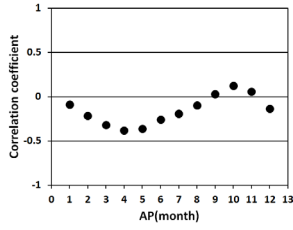
(d) 보령1



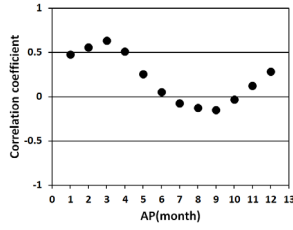
(e) 부여1



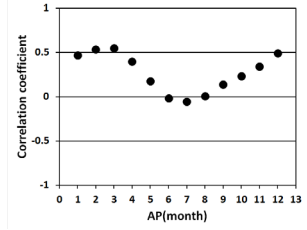
(f) 서천1



(g) 아산1

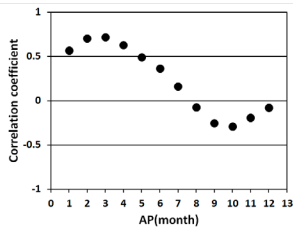


(h) 청양1

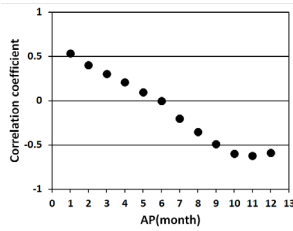


(i) 홍성1

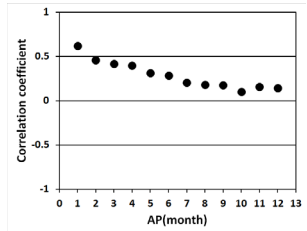
그림 5-26. 충청남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과(계속)



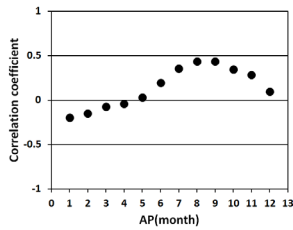
(a) 고창1



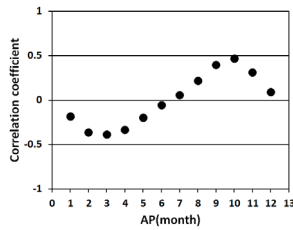
(b) 남원1



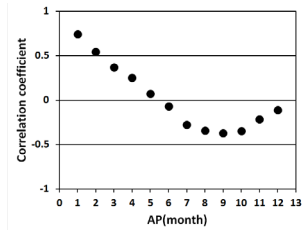
(c) 무주1



(d) 보령1

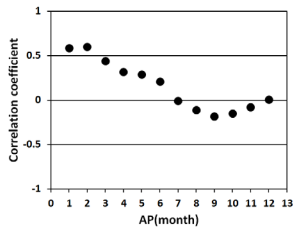


(e) 순창1

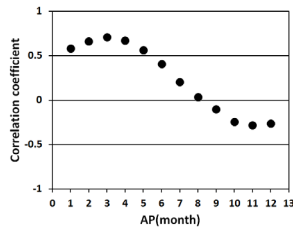


(f) 장수1

그림 5-27. 전라북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과

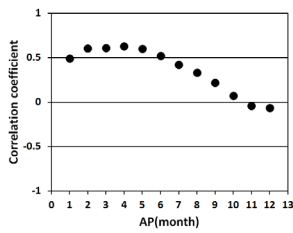


(g) 정읍1

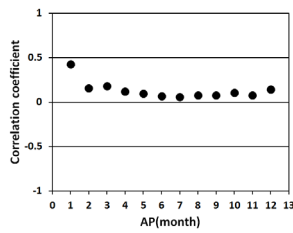


(h) 진안1

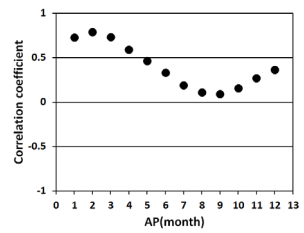
그림 5-27. 전라북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과(계속)



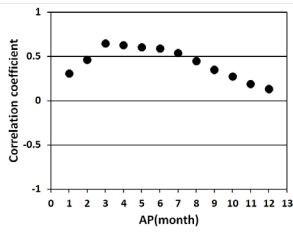
(a) 무안2



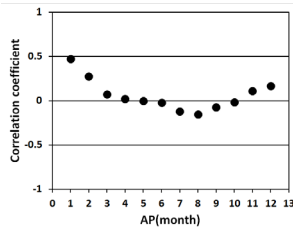
(b) 보성1



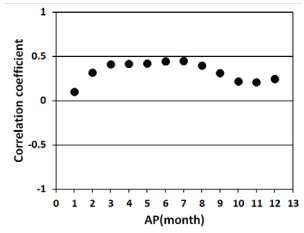
(c) 순천1



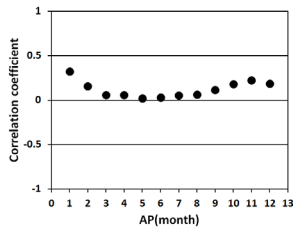
(d) 신안1



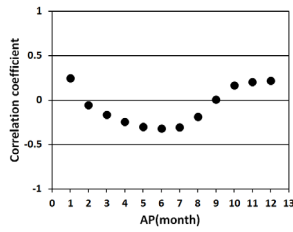
(e) 영광1



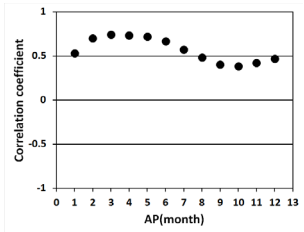
(f) 장성1



(g) 장흥1

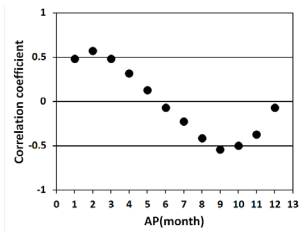


(h) 진도1



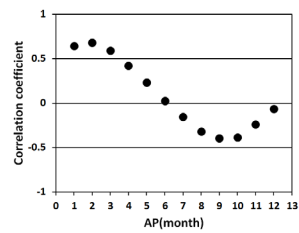
(i) 함평1

그림 5-28. 전라남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과

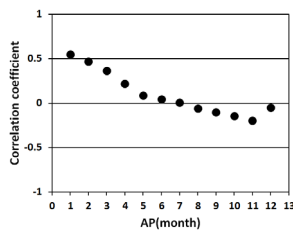


(j) 화순1

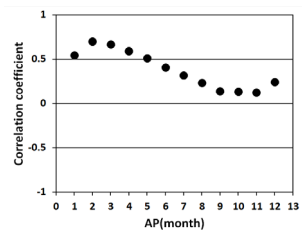
그림 5-28. 전라남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과(계속)



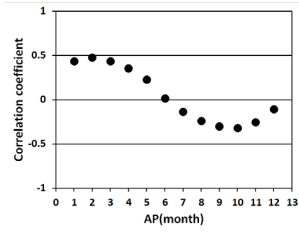
(a) 문경1



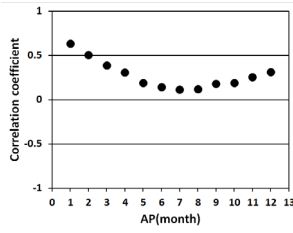
(b) 봉화1



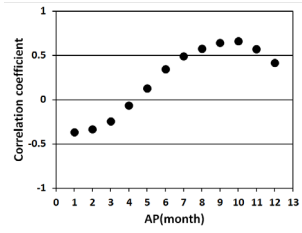
(c) 상주3



(d) 안동2

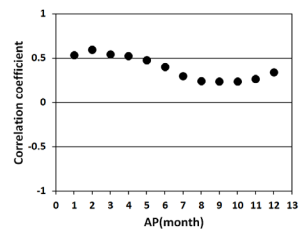


(e) 영천1

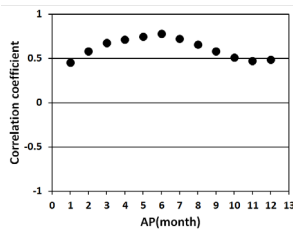


(f) 청송1

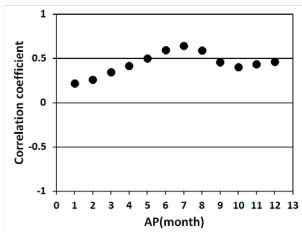
그림 5-29. 경상북도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과



(a) 거제1



(b) 거창1



(c) 김해1

그림 5-30. 경상남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과

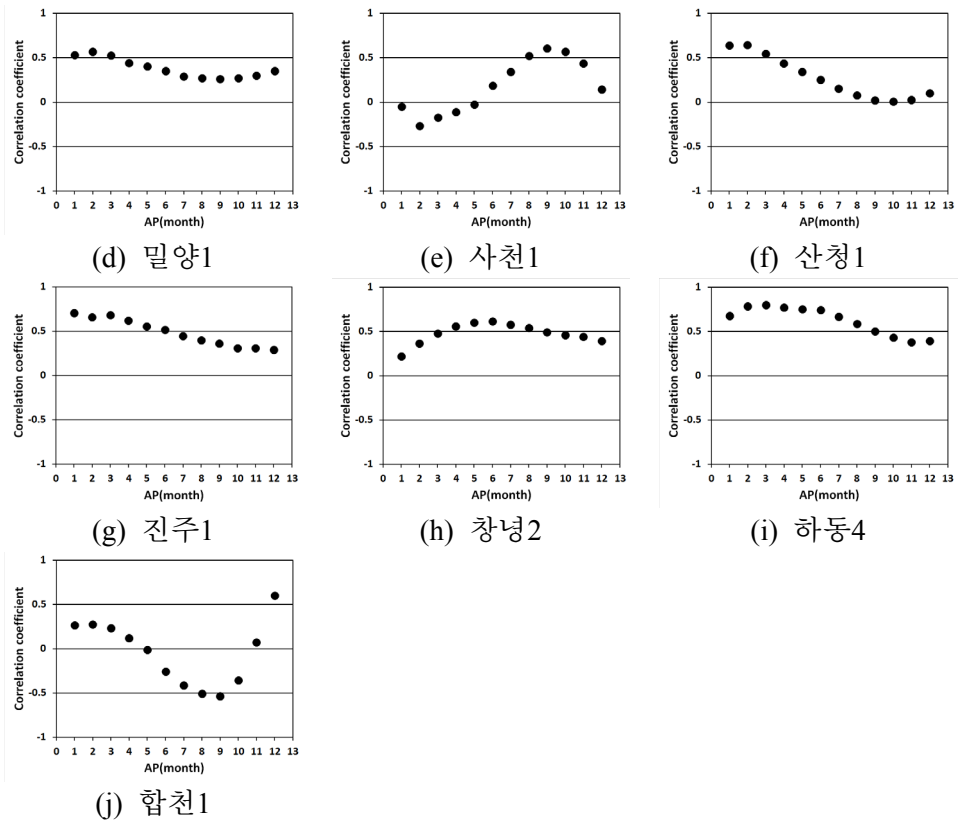


그림 5-30. 경상남도 관측공들의 SGI-SPI 상관분석 결과(계속)

- 이 중 짧은 기간의 AP는 단기간의 가뭄에 반응하지만 이 기간 보다 긴 가뭄이 발생하는 경우에도 가뭄이 지하수계(groundwater system)에 미치는 영향이 거의 없다는 의미인 반면 상대적으로 장기간의 AP는 저수지와 같이 장기간의 가뭄에 영향을 받기 때문에 상대적으로 대수층의 지하수 보유 능력이 약한 것으로 해석될 수 있다.
- 따라서 본 연구에서는 68개 관측공별로 상관계수가 가장 높은 AP에 대한 SPI를 해당 관측공이 속한 행정구역에 대한 농업가뭄 지표로 설정하였다(표 5-3).
- 분석 결과 도별 관측정의 평균 AP 최대치와 최소치는 충청북도와 강원도가 각각 4.1과 1.8로 나타났으며, 상관계수의 최대치와 최소치는 경상남도와 충청남도/전라남도가 각각 0.623과 0.530으로 분석되었다.

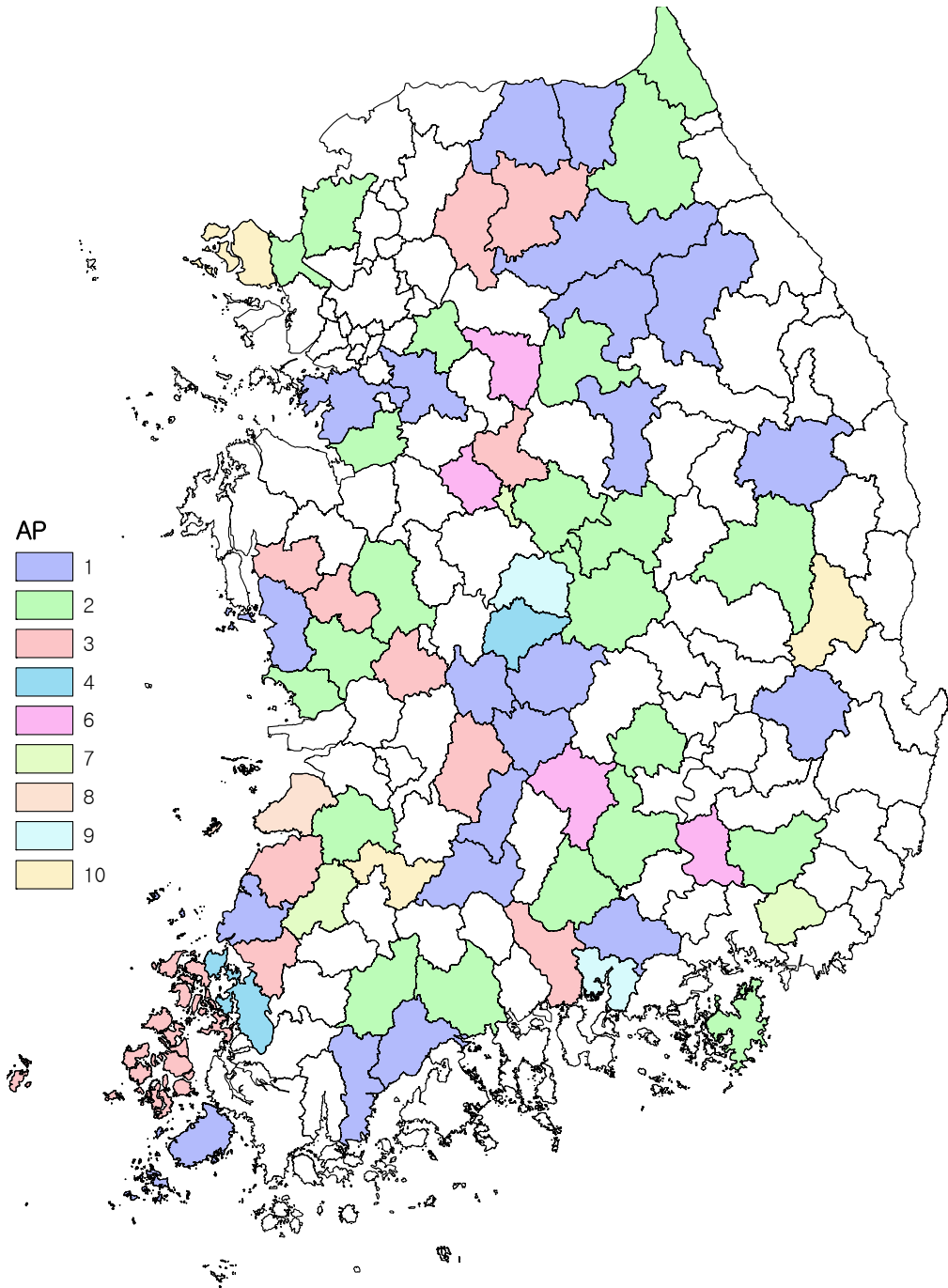


그림 5-31. 관측공별 SGI-SPI 상관분석에 따른 AP 분포도

표 5-3. 관측공별 SGI에 대한 최대 SPI 상관분석 결과 종합

관측공	최대 AP	상관계수	관측공	최대 AP	상관계수
가평1	3	0.856	고창1	3	0.720
광주1	2	0.696	남원1	1	0.536
김포1	2	0.780	무주1	1	0.621
여주1	6	0.657	부안1	8	0.434
용인1	1	0.347	순창1	10	0.467
이천1	7	0.626	장수1	1	0.744
파주1	2	0.679	정읍1	2	0.602
평택1	2	0.073	진안1	3	0.708
화성4	1	0.621	전북 평균	3.6	0.604
경기도 평균	2.9	0.593	무안2	4	0.628
고성1	2	0.856	보성1	1	0.428
양구1	1	0.249	순천1	2	0.792
원주2	2	0.792	신안1	3	0.646
인제1	2	0.653	영광1	1	0.474
춘천1	3	0.733	장성1	7	0.451
평창1	1	0.320	장흥1	1	0.321
홍천1	3	0.851	진도1	1	0.249
화천1	1	0.474	함평1	3	0.741
횡성1	1	0.123	화순1	2	0.572
강원도 평균	1.8	0.561	전남 평균	2.5	0.530
괴산1	2	0.317	문경1	2	0.680
보은1	9	0.448	봉화1	1	0.548
영동1	1	0.596	상주3	2	0.699
옥천1	4	0.238	안동2	2	0.477
음성1	3	0.541	영천1	1	0.636
제천1	1	0.646	청송1	10	0.661
증평1	7	0.305	경북 평균	3.0	0.617
진천1	6	0.582	거제1	2	0.595
충북 평균	4.1	0.459	거창1	6	0.779
공주1	2	0.792	김해1	7	0.644
금산1	1	0.378	밀양1	2	0.568
논산1	3	0.707	사천1	9	0.607
보령1	1	0.195	산청1	2	0.641
부여1	2	0.525	진주1	1	0.706
서천1	2	0.457	창녕2	6	0.615
청양1	3	0.636	하동4	3	0.800
홍성1	3	0.547	합천1	2	0.275
충남 평균	2.1	0.530	경남 평균	4.0	0.623

## 5.2 농업가뭄과 연계한 지하수위 저하 한계치 기준

- 과거 가뭄이 빈번하게 발생된 지역 또는 미래 기후변화 시나리오에 따라 가뭄이 예상되는 지역들은, 과도한 지하수 이용으로 지하수위 저하 및 수량부족이 발생할 우려가 있다. 따라서 이들 지역에 대해서는 가뭄 발생 시 지하수 이용의 효율화를 위한 지하수 가뭄경보체계 수립이 필요하다. 이러한 지하수 가뭄경보체계는 지하수 관측시설을 이용한 지하수 수위 및 수질의 상시 관측 및 감시로 수립이 가능하다.
- 가뭄경보체계와 관련하여 미국지질조사소(U.S. Geological Survey, USGS)에서는 각 주마다 지하수위 변화를 상시 관측하여 가뭄정보를 제공하고 있다. 특히 펜실베이니아주에서는 지역별 관측공의 과거로부터 누적된 지하수위 관측자료와 최근 30일 간의 평균 지하수위를 비교하여, 정상(normal), 주의(watch), 경계(warning), 심각(emergency)의 4단계 가뭄정보를 실시간으로 제공하고 있다<그림 5-32>.

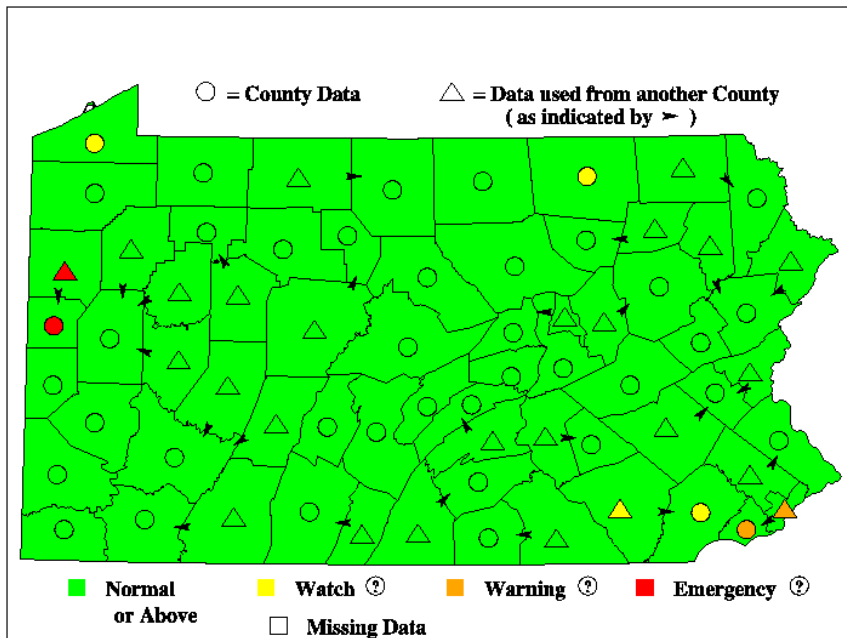


그림 5-32. 미국 펜실베이니아주 관측공 지하수위를 이용한 가뭄 정보 시스템(www.usgs.org)

- 펜실베니아주의 경우 각 카운티(county)별 대표관정을 이용한 지하수 가  
 목 정보를 제공하고 있는데, 각 카운티별 대표관정은 동그라미 혹은 삼  
 각형으로 표기된다. 삼각형의 경우 해당 카운티에서 지하수위 변동을  
 대표할 만한 관정이 없는 경우, 인근 카운티의 관측공으로부터 지하수  
 위 변동정보를 활용하는 경우이다. 이때 인근 카운티의 위치는 검은색  
 화살표로 표기한다.
- 자료 분석 방법은 관측공으로부터 관측일의 지하수위를 포함한 과거 30  
 일치의 선행 지하수위를 평균하여, 가목에 활용할 수 있는 지표(30일  
 이동평균 지하수위)로서 활용한다. 이렇게 지정된 지표(30일 이동평균  
 지하수위)는 해당 관측공의 과거 해당 일 지하수위 범위와 비교하여 몇  
 퍼센트(%) 구간에 위치하는지 확인할 수 있도록 사용된다. 과거 지하수  
 수위 범위와 비교하여, 25% 이상 구간에 위치하면 『정상』, 10~25% 범  
 위에 위치하면 『주의』, 5~10% 구간에 위치하면 『경계』, 0~5% 구간에  
 위치하면 『심각』으로 구분한다.
- 각 관측공의 지하수위 변동 정보는 지도상에서 원하는 관정을 선택하  
 면, 지하수위 변동 시계열 자료가 나타나게 구성되어 있다<그림 5-33>.  
 시계열 자료는 x축에 1월 1일부터 12월 31일까지 일자(calendar day)별로  
 바탕화면에 누적기간 중의 지하수위 백분위가 표시되는데, 녹색은 『정  
 상』, 노란색은 『주의』, 주황색은 『경계』, 빨간색은 『심각』 구간을 의  
 미하며 검은색 선(30일 이동평균 지하수위)은 현재 시점에서의 지하수  
 위가 해당되는 구간에 위치하는지 알 수 있다.



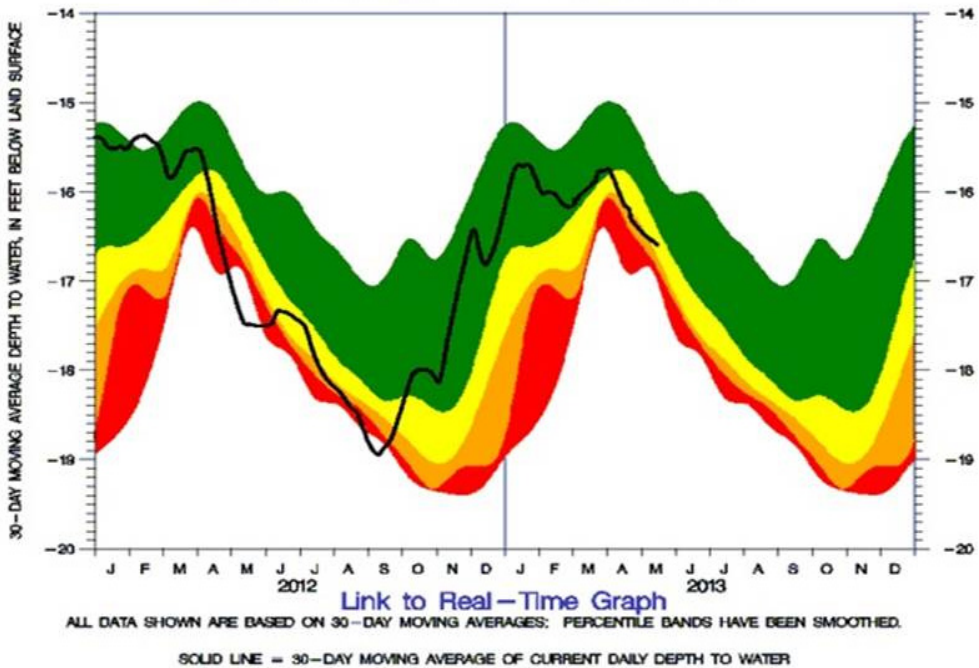
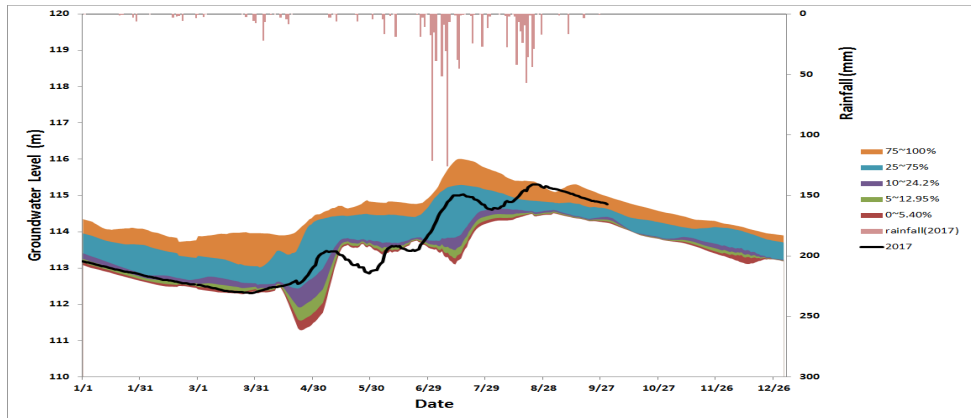


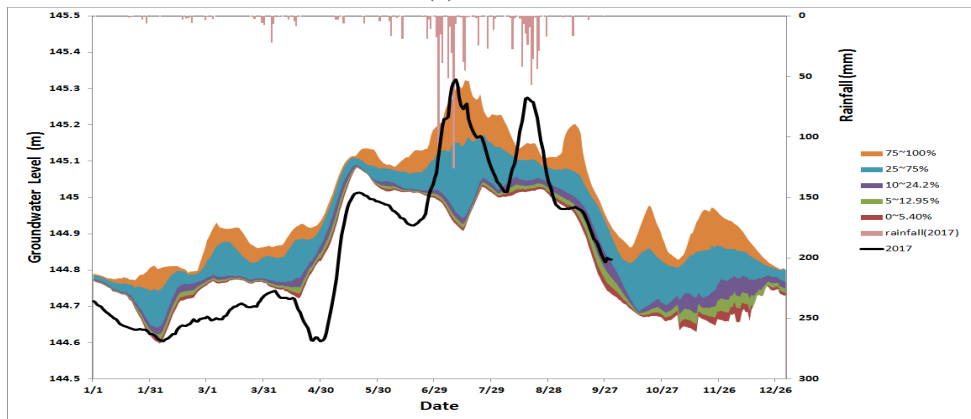
그림 5-33. 미국 펜실베이니아주 Lawrence 카운티 대표관정의 지하수위 분석을 통한 가뭄정보 제공 사례(www.usgs.org)

### 5.2.1 관측공별 시계열 자료 백분위 분석

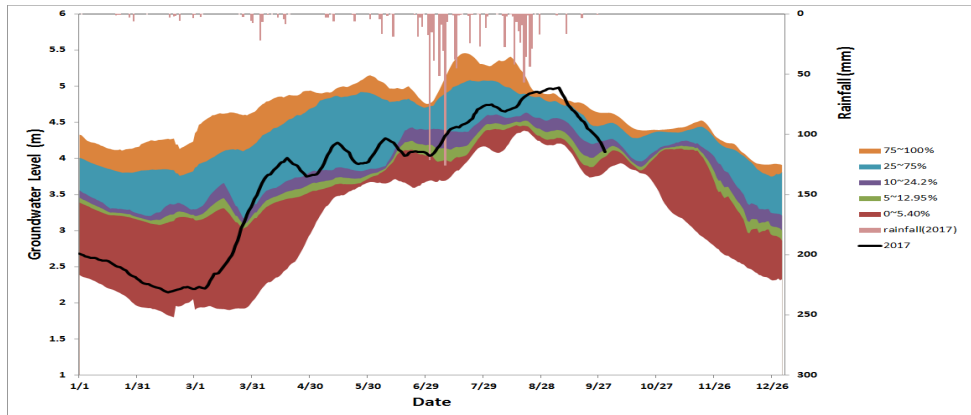
- 본 연구에서 관측공별 시계열 자료에 대한 백분위(percentile) 분석은 앞서 2장에서 제시된 SPI 분류에서 가뭄에 해당되는  $-1.0 \sim -1.5$ (moderate drought),  $-1.5 \sim -2.0$ (severe drought),  $-2.0$  이하(extreme drought)에 대하여, (표 2-2)에서 제시한 바와 같이 평균과 표준편차가 각각 0과 1인 정규분포에서 백분위 값인 0.2420, 0.1295, 0.0540에 해당하는 지하수위를 선정하는 방법으로 수행되었다.
- 이를 위하여 전국적으로 총 68개소 관측공의 일별 시계열 자료를 1월 1일부터 12월 31일까지 일자별로 각 백분위에 맞게 계산한 후, 2017년 1월 1일부터 9월 30일까지의 일별 지하수위 자료를 도시하였다<그림 5-34>~<그림 5-41>.



(a) 가평1

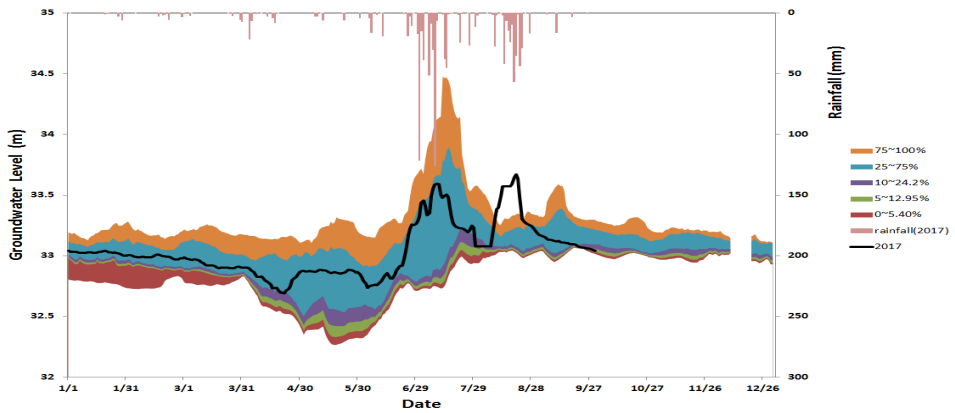


(b) 광주1

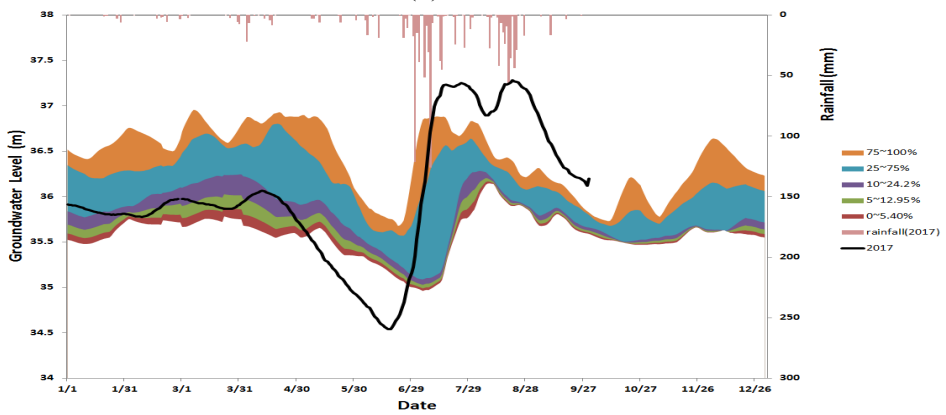


(c) 김포1

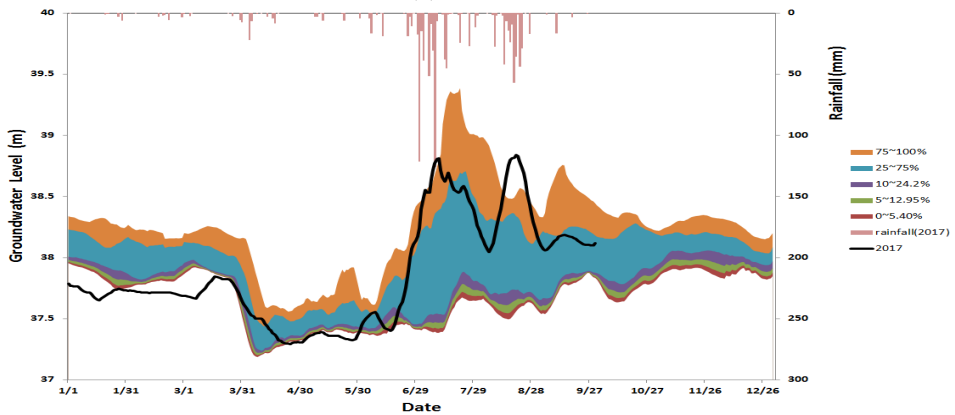
그림 5-34. 경기도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 여주1

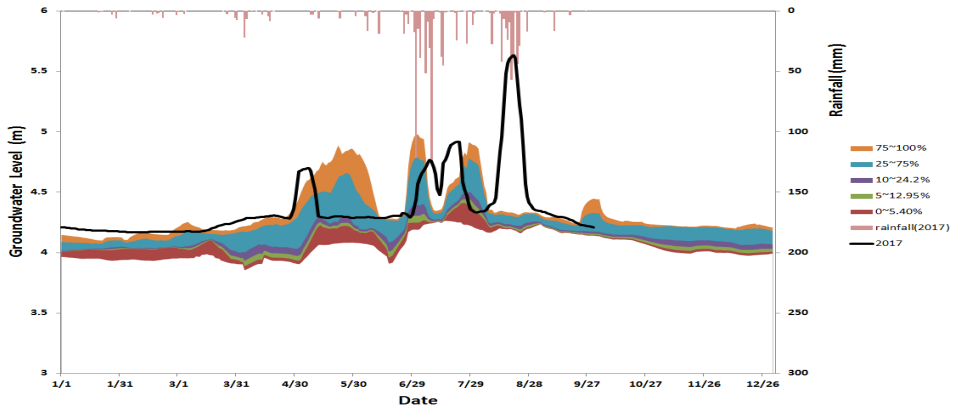


(e) 용인1

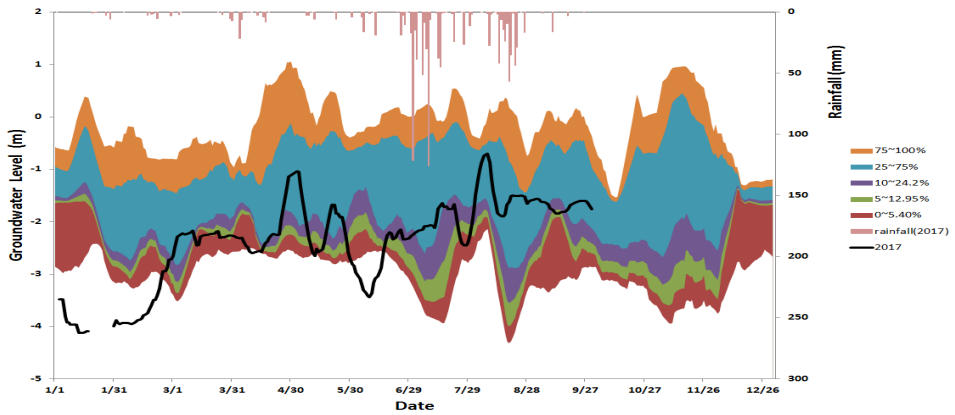


(f) 이천1

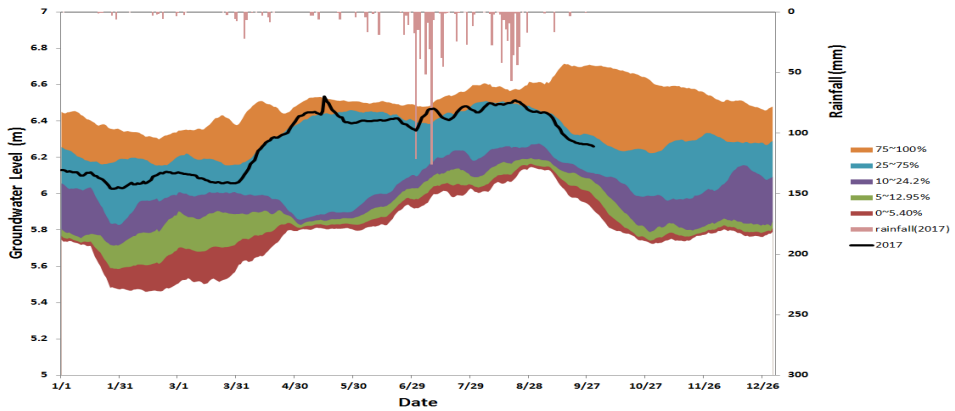
그림 5-34. 경기도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(g) 파주1

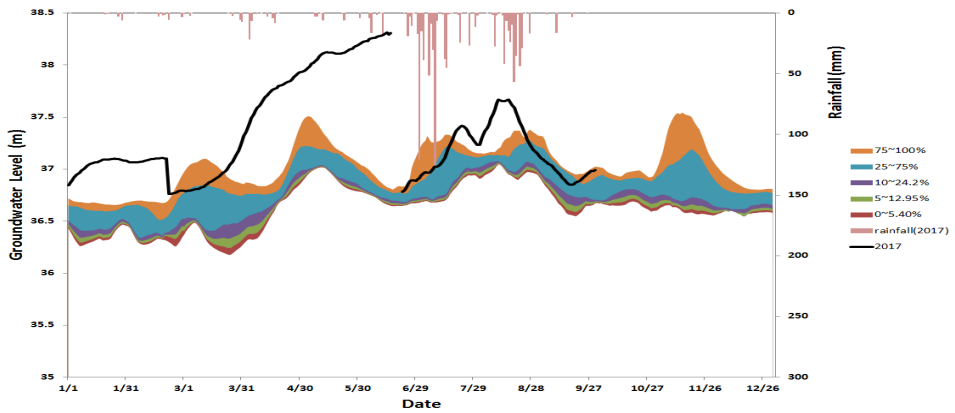


(h) 평택1

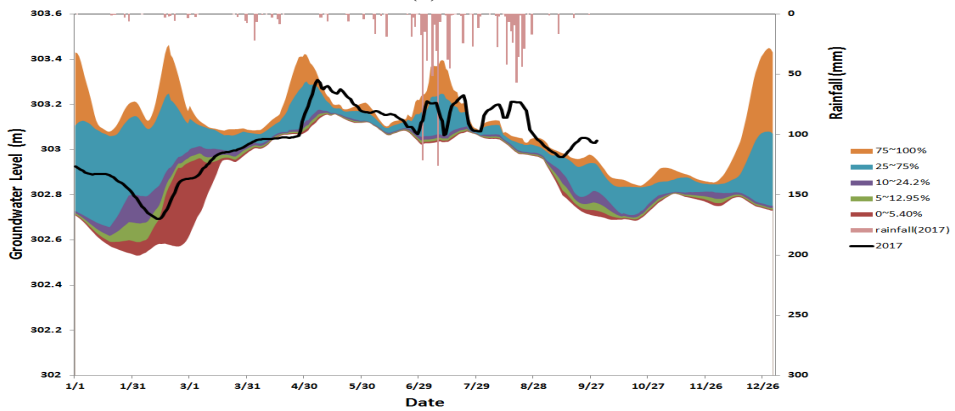


(i) 화성4

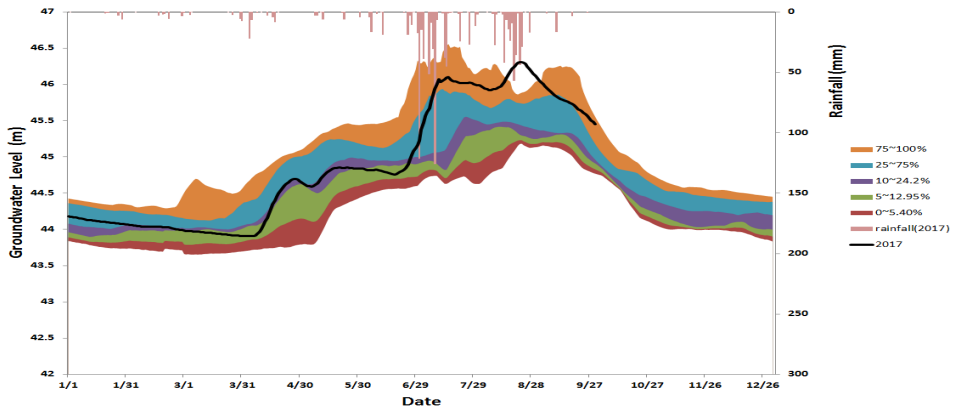
그림 5-34. 경기도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(a) 고성1

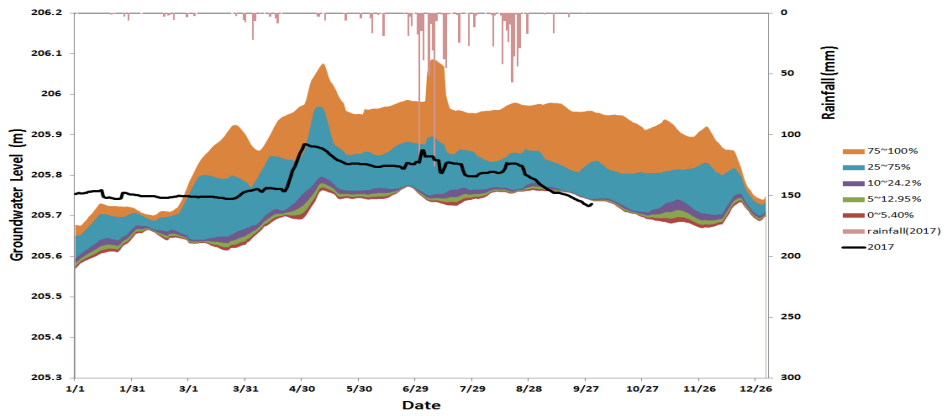


(b) 양구1

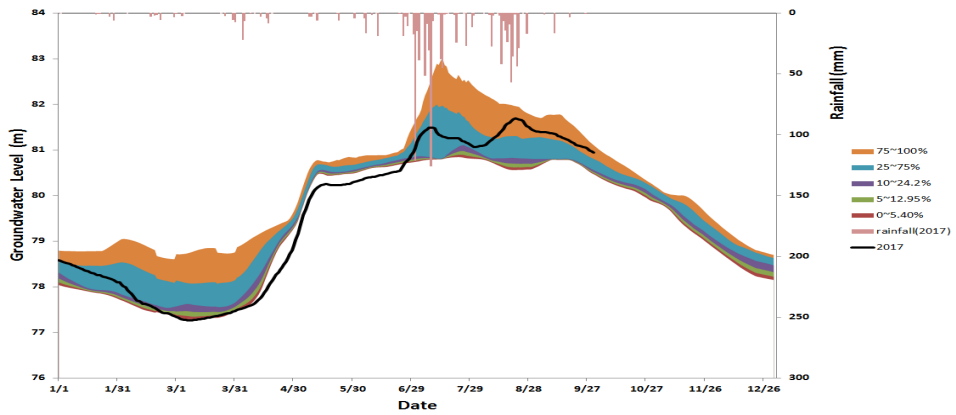


(c) 원주2

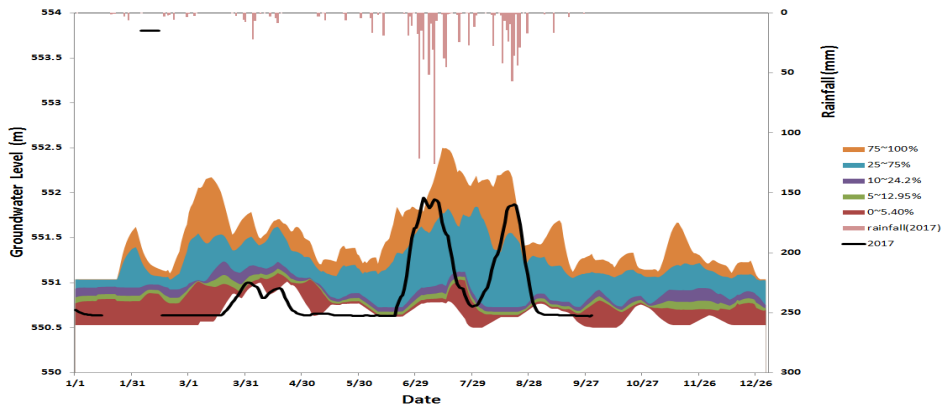
그림 5-35. 강원도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 인제1

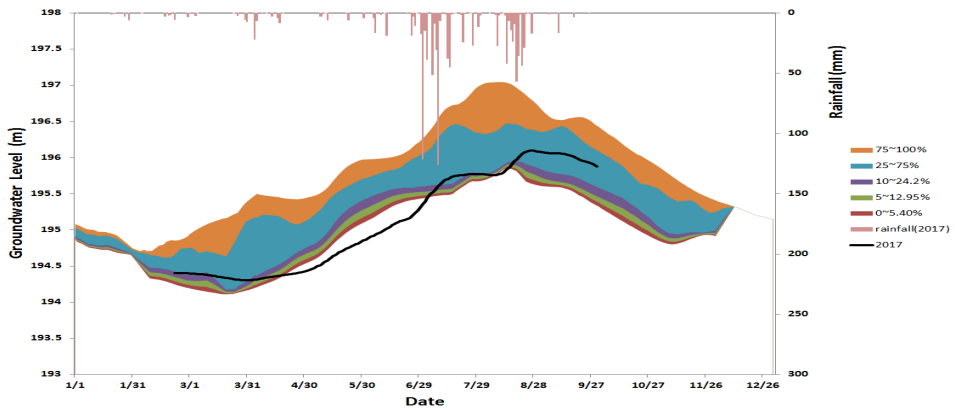


(e) 춘천1

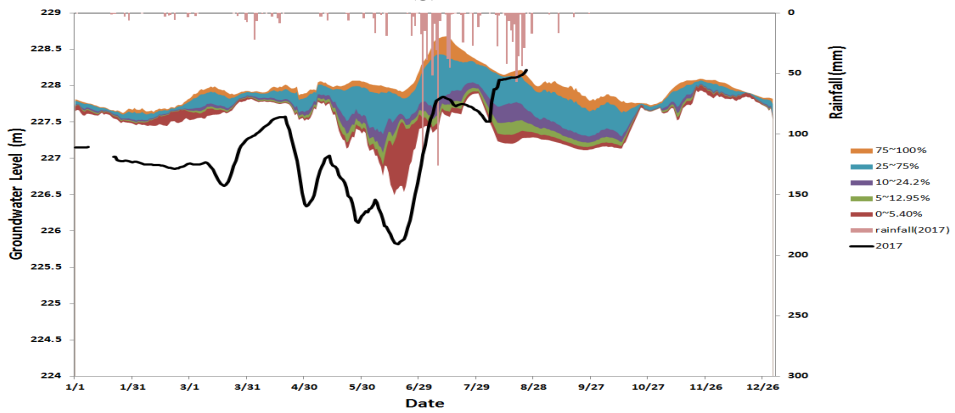


(f) 평창1

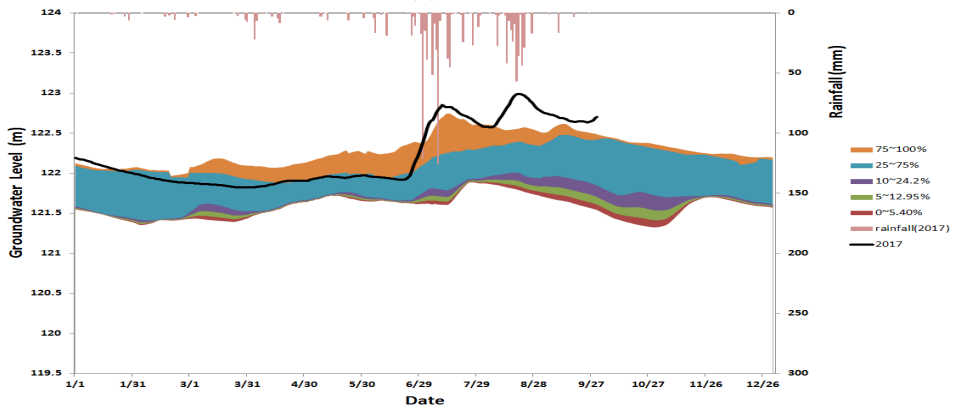
그림 5-35. 강원도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(g) 홍천1

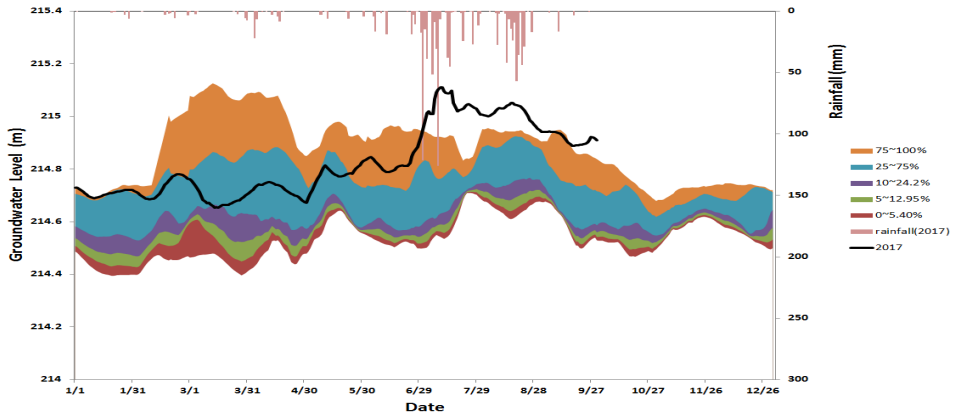


(h) 화천1

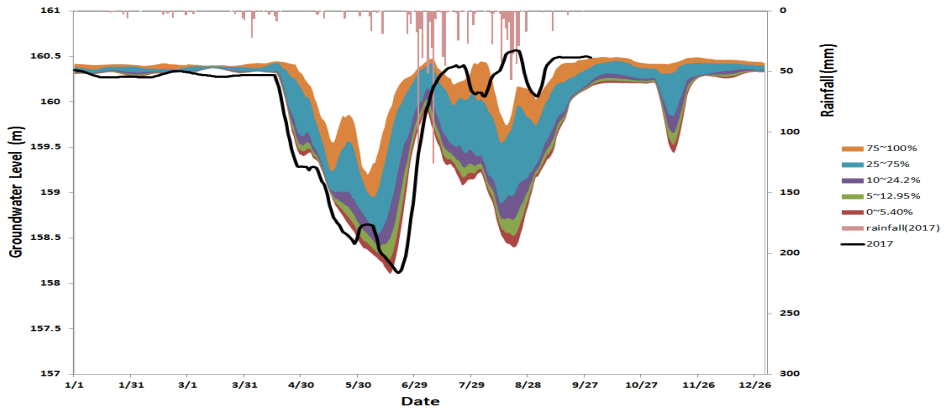


(i) 황성1

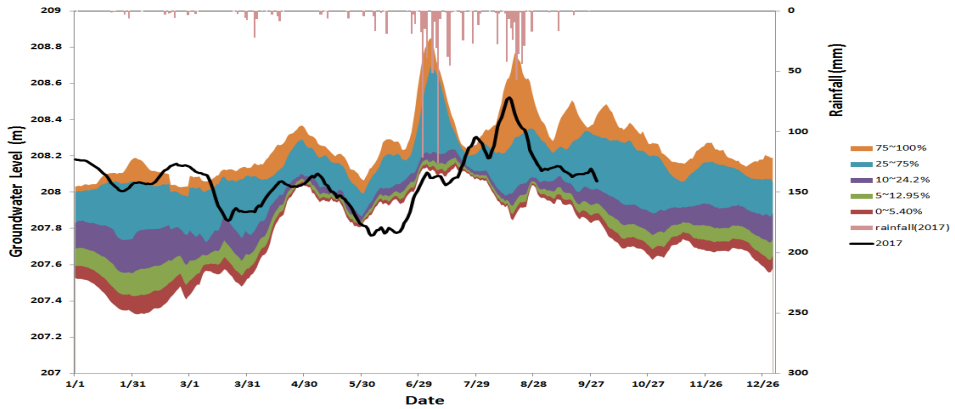
그림 5-35. 강원도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(a) 괴산1



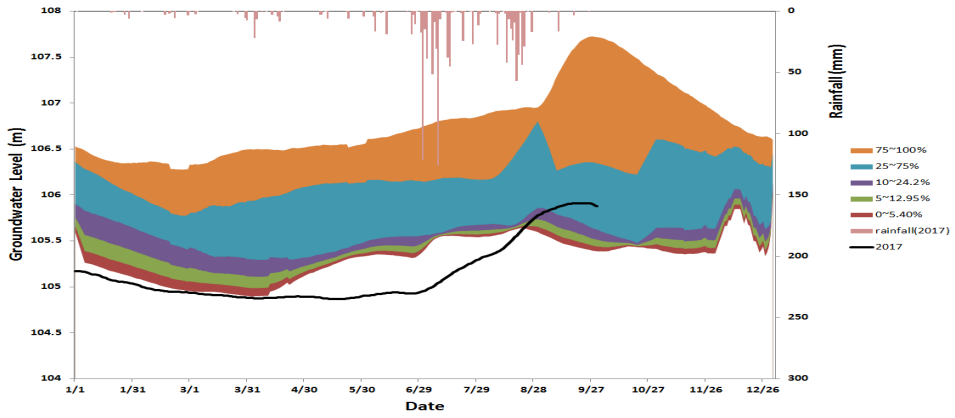
(b) 보은1



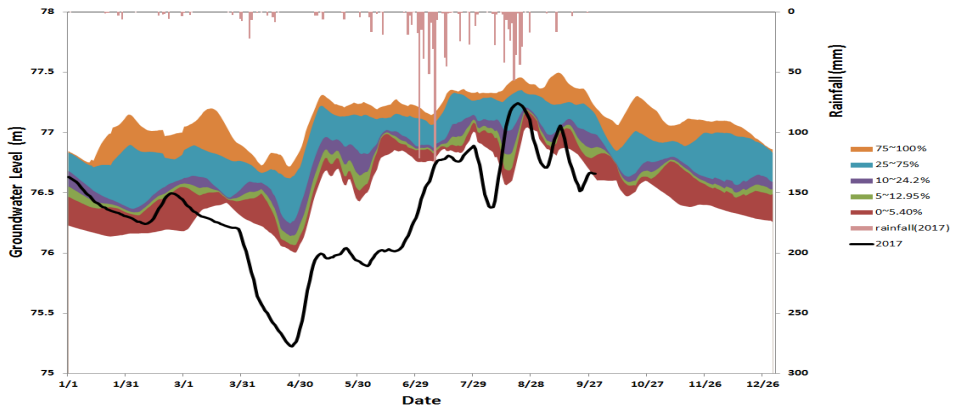
(c) 영동1

그림 5-36. 충청북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과

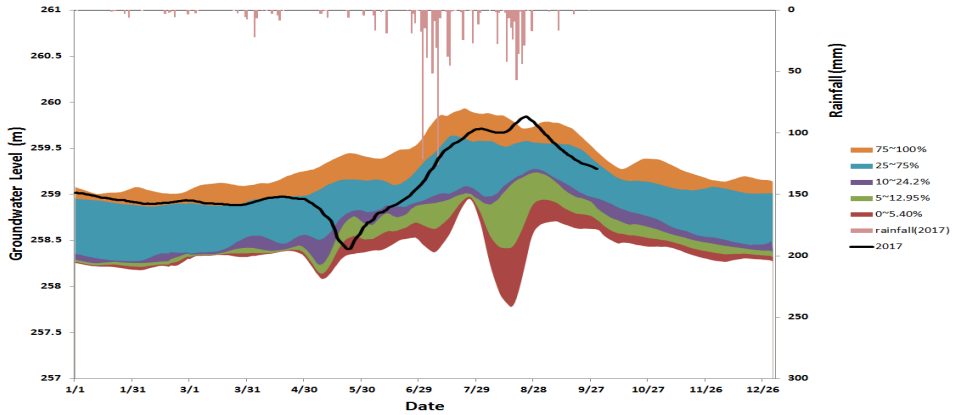




(d) 옥천1

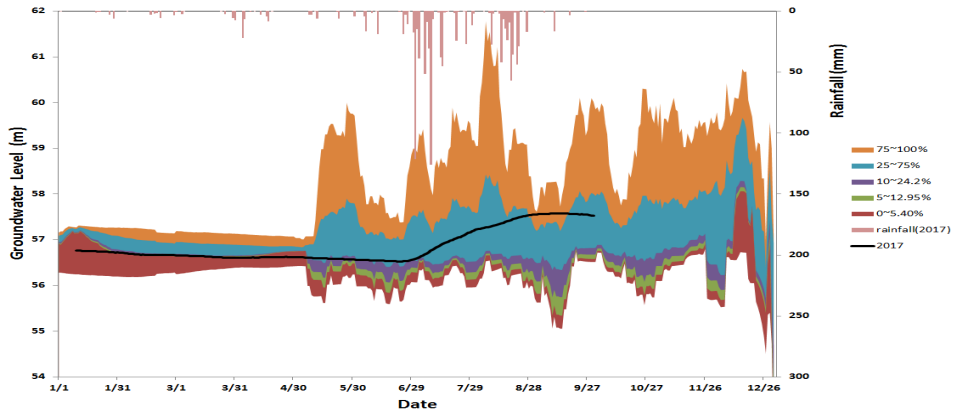


(e) 음성1

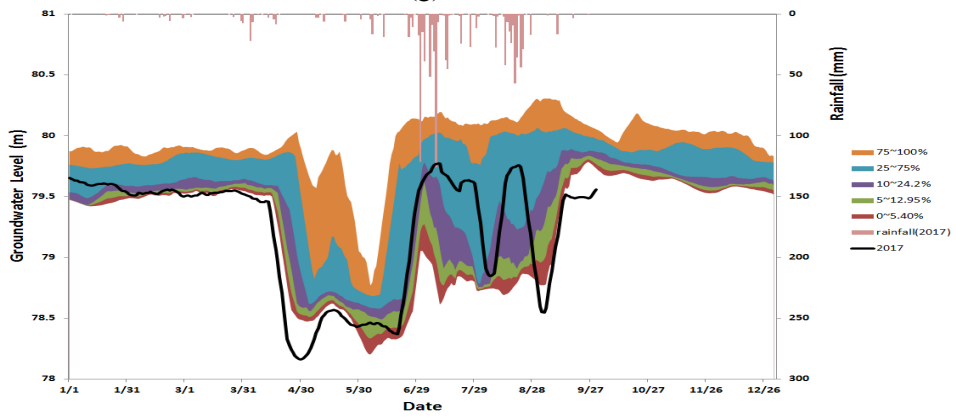


(f) 제천1

그림 5-36. 충청북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)

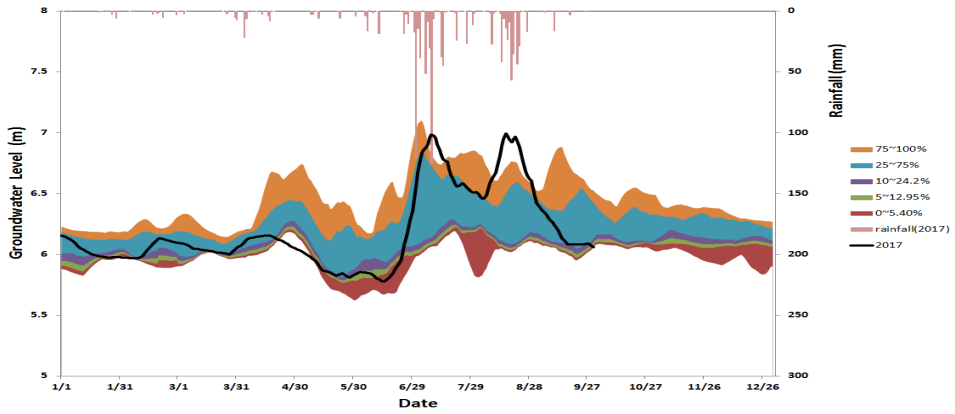


(g) 증평1

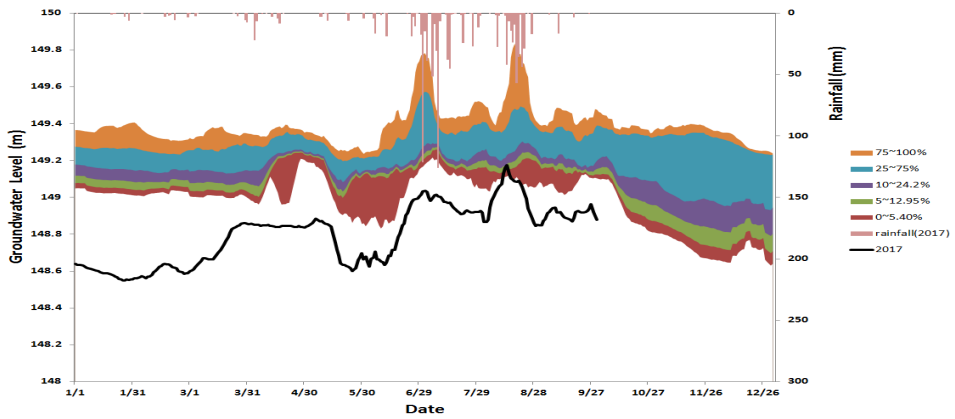


(h) 진천1

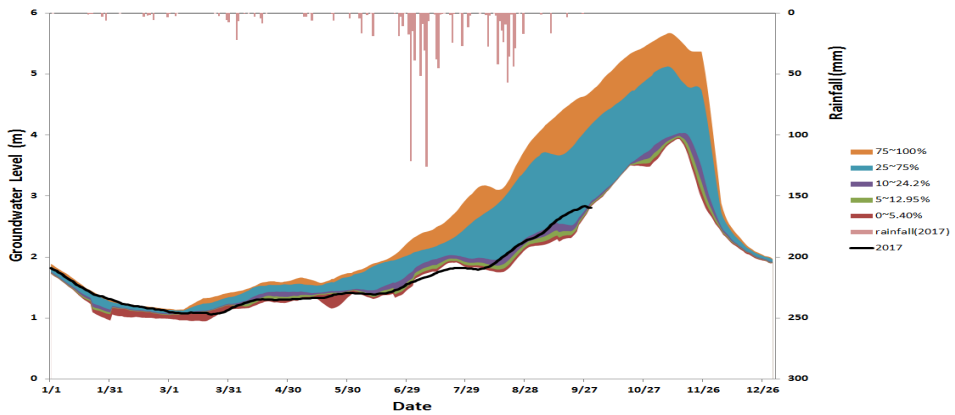
그림 5-36. 충청북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(a) 공주1

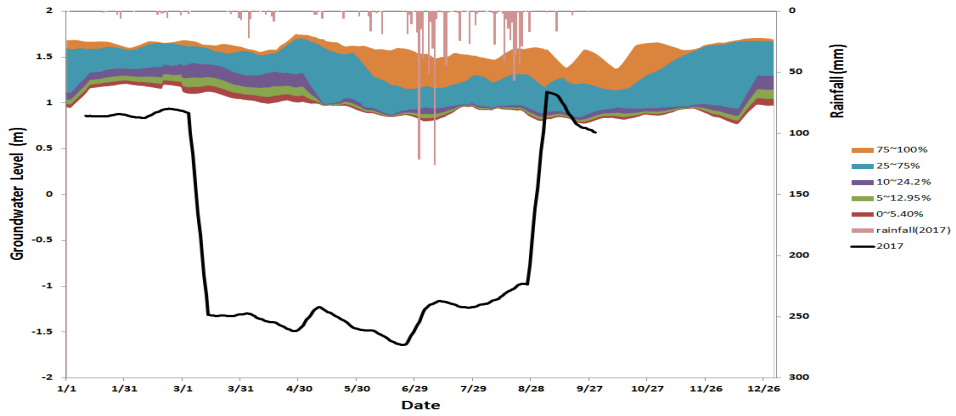


(b) 금산1

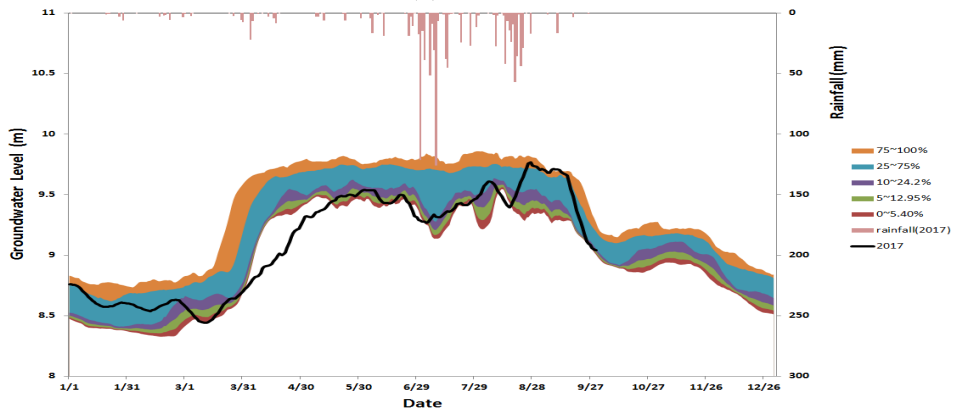


(c) 논산1

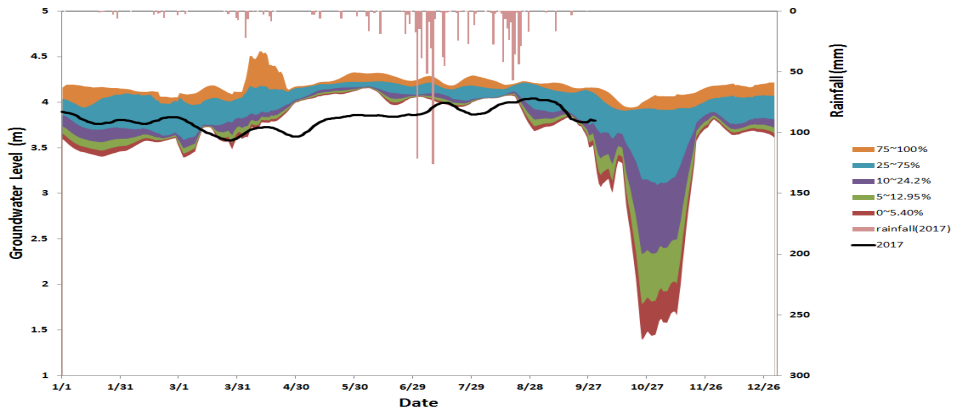
그림 5-37. 충청남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 보령1

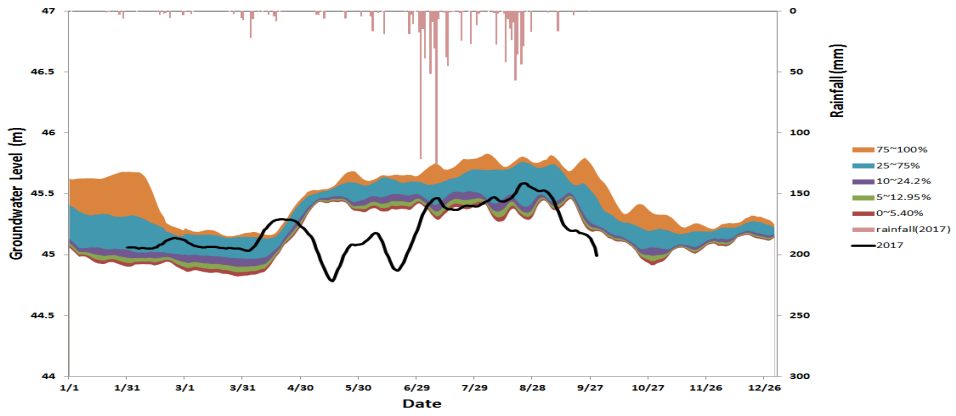


(e) 부여1

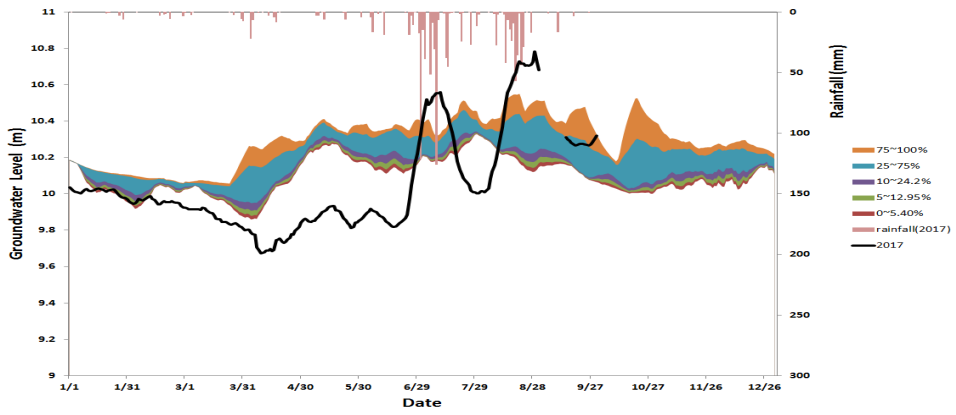


(f) 서천1

그림 5-37. 충청남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)

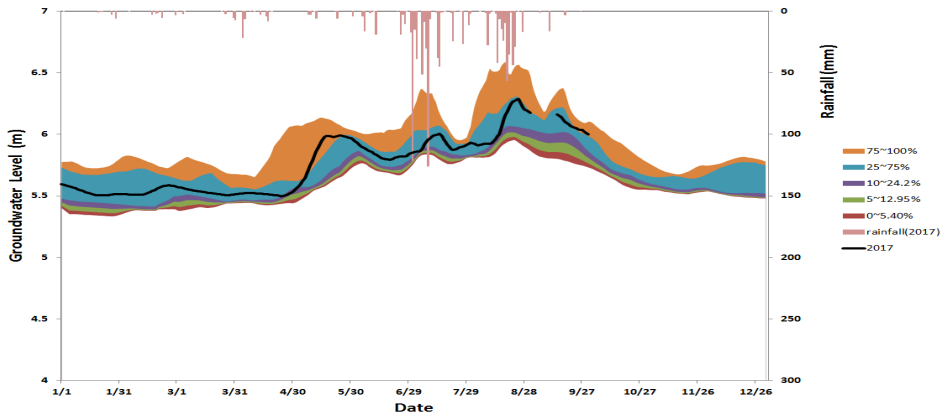


(g) 청양1

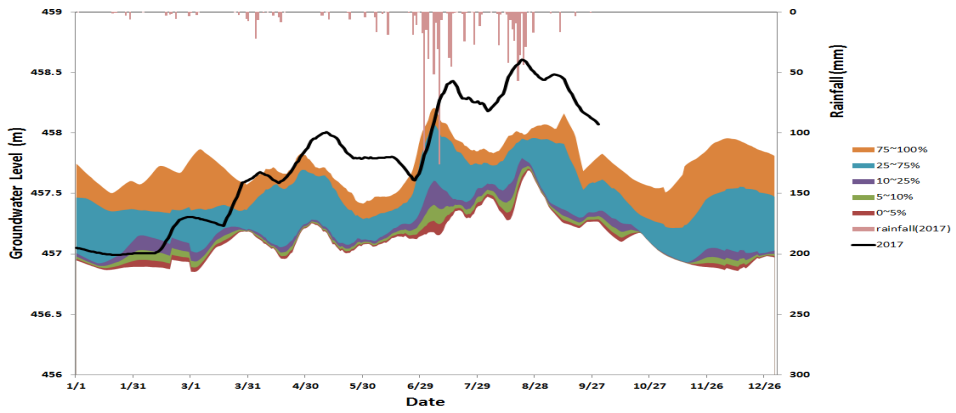


(h) 홍성1

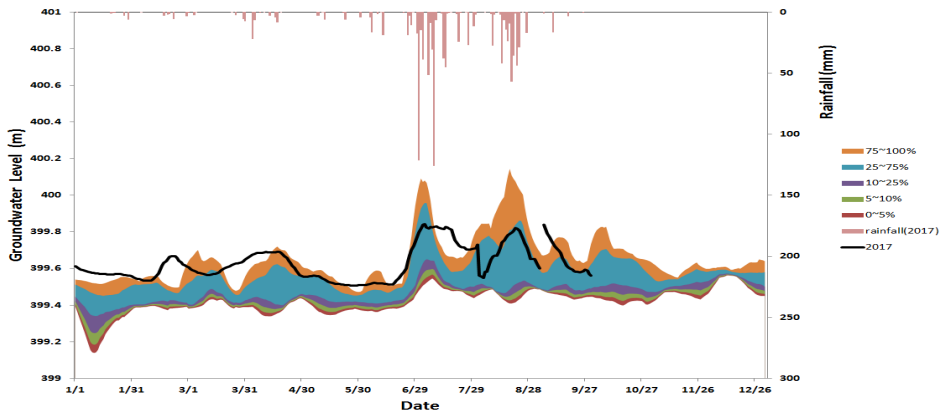
그림 5-37. 충청남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(a) 고창1

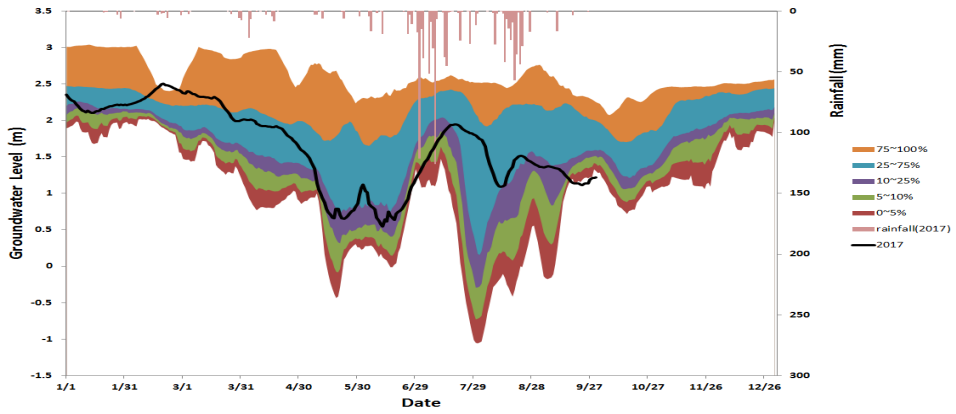


(b) 남원1

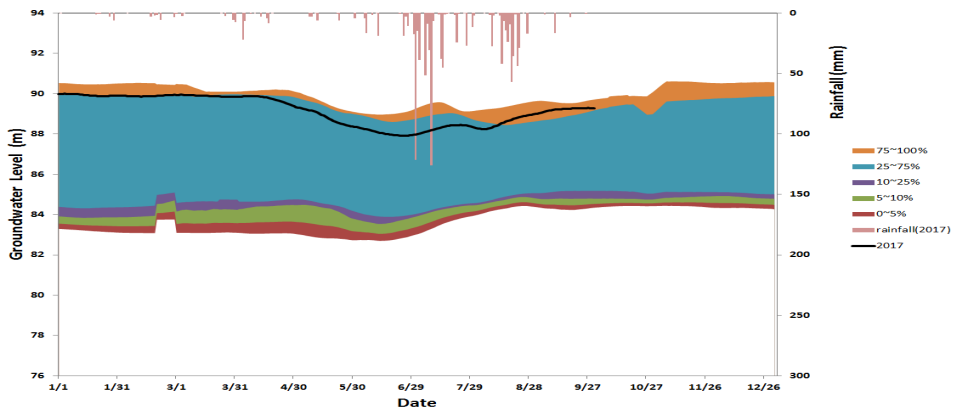


(c) 무주1

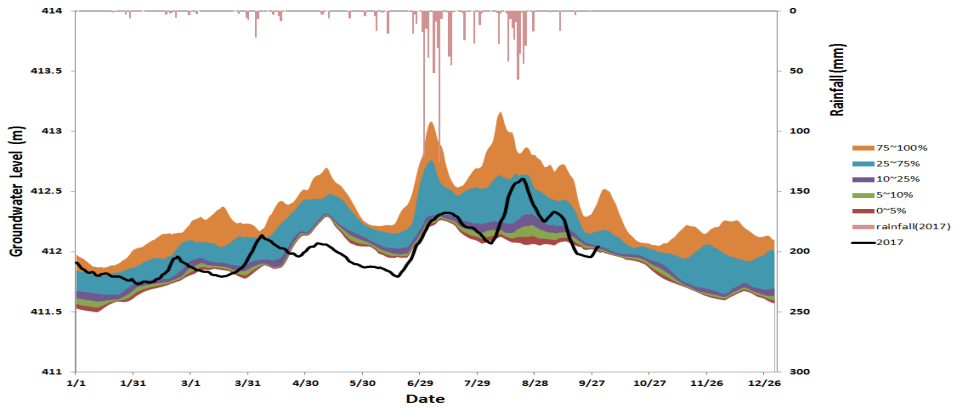
그림 5-38. 전라북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 부안1

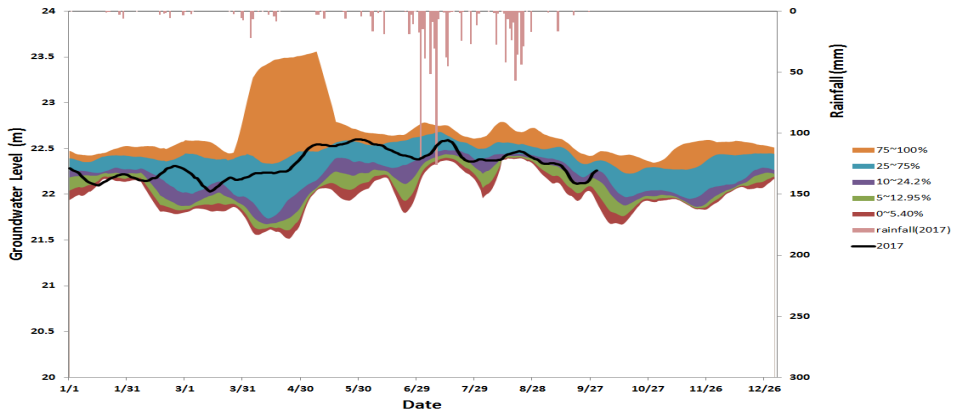


(e) 순창1

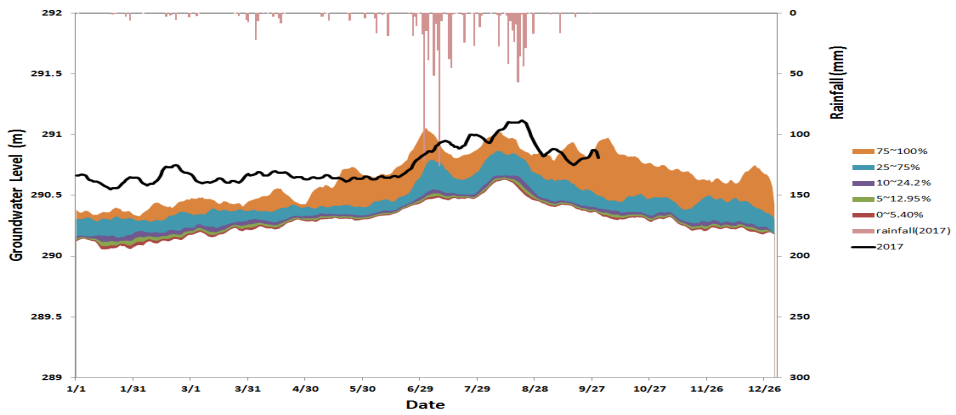


(f) 장수1

그림 5-38. 전라북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



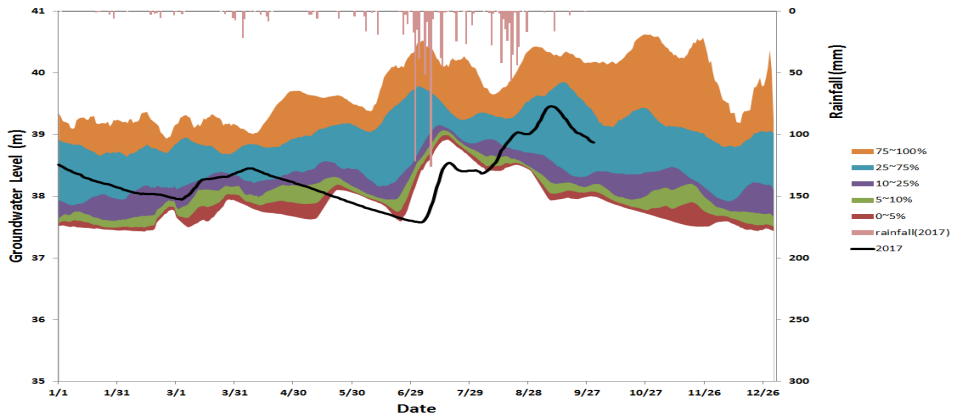
(g) 정읍1



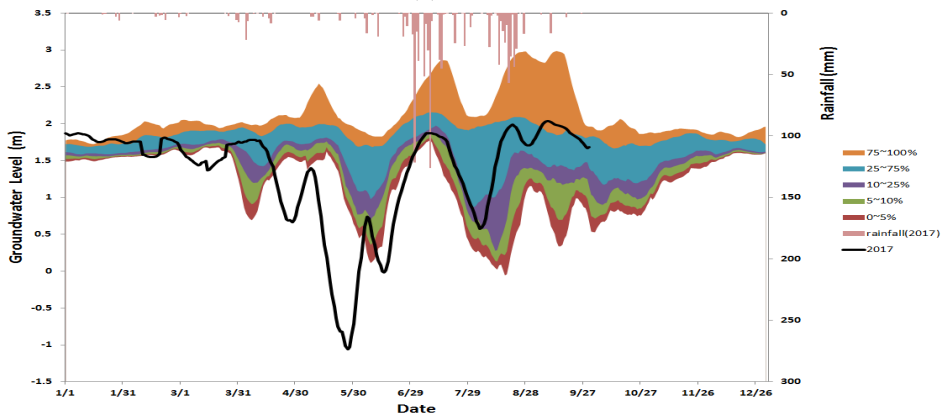
(h) 진안1

그림 5-38. 전라북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)

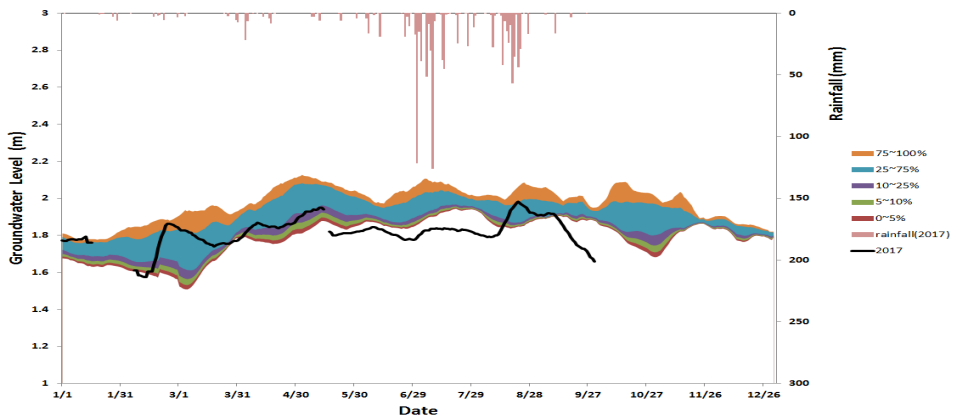




(a) 무안2

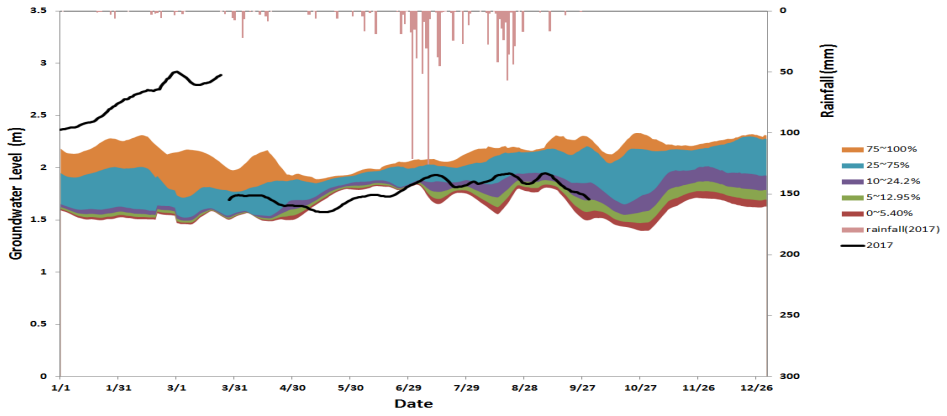


(b) 보성1

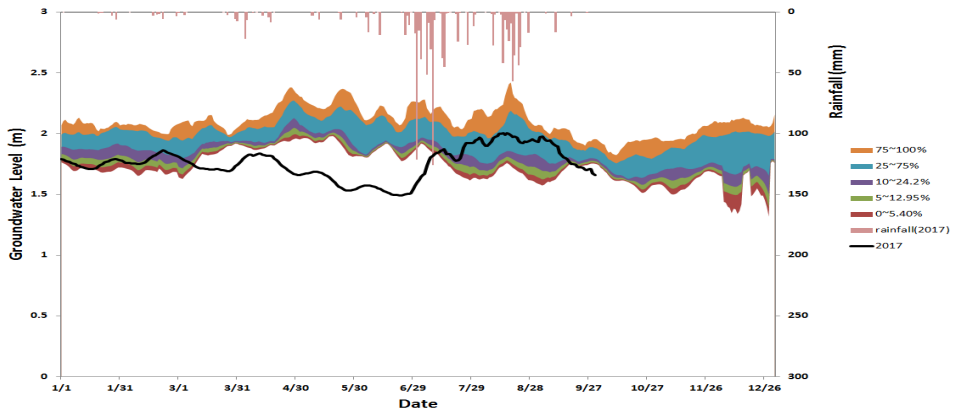


(c) 순천1

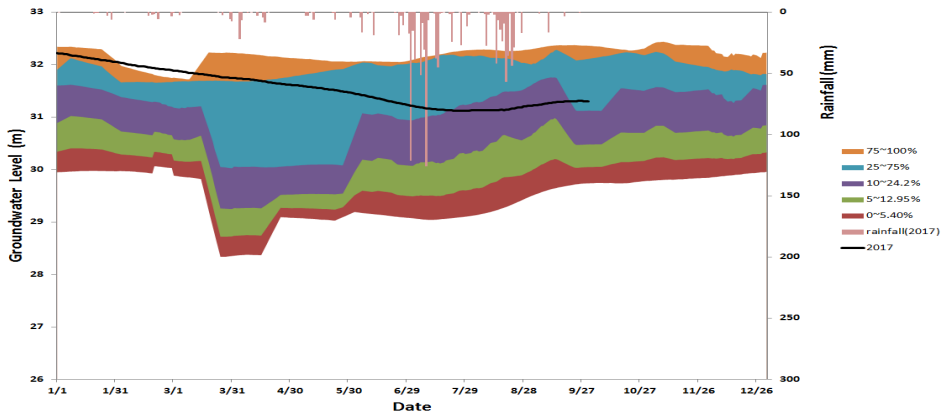
그림 5-39. 전라남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 신안1

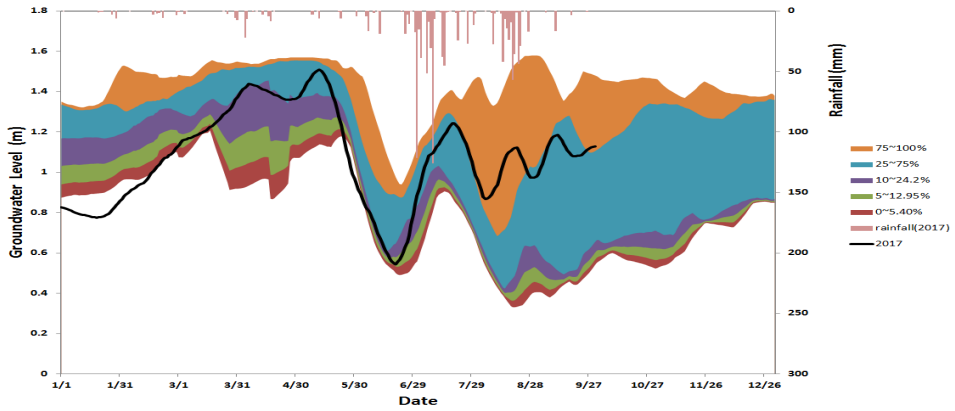


(e) 영광1

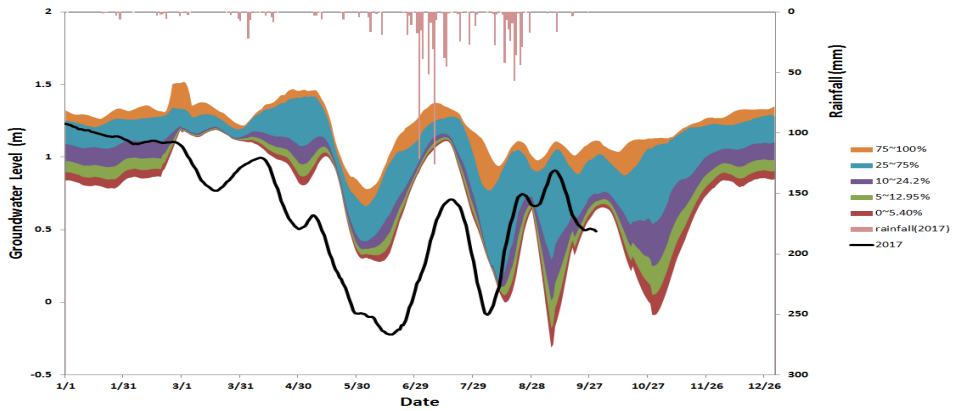


(f) 장성1

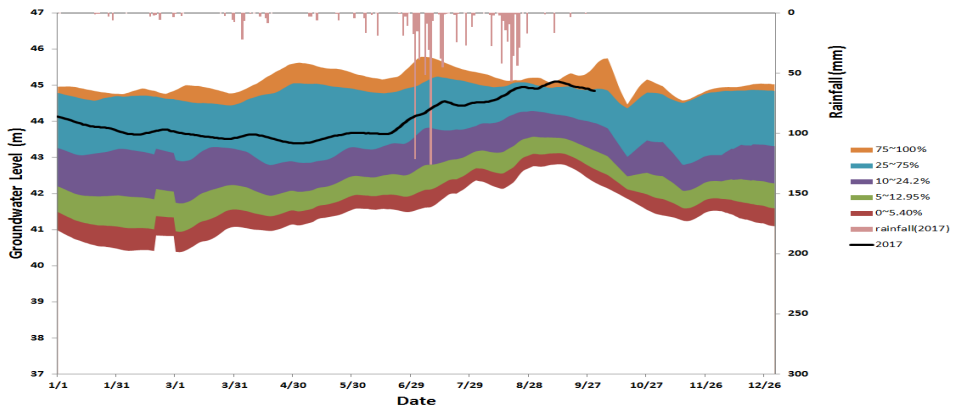
그림 5-39. 전라남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(g) 장흥1

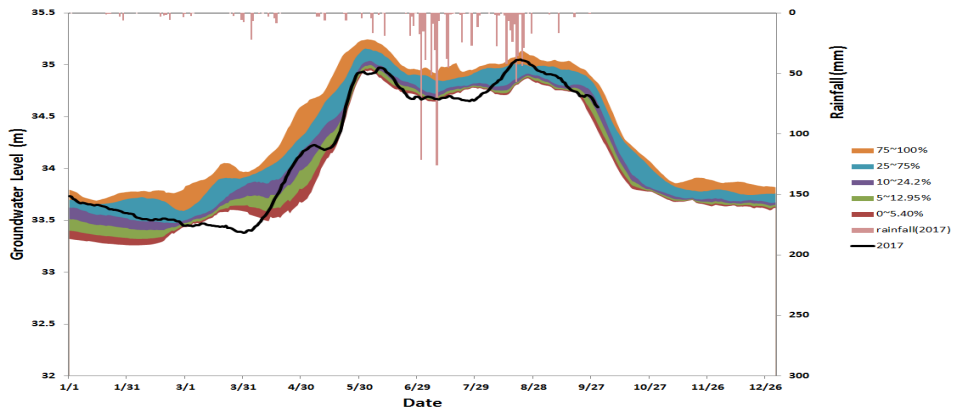


(h) 진도1



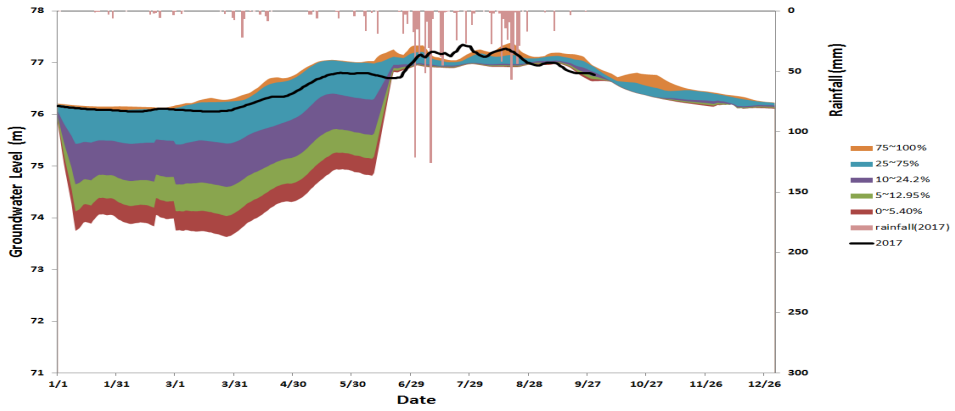
(i) 함평1

그림 5-39. 전라남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)

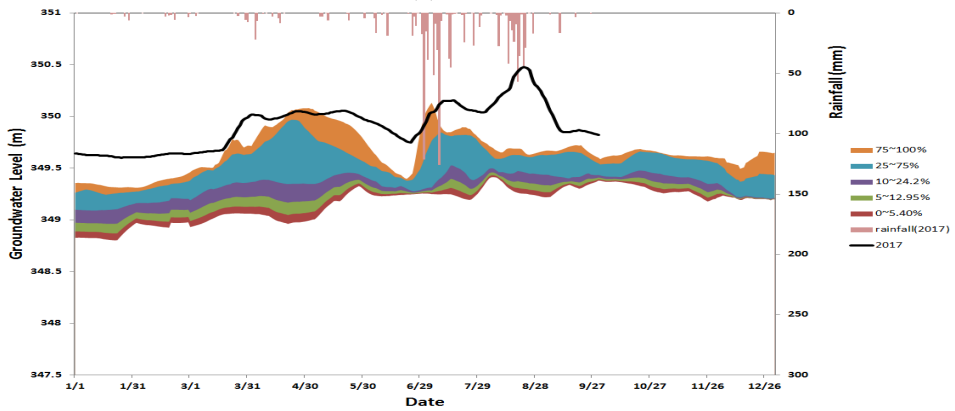


(j) 화순1

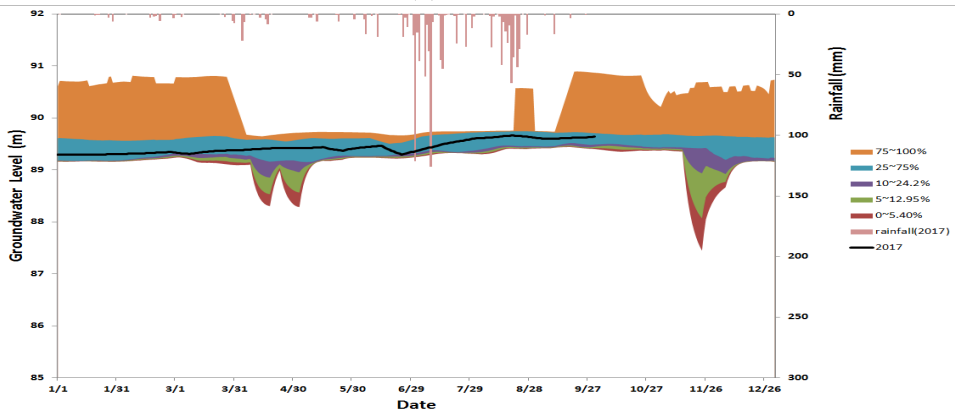
그림 5-39. 전라남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(a) 문경1

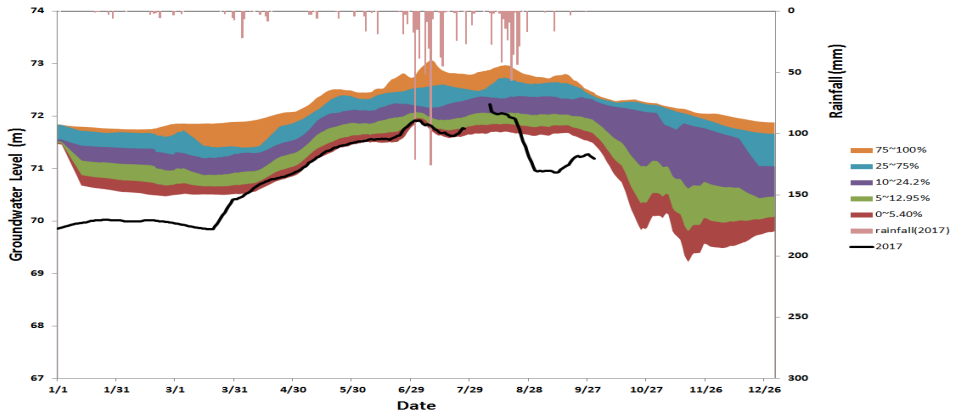


(b) 봉화1

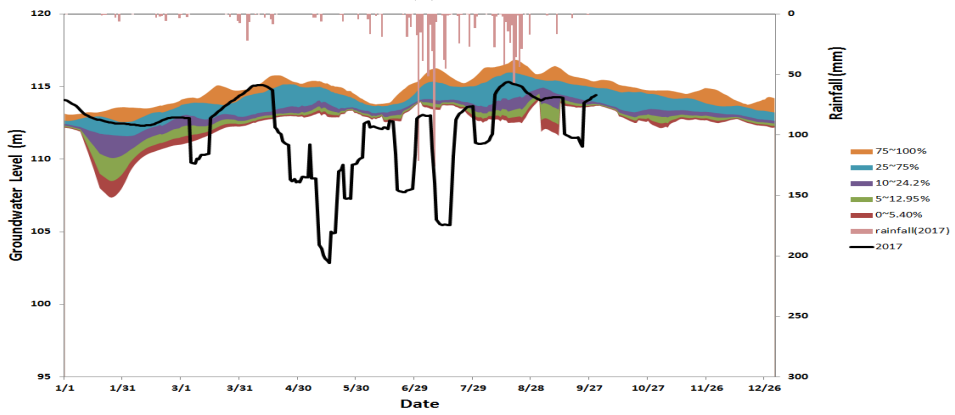


(c) 상주3

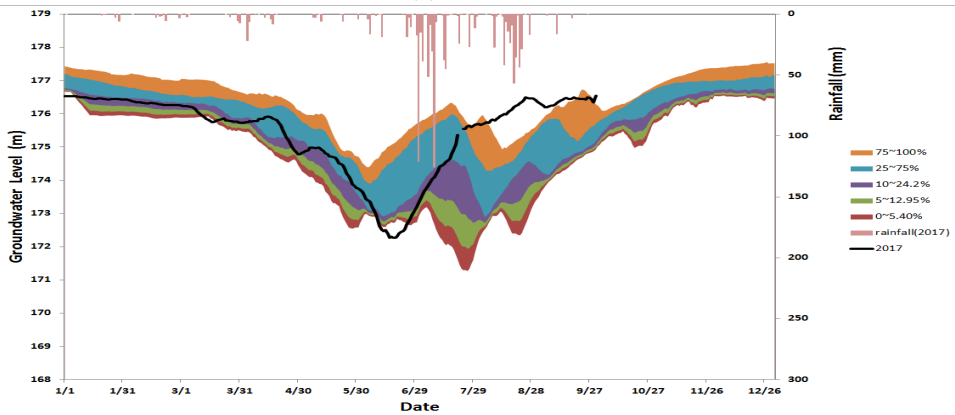
그림 5-40. 경상북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 안동2

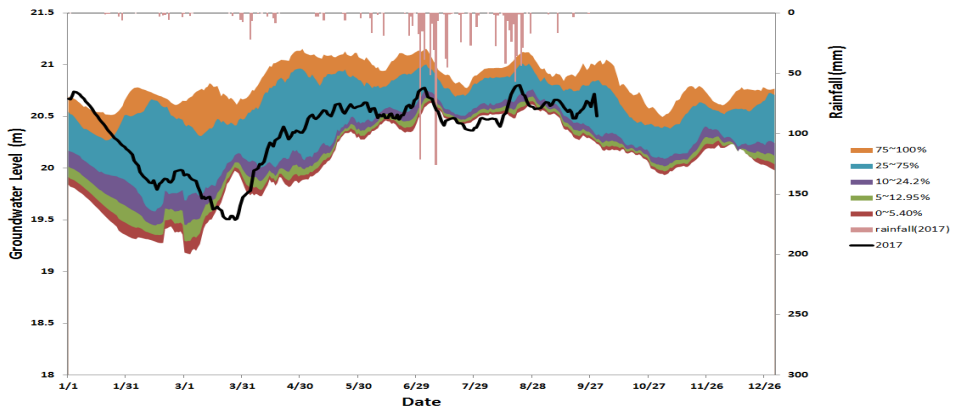


(e) 영천1

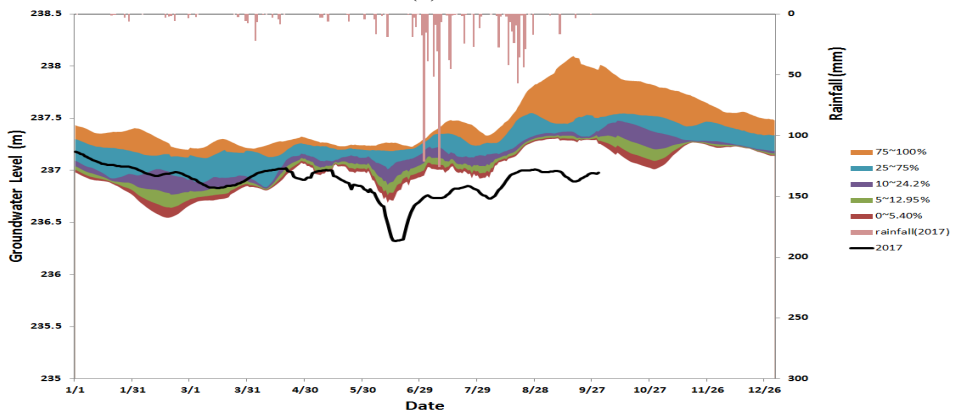


(f) 청송1

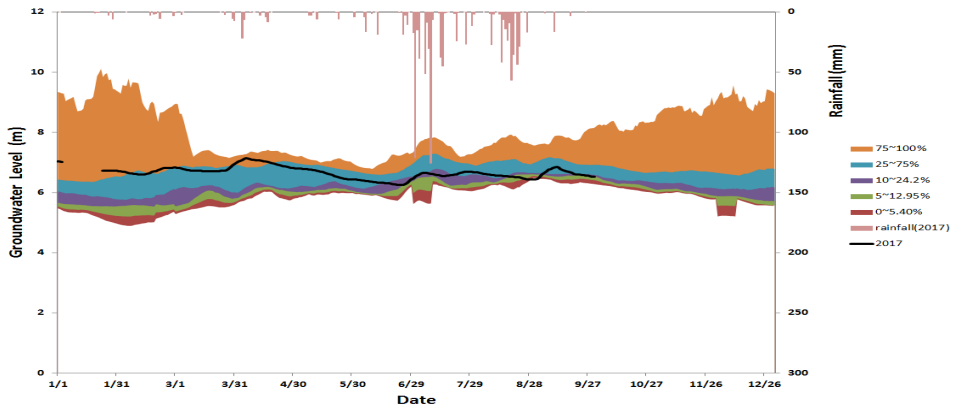
그림 5-40. 경상북도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(a) 거제1

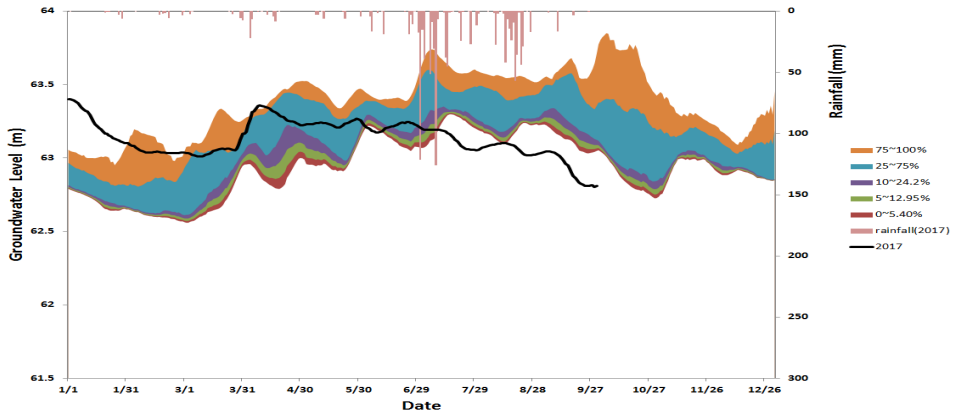


(b) 거창1

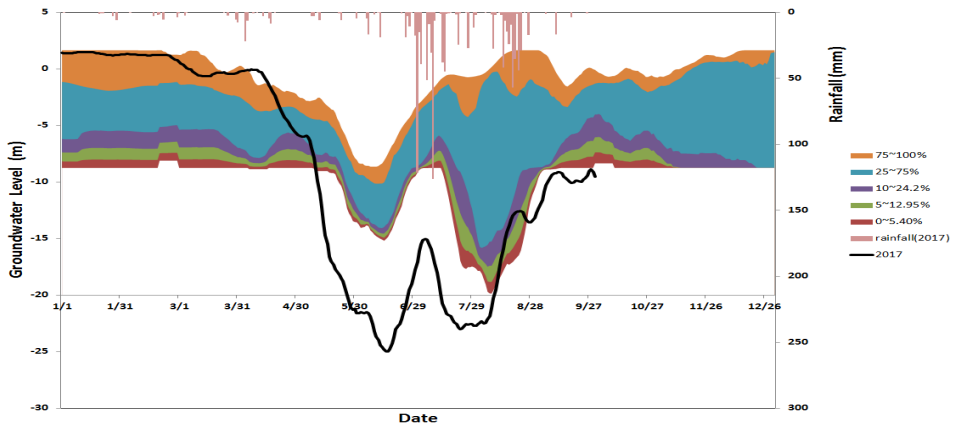


(c) 김해1

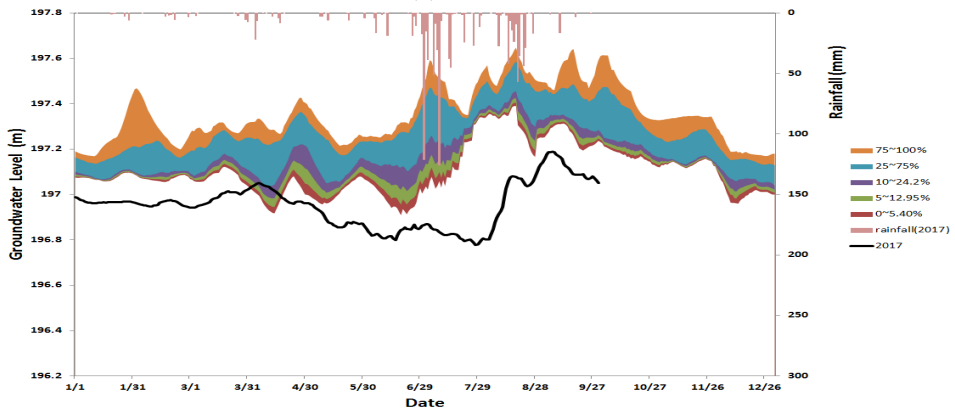
그림 5-41. 경상남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과



(d) 밀양1



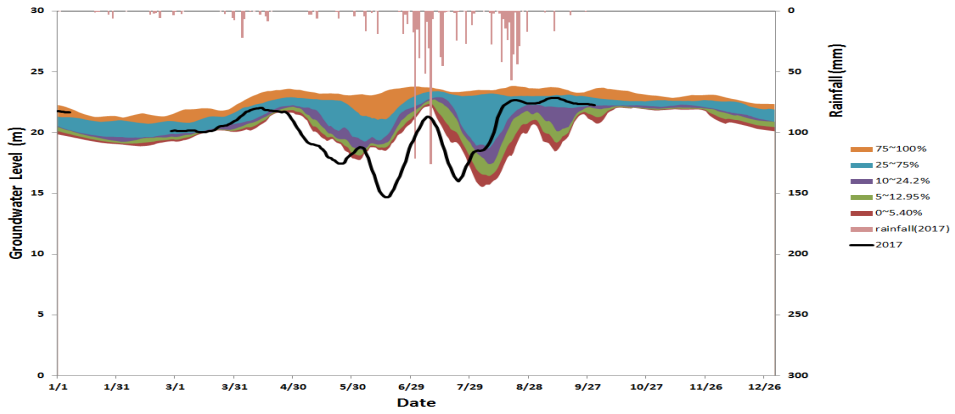
(e) 사천1



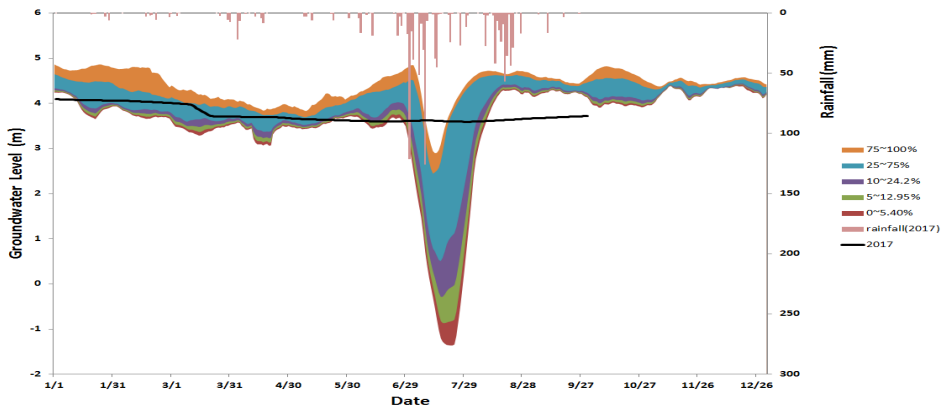
(f) 산청1

그림 5-41. 경상남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)

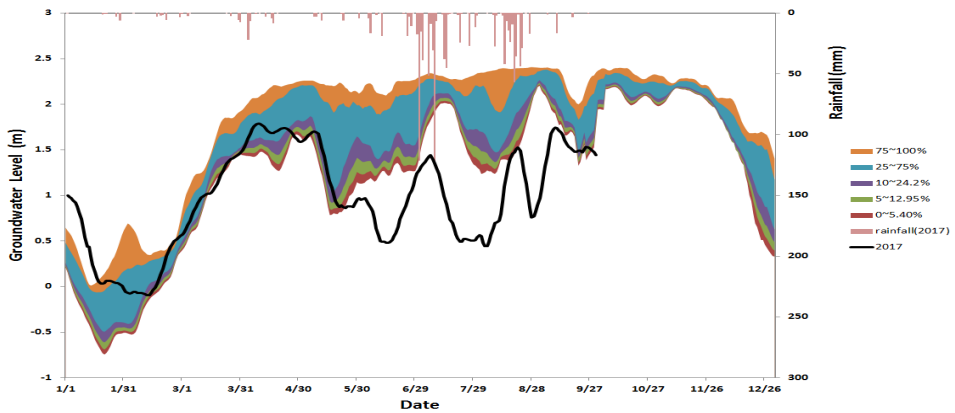




(g) 진주1

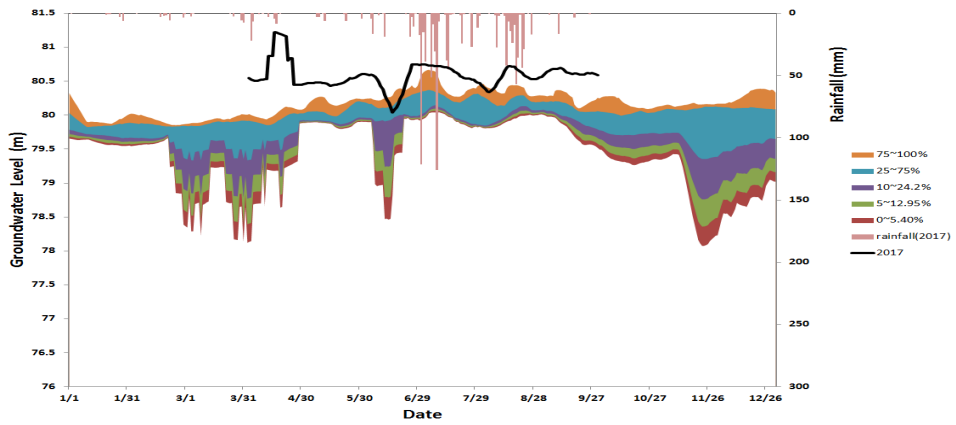


(h) 창녕2



(i) 하동4

그림 5-41. 경상남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)



(j) 합천1

그림 5-41. 경상남도 관측공들의 시계열 자료의 백분위 분석 결과(계속)

### 5.2.2 관측공별 농업가뭄 단계별 지하수위 저하 한계치 제시

- 가뭄 단계별 지하수위 저하 한계치는 앞서 제시한 바와 같이 관측공별 장기 시계열 자료에 대한 백분위(percentile) 분석으로 결정하였는데, 이때 가뭄 단계는 SPI 분류에 의한 -2.0 이하(extreme drought), -1.5~-2.0(severe drought), -1.0~-1.5(moderate drought)에 대하여 각각 5.4% 이하, 12.95%, 24.20%로 구분하였다(표 5-4)~(표 5-11).
- 이번 분석에서 제시된 지하수위 저하 한계치는 2016년까지의 시계열 자료를 이용함에 따라, 자료 축적에 따라 지하수위 한계치는 지속적으로 바뀌게 된다. 따라서 농어촌 지하수넷(<https://www.groundwater-m.or.kr>)에 본 연구에서 제시된 분석 과정을 탑재하여 매년 update할 예정이다.

표 5-4. 경기도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	가평1			광주1			김포1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	112.92	113.01	113.13	144.72	144.73	144.73	3.25	3.30	3.37
2월	112.57	112.65	112.76	144.69	144.71	144.72	3.14	3.20	3.30
3월	112.42	112.52	112.68	144.77	144.77	144.78	3.18	3.27	3.41
4월	112.09	112.28	112.56	144.77	144.78	144.79	3.40	3.49	3.63
5월	113.15	113.31	113.55	145.00	145.01	145.03	3.63	3.72	3.85
6월	113.60	113.66	113.75	145.02	145.02	145.03	3.98	4.06	4.18
7월	113.74	113.89	114.11	144.98	144.99	145.00	4.09	4.22	4.42
8월	114.44	114.50	114.60	145.02	145.03	145.04	4.39	4.47	4.58
9월	114.39	114.41	114.45	144.90	144.92	144.95	4.08	4.20	4.37
10월	113.98	114.00	114.04	144.69	144.71	144.73	4.00	4.04	4.11
11월	113.61	113.67	113.77	144.67	144.70	144.74	3.98	4.05	4.15
12월	113.29	113.34	113.42	144.72	144.74	144.78	3.11	3.24	3.44
월	여주1			용인1			이천1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	32.94	32.95	32.98	35.61	35.69	35.83	37.87	37.90	37.95
2월	32.90	32.91	32.93	35.78	35.87	36.00	37.81	37.83	37.87
3월	32.85	32.86	32.88	35.84	35.98	36.19	37.85	37.87	37.89
4월	32.62	32.66	32.73	35.71	35.86	36.07	37.29	37.31	37.35
5월	32.39	32.47	32.58	35.58	35.68	35.83	37.40	37.41	37.43
6월	32.61	32.65	32.71	35.22	35.28	35.35	37.43	37.45	37.49
7월	32.88	32.94	33.02	35.35	35.41	35.51	37.55	37.60	37.66
8월	33.03	33.05	33.08	36.00	36.03	36.08	37.61	37.66	37.72
9월	33.03	33.05	33.07	35.72	35.74	35.78	37.75	37.77	37.81
10월	33.01	33.03	33.06	35.52	35.53	35.56	37.75	37.79	37.85
11월	32.99	33.02	33.05	35.56	35.58	35.61	37.92	37.97	38.03
12월	32.99	33.01	33.03	35.62	35.65	35.69	37.89	37.93	37.99

표 5-4. (계속)

월	과주1			평택1			화성4		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	4.02	4.02	4.03	-1.93	-1.85	-1.72	5.69	5.76	5.97
2월	4.03	4.04	4.04	-2.81	-2.67	-2.46	5.62	5.80	5.94
3월	4.03	4.04	4.07	-2.52	-2.39	-2.19	5.70	5.89	6.00
4월	3.94	3.98	4.04	-2.27	-2.16	-2.00	5.79	5.89	5.97
5월	4.15	4.18	4.22	-2.50	-2.31	-2.02	5.83	5.85	5.89
6월	4.12	4.15	4.19	-2.47	-2.22	-1.85	5.90	5.95	6.02
7월	4.31	4.34	4.38	-2.98	-2.58	-1.98	6.03	6.10	6.19
8월	4.22	4.24	4.27	-2.94	-2.68	-2.29	6.10	6.16	6.24
9월	4.18	4.19	4.20	-2.40	-2.20	-1.90	6.08	6.13	6.18
10월	4.11	4.13	4.15	-3.00	-2.76	-2.41	5.83	5.91	6.04
11월	4.03	4.06	4.10	-3.30	-2.88	-2.25	5.78	5.82	5.99
12월	4.01	4.03	4.08	-2.04	-1.92	-1.74	5.80	5.84	6.10

표 5-5. 강원도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	고성1			양구1			원주2		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	36.37	36.40	36.45	302.63	302.66	302.71	43.84	43.93	44.04
2월	36.34	36.37	36.40	302.75	302.80	302.87	43.83	43.99	44.04
3월	36.34	36.39	36.47	302.96	302.98	303.00	43.80	43.98	44.02
4월	36.59	36.63	36.70	303.05	303.05	303.06	43.98	44.30	44.37
5월	36.92	36.93	36.96	303.13	303.14	303.15	44.36	44.68	44.83
6월	36.70	36.71	36.73	303.08	303.08	303.09	44.69	44.88	44.96
7월	36.80	36.82	36.85	303.06	303.06	303.08	44.83	45.04	45.25
8월	36.98	37.00	37.03	303.01	303.02	303.03	45.12	45.35	45.45
9월	36.70	36.74	36.80	302.81	302.83	302.87	45.08	45.19	45.26
10월	36.68	36.71	36.76	302.71	302.73	302.75	44.46	44.52	44.62
11월	36.62	36.66	36.72	302.79	302.80	302.81	44.04	44.09	44.29
12월	36.58	36.61	36.64	302.77	302.78	302.79	43.98	44.05	44.22
월	인제1			춘천1			평창1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	205.61	205.62	205.63	77.93	77.97	78.03	550.80	550.86	550.95
2월	205.65	205.66	205.67	77.54	77.59	77.67	550.82	550.88	550.95
3월	205.63	205.64	205.65	77.38	77.47	77.59	550.96	551.02	551.11
4월	205.69	205.69	205.71	78.32	78.40	78.52	551.04	551.09	551.16
5월	205.75	205.76	205.77	80.28	80.30	80.34	550.86	550.88	550.92
6월	205.76	205.76	205.77	80.65	80.68	80.72	550.69	550.72	550.78
7월	205.74	205.75	205.76	80.83	80.87	80.93	550.88	550.92	551.00
8월	205.76	205.76	205.77	80.69	80.75	80.84	550.67	550.70	550.75
9월	205.76	205.76	205.76	80.71	80.73	80.76	550.72	550.76	550.80
10월	205.72	205.72	205.73	80.19	80.23	80.29	550.74	550.77	550.82
11월	205.69	205.70	205.72	79.41	79.46	79.54	550.71	550.79	550.90
12월	205.70	205.71	205.72	78.48	78.57	78.70	550.73	550.78	550.86

표 5-5. (계속)

월	홍천1			화천1			횡성1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	194.74	194.76	194.78	227.61	227.62	227.64	121.48	121.49	121.50
2월	194.36	194.41	194.47	227.58	227.59	227.60	121.40	121.42	121.43
3월	194.18	194.23	194.30	227.69	227.71	227.74	121.45	121.50	121.57
4월	194.38	194.44	194.52	227.74	227.76	227.79	121.56	121.57	121.58
5월	194.89	194.97	195.09	227.55	227.61	227.71	121.70	121.71	121.73
6월	195.36	195.45	195.54	227.30	227.39	227.53	121.65	121.66	121.68
7월	195.57	195.62	195.68	227.69	227.77	227.89	121.75	121.79	121.85
8월	195.77	195.82	195.88	227.41	227.54	227.73	121.84	121.90	121.97
9월	195.56	195.62	195.73	227.23	227.30	227.41	121.70	121.79	121.93
10월	195.15	195.24	195.37	227.41	227.45	227.51	121.48	121.59	121.76
11월	194.89	194.92	194.97	227.79	227.81	227.85	121.58	121.63	121.71
12월	195.19	195.19	195.20	227.82	227.83	227.84	121.64	121.65	121.68

표 5-6. 충청북도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	괴산1			보은1			영동1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	214.45	214.49	214.55	160.32	160.32	160.33	207.52	207.63	207.80
2월	214.50	214.54	214.59	160.31	160.32	160.33	207.47	207.60	207.79
3월	214.52	214.57	214.64	160.34	160.35	160.35	207.58	207.66	207.78
4월	214.51	214.55	214.60	160.11	160.14	160.17	207.84	207.88	207.95
5월	214.60	214.61	214.63	159.03	159.09	159.19	207.94	207.96	207.99
6월	214.53	214.56	214.59	158.67	158.82	159.04	207.97	208.00	208.04
7월	214.62	214.64	214.67	159.48	159.57	159.71	208.13	208.15	208.19
8월	214.67	214.70	214.75	158.84	158.96	159.12	207.98	208.01	208.05
9월	214.59	214.61	214.63	159.76	159.80	159.85	207.94	207.98	208.04
10월	214.52	214.54	214.58	160.22	160.25	160.28	207.76	207.83	207.94
11월	214.59	214.60	214.61	160.00	160.05	160.13	207.74	207.81	207.92
12월	214.56	214.57	214.60	160.31	160.32	160.34	207.70	207.78	207.90
월	옥천1			음성1			제천1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	105.35	105.51	105.76	76.39	76.44	76.52	258.24	258.26	258.30
2월	105.13	105.29	105.52	76.42	76.45	76.49	258.25	258.29	258.34
3월	105.03	105.16	105.35	76.48	76.52	76.56	258.35	258.37	258.42
4월	105.05	105.16	105.31	76.29	76.36	76.45	258.38	258.41	258.52
5월	105.28	105.33	105.39	76.60	76.69	76.83	258.36	258.51	258.67
6월	105.38	105.45	105.54	76.84	76.88	76.94	258.60	258.77	258.86
7월	105.55	105.58	105.62	76.91	76.95	77.00	258.78	258.95	259.02
8월	105.62	105.66	105.72	76.96	77.02	77.11	258.61	259.08	259.13
9월	105.53	105.61	105.75	76.92	76.97	77.04	258.84	259.04	259.10
10월	105.45	105.49	105.55	76.68	76.71	76.76	258.58	258.70	258.83
11월	105.43	105.51	105.64	76.66	76.68	76.72	258.44	258.53	258.61
12월	105.66	105.74	105.85	76.50	76.54	76.61	258.35	258.42	258.48

표 5-6. (계속)

월	증평1			진천1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	56.95	56.98	57.01	79.47	79.49	79.55
2월	56.66	56.68	56.72	79.52	79.55	79.60
3월	56.64	56.65	56.67	79.55	79.58	79.64
4월	56.68	56.69	56.70	79.24	79.33	79.48
5월	56.38	56.48	56.63	78.56	78.62	78.67
6월	56.11	56.26	56.50	78.49	78.64	78.75
7월	56.32	56.41	56.55	78.93	79.08	79.37
8월	56.32	56.45	56.64	78.85	78.96	79.25
9월	56.07	56.29	56.61	79.52	79.66	79.81
10월	56.26	56.43	56.68	79.70	79.75	79.79
11월	56.48	56.62	56.83	79.61	79.63	79.68
12월	56.54	56.68	56.89	79.58	79.60	79.65

표 5-7. 충청남도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	공주1			금산1			논산1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	5.93	5.96	6.01	149.06	149.10	149.16	1.37	1.39	1.42
2월	5.96	5.98	6.02	149.05	149.09	149.14	1.11	1.12	1.13
3월	5.98	5.99	6.01	149.04	149.08	149.14	1.11	1.11	1.13
4월	6.08	6.10	6.14	149.15	149.18	149.21	1.26	1.30	1.36
5월	5.90	5.93	5.97	149.12	149.14	149.16	1.37	1.40	1.43
6월	5.88	5.92	5.99	149.14	149.15	149.18	1.41	1.46	1.53
7월	6.13	6.16	6.20	149.19	149.21	149.24	1.82	1.88	1.95
8월	6.11	6.13	6.15	149.17	149.20	149.25	1.92	1.99	2.08
9월	6.04	6.07	6.10	149.14	149.16	149.20	2.40	2.47	2.56
10월	6.09	6.10	6.13	148.98	149.04	149.13	3.30	3.33	3.38
11월	6.08	6.11	6.16	148.79	148.88	149.00	3.56	3.64	3.77
12월	6.07	6.10	6.13	148.75	148.84	148.96	2.17	2.18	2.21
월	보령1			부여1			서천1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	1.16	1.21	1.29	8.42	8.43	8.46	3.52	3.61	3.74
2월	1.23	1.29	1.39	8.38	8.42	8.49	3.58	3.62	3.68
3월	1.16	1.25	1.39	8.54	8.59	8.67	3.60	3.64	3.72
4월	1.08	1.17	1.32	9.23	9.26	9.32	3.81	3.85	3.91
5월	1.00	1.03	1.08	9.47	9.51	9.56	4.08	4.10	4.13
6월	0.88	0.89	0.92	9.45	9.49	9.56	4.07	4.09	4.12
7월	0.89	0.92	0.96	9.32	9.37	9.44	4.01	4.03	4.06
8월	0.92	0.93	0.96	9.41	9.47	9.56	3.99	4.01	4.04
9월	0.83	0.85	0.88	9.24	9.27	9.32	3.75	3.79	3.86
10월	0.86	0.89	0.94	8.91	8.95	8.99	2.71	3.01	3.46
11월	0.91	0.94	0.97	8.94	8.99	9.06	2.81	3.08	3.48
12월	0.93	1.00	1.10	8.65	8.69	8.74	3.71	3.75	3.81

표 5-7. (계속)

월	청양1			홍성1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	44.98	45.01	45.06	10.06	10.07	10.09
2월	44.94	44.97	45.02	10.00	10.01	10.03
3월	44.88	44.92	44.99	9.98	9.99	10.00
4월	45.00	45.03	45.07	10.00	10.02	10.05
5월	45.41	45.42	45.45	10.24	10.25	10.27
6월	45.40	45.43	45.48	10.16	10.18	10.21
7월	45.39	45.43	45.48	10.24	10.25	10.27
8월	45.36	45.39	45.45	10.22	10.23	10.26
9월	45.36	45.38	45.41	10.14	10.15	10.17
10월	45.07	45.09	45.12	10.03	10.05	10.07
11월	45.04	45.05	45.08	10.06	10.08	10.11
12월	45.13	45.14	45.16	10.10	10.11	10.14

표 5-8. 전라북도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	고창1			남원1			무주1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	5.37	5.41	5.45	456.91	456.94	456.98	399.29	399.33	399.38
2월	5.39	5.41	5.43	456.95	457.02	457.12	399.39	399.40	399.42
3월	5.43	5.46	5.48	457.06	457.09	457.14	399.41	399.42	399.44
4월	5.45	5.46	5.48	457.09	457.11	457.14	399.39	399.41	399.43
5월	5.60	5.63	5.67	457.12	457.14	457.16	399.39	399.40	399.43
6월	5.73	5.75	5.78	457.13	457.16	457.21	399.40	399.41	399.43
7월	5.81	5.83	5.86	457.32	457.40	457.50	399.50	399.52	399.55
8월	5.90	5.93	5.98	457.51	457.56	457.63	399.46	399.48	399.50
9월	5.84	5.91	5.99	457.31	457.33	457.37	399.46	399.48	399.49
10월	5.64	5.67	5.71	457.16	457.18	457.22	399.44	399.46	399.50
11월	5.54	5.55	5.57	456.94	456.96	456.99	399.46	399.48	399.50
12월	5.50	5.51	5.53	456.94	456.97	457.02	399.52	399.53	399.55
월	부안1			순창1			장수1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	1.98	2.11	2.20	83.47	83.86	84.34	411.57	411.61	411.66
2월	1.96	2.02	2.07	83.66	84.14	84.61	411.73	411.75	411.79
3월	1.56	1.69	1.79	83.57	84.23	84.67	411.85	411.87	411.91
4월	1.09	1.31	1.49	83.62	84.40	84.68	411.94	411.96	412.00
5월	0.51	0.75	1.03	83.44	84.25	84.52	412.17	412.19	412.22
6월	0.52	0.73	1.02	83.14	83.66	83.95	412.01	412.03	412.07
7월	0.83	1.20	1.57	83.83	84.25	84.35	412.20	412.23	412.28
8월	0.20	0.65	1.09	84.46	84.72	84.86	412.12	412.18	412.26
9월	0.96	1.23	1.48	84.49	84.79	85.14	412.08	412.11	412.16
10월	1.09	1.24	1.38	84.56	84.78	85.13	411.94	411.95	411.98
11월	1.39	1.65	1.80	84.60	84.86	85.12	411.71	411.73	411.76
12월	1.86	2.01	2.10	84.54	84.86	85.07	411.64	411.66	411.69

표 5-8. (계속)

월	정읍1			진안1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	22.13	22.21	22.26			
2월	21.99	22.06	22.18			
3월	21.88	21.94	22.05			
4월	21.66	21.74	21.88			
5월	22.05	22.15	22.28			
6월	22.10	22.21	22.33			
7월	22.32	22.38	22.45			
8월	22.30	22.36	22.43			
9월	22.12	22.23	22.30			
10월	21.87	21.97	22.06			
11월	21.91	21.94	22.01			
12월	22.08	22.13	22.19			

표 5-9. 전라남도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	무안2			보성1			순천1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	37.56	37.68	37.94	1.54	1.56	1.60	1.66	1.67	1.70
2월	37.60	37.74	38.11	1.60	1.62	1.65	1.61	1.63	1.67
3월	37.83	38.04	38.28	1.63	1.68	1.74	1.65	1.67	1.70
4월	37.91	38.10	38.29	1.29	1.45	1.61	1.79	1.82	1.85
5월	38.02	38.23	38.47	1.40	1.53	1.66	1.86	1.89	1.93
6월	37.93	38.06	38.30	0.94	1.18	1.36	1.86	1.87	1.89
7월	38.76	38.85	38.96	1.35	1.52	1.64	1.92	1.93	1.95
8월	38.51	38.61	38.81	0.56	0.84	1.27	1.87	1.88	1.90
9월	38.10	38.23	38.46	0.97	1.25	1.44	1.89	1.90	1.91
10월	37.89	38.04	38.38	0.86	1.02	1.24	1.79	1.81	1.84
11월	37.82	38.10	38.32	1.33	1.43	1.53	1.81	1.83	1.84
12월	37.60	37.75	38.08	1.58	1.60	1.63	1.80	1.81	1.82
월	신안1			영광1			장성1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	1.54	1.57	1.61	1.75	1.80	1.88	30.38	30.95	31.56
2월	1.55	1.57	1.62	1.73	1.78	1.86	30.28	30.70	31.31
3월	1.53	1.54	1.56	1.82	1.85	1.89	29.63	30.11	30.77
4월	1.53	1.55	1.58	1.92	1.95	1.98	28.93	29.36	30.05
5월	1.70	1.73	1.77	1.94	1.97	2.01	29.27	29.56	30.12
6월	1.82	1.83	1.86	1.85	1.87	1.90	29.55	30.14	30.98
7월	1.77	1.81	1.87	1.79	1.82	1.88	29.53	30.18	31.08
8월	1.73	1.80	1.89	1.70	1.75	1.81	29.79	30.52	31.42
9월	1.74	1.80	1.90	1.71	1.74	1.78	30.09	30.71	31.49
10월	1.52	1.60	1.73	1.62	1.64	1.68	30.12	30.62	31.38
11월	1.69	1.79	1.94	1.62	1.66	1.72	30.21	30.76	31.52
12월	1.72	1.82	1.96	1.59	1.64	1.72	30.24	30.72	31.43



표 5-9. (계속)

월	장흥1			진도1			함평1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	0.96	1.05	1.17	0.87	0.95	1.07	41.22	41.99	43.14
2월	1.07	1.15	1.27	0.97	1.03	1.13	41.15	41.97	43.18
3월	1.14	1.21	1.33	1.16	1.17	1.18	41.24	42.00	43.13
4월	1.05	1.19	1.41	1.04	1.08	1.15	41.46	42.06	42.96
5월	1.17	1.23	1.33	0.81	0.85	0.92	41.70	42.22	43.00
6월	0.64	0.69	0.75	0.50	0.55	0.63	41.95	42.50	43.33
7월	0.81	0.85	0.91	0.94	0.97	1.02	42.30	42.89	43.77
8월	0.45	0.49	0.55	0.32	0.38	0.45	42.76	43.30	44.10
9월	0.47	0.50	0.56	0.29	0.39	0.54	43.00	43.46	44.13
10월	0.59	0.63	0.68	0.39	0.49	0.63	42.23	42.73	43.46
11월	0.66	0.69	0.75	0.52	0.65	0.85	41.75	42.27	43.06
12월	0.81	0.82	0.85	0.89	0.96	1.07	41.75	42.36	43.27
월	화순1								
	5.4%	12.95%	24.2%						
1월	33.36	33.46	33.57						
2월	33.36	33.42	33.49						
3월	33.56	33.60	33.65						
4월	33.66	33.79	33.94						
5월	34.30	34.41	34.52						
6월	34.84	34.87	34.92						
7월	34.73	34.75	34.78						
8월	34.80	34.81	34.85						
9월	34.71	34.75	34.80						
10월	33.97	34.02	34.08						
11월	33.69	33.70	33.73						
12월	33.64	33.66	33.69						

표 5-10. 경상북도 관측공 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

월	문경1			봉화1			상주3		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	74.53	74.95	75.56	348.90	348.98	349.11	89.17	89.18	89.18
2월	74.28	74.76	75.47	349.01	349.08	349.18	89.20	89.22	89.24
3월	74.11	74.65	75.46	349.08	349.17	349.31	89.20	89.25	89.31
4월	74.45	74.96	75.71	349.09	349.20	349.36	88.85	89.05	89.22
5월	75.07	75.55	76.26	349.22	349.30	349.41	89.09	89.16	89.22
6월	76.06	76.30	76.64	349.26	349.29	349.33	89.24	89.26	89.29
7월	76.94	76.95	76.97	349.28	349.33	349.42	89.32	89.33	89.36
8월	76.95	76.96	76.98	349.34	349.39	349.46	89.39	89.41	89.45
9월	76.90	76.93	76.98	349.33	349.37	349.43	89.44	89.45	89.48
10월	76.51	76.52	76.53	349.36	349.40	349.44	89.40	89.44	89.48
11월	76.24	76.26	76.30	349.28	349.33	349.40	88.91	89.23	89.42
12월	76.15	76.17	76.20	349.22	349.23	349.25	89.05	89.11	89.24

표 5-10. (계속)

월	안동2			영천1			청송1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	71.00	71.22	71.45	110.24	111.08	111.95	176.25	176.39	176.59
2월	70.74	71.04	71.35	110.74	111.43	112.16	176.01	176.17	176.41
3월	70.68	70.92	71.24	112.03	112.47	112.96	175.85	175.98	176.17
4월	70.84	71.08	71.38	112.83	112.99	113.32	175.06	175.23	175.47
5월	71.41	71.67	71.92	113.19	113.38	113.69	173.69	174.01	174.50
6월	71.71	71.94	72.18	113.04	113.19	113.41	172.87	173.00	173.21
7월	71.81	71.99	72.23	113.59	113.78	114.03	172.63	173.28	174.25
8월	71.83	72.05	72.36	113.11	113.52	114.15	172.98	173.32	173.82
9월	71.78	72.01	72.35	113.40	113.85	114.38	174.42	174.51	174.65
10월	70.91	71.41	72.15	113.06	113.24	113.50	175.39	175.55	175.79
11월	70.14	70.81	71.82	112.74	112.99	113.33	176.28	176.38	176.53
12월	70.02	70.56	71.37	112.58	112.73	112.93	176.55	176.62	176.73

표 5-11. 경상남도 관측공의 농업가뭄 단계별 월평균 지하수위 저하 한계치

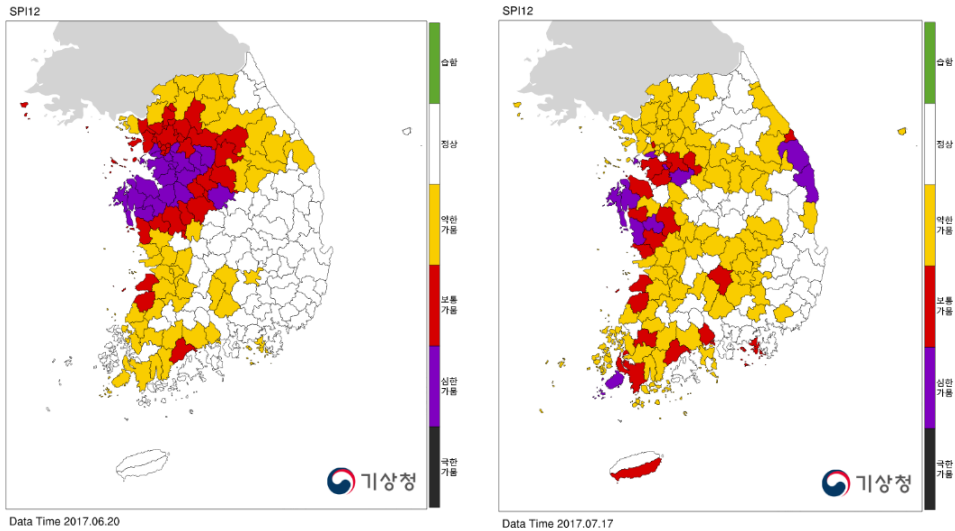
월	거제1			거창1			김해1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	19.70	19.82	20.01	236.91	236.94	236.99	5.38	5.58	5.91
2월	19.43	19.54	19.72	236.69	236.80	236.97	5.28	5.58	5.86
3월	19.63	19.74	19.89	236.78	236.84	236.92	5.63	5.84	6.16
4월	19.88	19.96	20.08	236.93	236.96	237.00	5.94	6.07	6.19
5월	20.16	20.21	20.28	237.03	237.06	237.12	6.00	6.09	6.26
6월	20.42	20.47	20.54	236.90	236.98	237.09	5.97	6.08	6.32
7월	20.53	20.56	20.61	237.03	237.08	237.17	6.17	6.38	6.64
8월	20.57	20.61	20.67	237.15	237.18	237.23	6.35	6.48	6.59
9월	20.42	20.45	20.51	237.31	237.33	237.35	6.46	6.56	6.62
10월	20.16	20.19	20.24	237.18	237.28	237.43	6.21	6.31	6.43
11월	20.09	20.14	20.21	237.22	237.25	237.31	5.97	6.05	6.25
12월	20.15	20.19	20.26	237.21	237.22	237.23	5.64	5.82	6.13
월	밀양1			사천1			산청1		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	62.71	62.72	62.74	-8.06	-7.12	-5.71	197.08	197.08	197.09
2월	62.61	62.62	62.64	-7.82	-6.83	-5.37	197.08	197.08	197.10
3월	62.70	62.74	62.79	-8.05	-7.09	-5.66	197.09	197.11	197.13
4월	62.94	63.01	63.12	-8.34	-7.72	-6.80	197.02	197.06	197.12
5월	62.99	63.03	63.09	-9.59	-9.01	-8.15	197.03	197.06	197.11
6월	63.15	63.18	63.22	-12.97	-12.63	-12.11	197.01	197.06	197.13
7월	63.23	63.26	63.31	-11.50	-10.32	-8.51	197.17	197.21	197.26
8월	63.19	63.21	63.23	-15.67	-14.35	-12.39	197.32	197.35	197.38
9월	63.15	63.19	63.24	-8.28	-7.54	-6.43	197.27	197.29	197.32
10월	62.88	62.91	62.95	-7.91	-6.92	-5.42	197.18	197.20	197.22
11월	62.95	62.96	62.99	-8.66	-8.55	-7.24	197.14	197.15	197.15
12월	62.89	62.90	62.91	-8.74	-8.74	-8.24	197.02	197.04	197.07

표 5-11. (계속)

월	진주1			창녕2			하동4		
	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%	5.4%	12.95%	24.2%
1월	19.58	19.82	19.95	3.99	4.03	4.09	-0.37	-0.32	-0.24
2월	19.24	19.49	19.69	3.77	3.81	3.87	-0.15	-0.11	-0.04
3월	19.94	20.06	20.23	3.47	3.54	3.65	0.72	0.82	0.96
4월	21.09	21.31	21.54	3.39	3.45	3.53	1.49	1.56	1.65
5월	20.01	20.42	21.08	3.47	3.52	3.61	1.23	1.33	1.48
6월	19.36	19.74	20.32	3.61	3.71	3.85	1.31	1.40	1.54
7월	20.61	21.45	21.82	0.22	0.84	1.76	1.77	1.82	1.89
8월	18.58	19.71	20.59	3.88	4.04	4.28	1.74	1.80	1.89
9월	20.51	21.16	22.14	4.25	4.29	4.35	1.76	1.81	1.89
10월	21.89	22.07	22.23	4.03	4.12	4.25	2.08	2.10	2.14
11월	21.90	22.03	22.18	4.22	4.26	4.32	2.09	2.11	2.12
12월	20.87	21.28	21.43	4.32	4.35	4.39	1.18	1.22	1.28
월	합천1								
	5.4%	12.95%	24.2%						
1월	79.62	79.66	79.71						
2월	79.45	79.52	79.63						
3월	78.88	79.12	79.48						
4월	79.13	79.32	79.60						
5월	79.87	79.89	79.91						
6월	79.56	79.72	79.96						
7월	79.95	79.97	80.00						
8월	79.93	79.96	80.00						
9월	79.81	79.87	79.95						
10월	79.43	79.55	79.73						
11월	78.97	79.21	79.56						
12월	78.90	79.16	79.55						

### 5.2.3 지하수위 저하 한계치 기준을 이용한 2017년 농업가뭇 영향 분석

- 2017년은 전국적으로 가뭇이 발생하였으며, 특히 봄 가뭇의 경우 경기 남부 및 충남 서북부 지역을 중심으로 가뭇 강도가 매우 심각하였다. <그림 5-42>는 6월 20일과 7월 17일의 SPI12로 분석된 전국적인 가뭇 현황으로, 영남지역과 충북 및 강원 일부지역을 제외하고 전국적인 가뭇 발생 현황을 나타낸 기상청 자료이다.



(a) 2017.06.20

(b) 2017.07.17

그림 5-42. 행정구역별 가뭄(SPI12) 분포 현황(출처: 기상청)

- 앞서 분석된 시계열 자료 백분위 분석 결과를 이용한 관측공별로 지하수위 저하 한계치 결과에 따르면, 2017년 4월~7월 기간 동안에 지하수위가 각 관측공별 지하수위 한계치 이하를 나타내는 관측공은 경기도의 경우 광주1, 용인1, 평택1, 이천1 관측공으로 나타났다. 또한 충청남도의 경우에는 공주1, 금산1, 논산1, 보령1, 부여1, 서천1, 청양1, 홍성1 관측공에서 한계치 이하의 지하수위가 형성됨에 따라, 가뭄의 영향이 충남에 위치한 관측공들의 지하수위 하강에 직접적인 영향을 미친 것으로 나타났다.
- 이와 더불어 충북의 일부 관측공인 보은1, 옥천1, 음성1, 진천1 관측공과, 전남의 무안2, 보성1, 영광1, 진도1 관측공의 지하수위 하강 현상이 나타났다. 특히 도서지방으로 가뭄이 극심하였던 진도군의 경우, 진도1 관측공의 지하수위 하강이 급격하게 나타남에 따라, 본 연구에서 적용한 방법이 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄의 평가에 적합한 것으로 판단된다.

### 5.3 기존 농업가뭄 예·경보 인자와의 통합 방안 제시

- 현재 운영 중인 가뭄판단 기준은 다부처 합동으로 수립하고 있으며, 각 부처별 가뭄 예·경보 판단 기준은 주의, 심함, 매우심함의 3단계로 구분하여 관리하고 있다(표 5-12).

표 5-12. 가뭄 예·경보 판단 기준(국민안전처, 2016)

구분	가뭄 예·경보 기준
주의	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 기상가뭄: 최근 6개월(봄철 3개월) 누적강수량이 1973년 이후 같은 기간의 누적강수량을 많은 순으로 나열한 것과 비교하였을 때 하위 6.5%에 해당하는 경우</li> <li>◦ 농업용수: 영농기(4~9월)에 저수지 저수율이 평년의 70% 이하 또는 밭 토양 유효수분이 60% 이하에 해당되는 경우</li> <li>◦ 생활 및 공업용수: 하천여유수량을 감량 공급하는 상황에서 현재 하천유지 유량이 고갈되거나, 장래 1.3개월 후 하천 및 댐 등에서 농업용수 공급이 어려울 것으로 판단되는 경우</li> </ul>
심함	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 기상가뭄: 최근 6개월(봄철 3개월) 누적강수량이 1973년 이후 같은 기간의 누적강수량을 많은 순으로 나열한 것과 비교하였을 때 하위 2%에 해당하는 경우</li> <li>◦ 농업용수: 영농기(4~9월)에 저수지 저수율이 평년의 60% 이하 또는 밭 토양 유효수분이 40% 이하인 상황에서 가뭄피해가 발생하였거나 예상되는 경우</li> <li>◦ 생활 및 공업용수: 하천유지 유량 감량 공급하는 상황에서 현재 하천 및 댐 등에서 농업용수 공급이 부족하거나, 장래 1, 3개월 후 생활 및 공업용수 공급이 어려울 것으로 판단되는 경우</li> </ul>
매우 심함	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 기상가뭄: 최근 6개월(봄철 3개월) 누적강수량이 1973년 이후 같은 기간의 누적강수량을 많은 순으로 나열한 것과 비교하였을 때 하위 2%에 해당하는 가뭄 심함 단계가 40일 이상 지속되는 경우</li> <li>◦ 농업용수: 영농기(4~9월)에 저수지 저수율이 평년의 50% 이하 또는 밭 토양 유효수분이 30% 이하에 해당되는 경우</li> <li>◦ 생활 및 공업용수: 현재 하천 및 댐 등에서 농업용수, 생활 및 공업용수 공급이 부족하거나, 장래 1, 3개월 후 하천유지유량, 농업용수 뿐만 아니라 생활 및 공업용수 공급에도 차질이 발생한 경우</li> </ul>

- 이 중 농업가뭄의 경우에는 농림축산식품부에서 「재난 및 안전관리 기본법」 및 「국가위기관리 기본지침(대통령훈령 제342호)」을 근거로 「가뭄재난」에 대한 정보의 위기관리 목표와 방향, 의사결정체계, 위기경보체계, 부처·기관의 책임과 역할 등을 규정한 정부합동 표준매뉴얼을 바탕으로 농업가뭄재난에 대한 세부 대응절차와 제반 조치 사항이 수록된 「농업가뭄대응 실무매뉴얼」을 2016년 1월에 수립하여 가뭄재난에 대응하고 있다.
- 농업가뭄의 판단 기준은 우리나라 기후와 농업 특성 등을 반영한 농업가뭄의 체계적·사전적 가뭄대책에 활용하기 위하여, 저수율, 강수, 내한능력 및 유효토양수분량 등을 융·복합한 농업가뭄지도 작성에 활용하기 위하여 수립되었다.
- 단계별 기준은 1) 주의단계인 경우는 누적강수량 60~70%, 저수율 61~70% 및 토양 유효수분함량은 41~60%이며, 2) 심함단계는 누적강수량 50~60%, 저수율 51~60% 및 토양 유효수분함량은 31~40%이며, 3) 매우심함 단계는 누적강수량 50% 미만, 저수율 50% 이하 및 토양 유효수분함량은 30% 이하로 수립되어 운영 중이다.
- 그러나 현행 농업가뭄 단계별 기준을 적용하는 경우 관개시설이 충분한 벼농사에 필요한 관개용수 공급에는 문제가 없지만, 밭작물의 경우에는 1) 즉각적인 관수 필요, 2) 지표의 뿌리가 고사하고 심토의 뿌리가 활동함에 따른 깊은 관수 필요, 3) 물 공급량이 부족할 수 있으므로 관개효율이 높은 점적관개 실시, 4) 강수 시 지표유출을 최대한 방지하는 물 관리 기술 등을 적용하기 위한 지하수 공급이 필수적이다.
- 그러나 최근 농업환경 변화에 따른 논의 밭으로의 전환이 활발함에 따라, 과거부터 관행적으로 농업용수 수요시기 및 수요량이 변화하고 있다. 따라서 현재 중요한 인자인 저수율 기준에 지하수위 기준을 포함시킬 필요가 있다.
- 실제 사례로 (표 4-2)에서 제시된 기상관측소별 SPI와 저수지 저수율의 AP값과 (표 4-5)의 SPI와 지하수위의 AP값을 적용하면, 공주지역의 경우 저수율의 AP가 9개월인데 반해 지하수위의 AP는 1개월 나타났다. 이는 저수지 저수율은 9개월 기간의 농업가뭄이 발생하면 영향을 받는 반면 공주1 관측공은 1개월의 농업가뭄의 영향을 받지만 그 이후 지속되는 가뭄의 영향에도 일정한 지하수위를 유지함에 따라 공급능력이 충

분한 것으로 나타났다.

- 결과적으로 앞서 분석된 SPI와 저수율 및 표준지하수위지수(SGI)와 각각 상관분석를 이용한 누적기간(AP)을 활용하는 경우 두 가지 주요한 기준의 통합이 가능할 것으로 판단된다.





# Chapter 06

## 연구개발과정에서 수집한 해외 사례

6.1 | 미국 캘리포니아 주 사례

6.2 | 미국 텍사스 주 사례



## 6. 연구개발과정에서 수집한 해외 사례

- 지난 2010년대 초중반 태평양연안에 발생한 엘니뇨현상은 미국 서남부 지역(캘리포니아 주, 텍사스 주)에 극심가뭄을 유발하여, 하천 건천화, 저수지 고갈, 지하수 수위 저하 등을 초래하여 막대한 양의 용수부족 문제를 발생시켰다.
- 미국 서남부 지역의 대표적인 인구 밀집 주인 캘리포니아 주(약 3천9백만명, 인구증가율 11.9%)와 텍사스 주(약 2천7백만명, 인구증가율 24.4%)는 미국 전체 주 가운데 인구순위 1, 2위로서(2014년 현재), 높은 인구수에 비례하여 물수요량이 높다. 2010년을 기준으로 미국 연간 물이용량(4,895억  $m^3/year$ )의 약 1/5(캘리포니아 주 약 11%(525억  $m^3/year$ )과 텍사스 주 약 7%(343억  $m^3/year$ )을 각각 이용 중이다(USGS, 2014).
- 농어업용수 이용량은 캘리포니아 주와 텍사스 주가 각각 334억  $m^3/year$ 와 98억  $m^3/year$ 로서, 이는 전체 물이용량의 각각 64% 및 29%에 해당한다. 이 중 지하수는 캘리포니아 주 123억  $m^3/year$ , 텍사스 주 72억  $m^3/year$ 로서 전체 농어업용수 이용량의 각각 37% 및 73%에 해당하여, 상당량의 지하수를 농어업용수로 이용하고 있다(USGS, 2014).
- 또한 이들 두 개 주는 미국 내 최대 농업지역으로, 캘리포니아 주 중앙 협곡(Central Valley) 지역과 사우스 다코다 주로부터 텍사스 주까지 이어지는 고지대 평원(The High Plains) 지역은 2007년 현재 약 \$520억 규모의 농산물 생산이 이루어진 곳이다(Airhart, 2012).
- 농업부분에서 캘리포니아 주는 미국 내 50개 주 가운데 1위, 텍사스 주는 4위에 올라 있다(USDA, 2012). 그러나 이러한 지역에 발생한 가뭄은 2014년에 캘리포니아 주에서는 약 1,619  $km^2$ 의 농지를 경작 불가능한 상태로 만들었으며(www.drought.ca.gov), 텍사스 주 걸프 연안의 미곡 생산 농업인들은 2012~2014년동안 주정부로부터 수자원 공급을 받지 못하는 처지에 이르기까지 하였다(Walton, 2014).
- 이는 미국 식량 안보에 커다란 위협이 되었으며, 주정부 차원에서 지하수를 비롯한 수자원 관리에 좀 더 현명한 해결책을 마련하도록 하였다.
- 본 연구에는 캘리포니아 주와 텍사스 주의 지하수위 관측 프로그램과 지하수 관리정책을 분석하였으며, 지하수 정책에 대한 전반적인 내용은

각 주의 수자원국 웹사이트([www.water.ca.gov](http://www.water.ca.gov) 및 [www.twdb.texas.gov](http://www.twdb.texas.gov)) 및 DWR(2014, 2016)를 참고하였다.

## 6.1 미국 캘리포니아 주 사례

- 미국 캘리포니아 주에서는 가뭄극복의 일환으로 2014년 7월 『캘리포니아 지하수 수위 관측(CASGEM; California statewide groundwater elevation monitoring)』 프로그램을 시행하였다. 이 프로그램을 통해 캘리포니아 주 총 515개 충적층 지하수 분지 가운데 물 관리가 시급한 127개 분지를 지정하고, 지하수 수위 관측을 시행하였다.
- 이 후 2014년 9월 『지속가능한 지하수 관리법(SGMA; sustainable groundwater management act)』을 제정하여, 이들 127개 분지의 지역 지하수 관리기관으로 하여금 『지하수 지속가능성 계획(GSPs; groundwater sustainability plans)』 또는 이와 『유사한 계획(Alternatives)』을 수립하여 제출하도록 요구하였다(DWR, 2014).
- 지속가능한 지하수 관리란 만성적인 지하수위 하강으로 인한 지하수 고갈, 지하수 부존량 감소, 해수침투 발생, 지하수 수질 저하, 지반침하, 그리고 지하수와 수리적으로 연결된 하천수의 고갈 문제 등을 사전에 예방하며 지하수를 건전하고 지속가능하게 이용하는 것을 일컫는다.
- 그리고 2016년 5월 캘리포니아 주 수자원국(DWR; Department of water resources)은 『지하수 지속가능성 계획 비상 규정(GSP ERs; groundwater sustainability plan emergency regulations)』을 마련하여 분지별 지속가능한 지하수 계획 수립과 시행을 지원하고, 주민들에게 지속가능한 지하수 관리 법규를 상세히 알려 지하수자원의 소중함을 고취시키고자 하였다(DWR, 2016).

### 6.1.1 캘리포니아 지하수 수위 관측(CASGEM) 프로그램

- 캘리포니아 지하수 수위 관측(CASGEM) 프로그램에 의한 지하수 분지의 관리 우선순위는 아래 8개 인자를 고려하여 지정되었다. 각 분지별 면적이 서로 다르기 때문에, 1~6번 항목에 대해 표준화 작업이 시행되었고, 0~5점 범위로 점수가 부여되었다(표 6-1).

표 6-1. 우선순위 지정을 위한 1~6항목의 산입 방법(DWR, 2014)

부 여 점 수	각 항목 별 순위 구간						
	인구		공공 관정 개소수 (mile <sup>2</sup> )	전체 관정 개소수 (mile <sup>2</sup> )	관개 면적 (acre/ mile <sup>2</sup> )	지하수	
	인구밀도 (mile <sup>2</sup> )	인구 증가율* (%)				지하수 이용량 (acre-feet/ acre)	총용수 대비 지하수 이용 비율 **(%)
0	x<7	x<0	x=0	x=0	x<1	x<0.03	x<0.1
1	7 ≤ x < 250	0 ≤ x < 6	0 < x < 0.1	0 < x < 2	1 ≤ x < 25	0.03 ≤ x < 0.1	0.1 ≤ x < 20
2	250 ≤ x < 1,000	6 ≤ x < 15	0.1 ≤ x < 0.25	2 ≤ x < 5	25 ≤ x < 100	0.1 ≤ x < 0.25	20 ≤ x < 40
3	1,000 ≤ x < 2,500	15 ≤ x < 25	0.25 ≤ x < 0.5	5 ≤ x < 10	100 ≤ x < 200	0.25 ≤ x < 0.5	40 ≤ x < 60
4	2,500 ≤ x < 4,000	25 ≤ x < 40	0.5 ≤ x < 1.0	10 ≤ x < 20	200 ≤ x < 350	0.5 ≤ x < 0.75	60 ≤ x < 80
5	4,000 ≤ x	40 ≤ x	1.0 ≤ x	20 ≤ x	350 ≤ x	0.75 ≤ x	80 ≤ x

\* 2010년부터 2030년까지 예상 증가율

\*\* 총용수수요량(지하수, 하천수) 중 지하수의 비율

- 각 인자별 해당 수치가 클수록 높은 점수가 부여된다. 7~8번 항목은 수자원국 직원들의 분석을 통해 이루어지며, 각 분지별 해당사항이 있을 경우에만 1~6번 항목에 추가된다. 7번 항목은 1~5점 범위로 점수가 부여되며, 8번 항목은 음의 랭킹(negative ranking)으로 -5점까지 부여된다.
  - 분지 내 인구 수 : 2010년 캘리포니아 주 인구조사 자료
  - 인구 증가(예상)율 : 2010년부터 2040년까지 인구증가 예측 자료
  - 공공관정 개소수 : 먹는물 공급관정 데이터베이스 자료
  - 전체 관정 개소수 : 2012년 관정 자료
  - 농업용수 관개면적 : 최신 토지이용 자료 및 공청회 의견 반영
  - 지하수를 수자원으로 이용하는 비율 : 최신 토지이용 자료 및 공청회 의견 반영
  - 과잉 양수, 지반 침하, 해수 침투, 지하수 수질 저하 등 지하수 장애 요인 : 수자원국 직원들의 검토 자료
  - 기타 필요하다고 판단된 정보 : 수자원국 직원들의 검토 자료

- 8개 항목을 이용하여 각 분지에 대해 점수를 부여한 산출식은 아래 (식 6-1)과 같다. 이 중 전체 관정 개소수의 경우, 관정 개소수에 대한 불확실성 때문에 75%에 해당하는 점수를 부여했다. 분지 점수로 환산된 각 분지는 4개 관리 순위(높은 순위, 중간 순위, 낮은 순위, 매우낮은 순위)로 구분되며, 각 순위별 분지 점수의 범위는 (표 6-2)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{분지 점수} = & \text{인구밀도} + \text{인구증가율} + \text{공공관정 개소수} + \\ & (\text{전체 관정 개소수} \times 0.75) + \text{관개면적} + \\ & [(\text{지하수 이용량} + \text{지하수 이용비율})/2] + \text{장해요인} + \\ & \text{기타 자료} \qquad \qquad \qquad \text{----- (식 6-1)} \end{aligned}$$

표 6-2. 지하수 분지 우선순위 범주

매우낮은 우선순위	낮은 우선순위	중간 우선순위	높은 우선순위
$x < 5.75$	$5.75 \leq x < 13.42$	$13.42 \leq x < 21.08$	$21.08 \leq x$

- 2014년 5월에 발표된 결과에 따르면, 515개 분지 중 43개 분지가 높은 순위(high priority), 84개 분지가 중간 순위(medium priority), 27개 분지가 낮은 순위(low priority), 그리고 나머지 361개 분지가 매우 낮은 순위(very low priority)로 분류되었다<그림 6-1>.
- 43개 높은 순위 분지에서는 캘리포니아 주 전체 지하수 이용량의 약 69%를 이용 중이고, 전체 인구의 약 47%가 분지 내에 거주한다(표 6-3). 중간 순위 84개 지하수 분지에서는 캘리포니아 주 전체 지하수 이용량의 약 27%를 이용 중이고, 전체 인구의 약 41%가 거주한다. 결과적으로, 높은 순위(43개 분지)와 중간 순위(84개 분지)를 합친 127개 분지는 캘리포니아 주 전체 지하수 이용량의 96%를 이용하고 있고, 전체 인구의 약 88%가 거주하므로, 이들 분지에 대한 집중적인 관리를 통해 지하수 지속가능성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

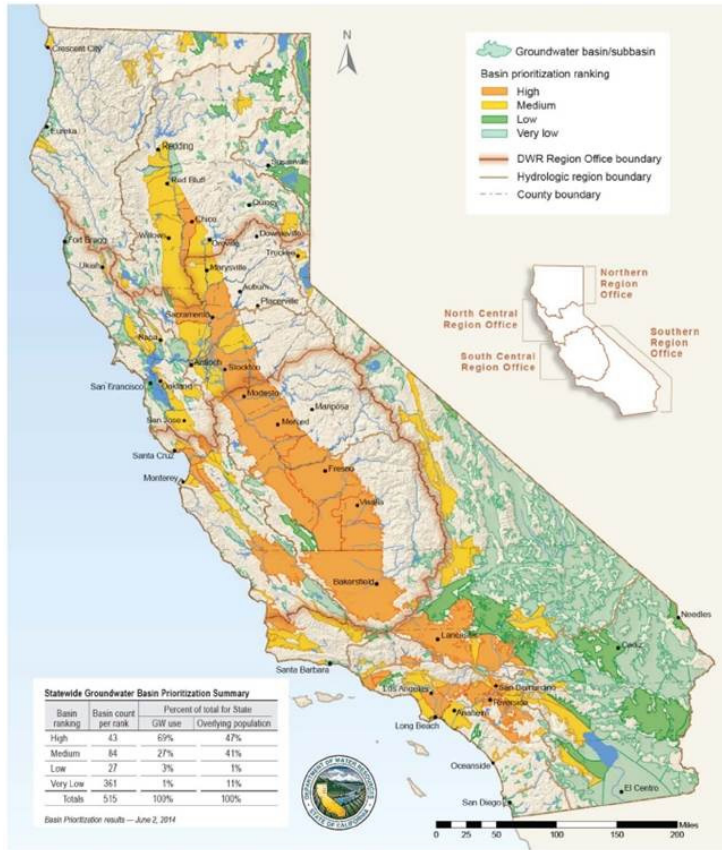


그림 6-1. 캘리포니아 주 지하수 분지 관리 우선순위 (www.water.ca.gov)

표 6-3. 캘리포니아 주 지하수 분지 관리 우선순위 산출 결과

구분	분지 갯수	비율(%)	
		지하수 이용량	인구 수
높은 순위	43	69	47
중간 순위	84	27	41
낮은 순위	27	3	1
매우낮은 순위	361	1	11
계	515	100	100

- 2014년 6월 기준으로 캘리포니아 주 지하수위 관측 프로그램(CASGEM)에 의하여 127개 분지(높은 순위 및 중간 순위) 중 76개(60%)분지에서 지하수 수위가 완벽하게 관측되고 있고, 14개(11%) 분지는 부분적으로 관측되고 있다. 나머지 37개(29%) 분지에 대해서는 지하수 수위가 미관측되고 있지만, 이 가운데 35개 분지에 대해서는 지역 지하수 관리기관들에 의해 관측 계획이 수립 중에 있다. 이 외, 낮은 순위(27개 분지) 및 매우 낮은 순위(361개 분지)에 대해서는, 분지별 지역 지하수 관리기관으로 하여금 꾸준한 지하수 수위 관측과 관리를 권고하는 수준이다.
- 지하수 분지 관리 우선순위는 상대적인 관리 중요성을 고려한 순위로 개발되었지만, 고순위 분지를 어떻게 관리하고 관측해야 하는지에 대한 방법은 특정하지 않는다. 지하수 분지 관리 우선순위 결과는, 상기한 8가지 인자(식 6-1)에 근거하여 캘리포니아 주 지하수의 전반적인 중요성을 평가하고, 향후 지하수 관리의 방향성을 제시한 것에 의의가 있다.

#### 6.1.2 지속가능한 지하수 관리법

- 2014년 9월 제정된 『지속가능한 지하수 관리법(SGMA)』은 앞서 언급된 127개 분지에 대하여, 각 분지별 지역 지하수 관리기관 또는 신규설립된 『지하수 지속가능성 기관(GSAs)』이 상시 지속가능한 지하수 관리를 실현하게끔 하는 데에 있다. 이에 따라, 127개 분지 중 지하수를 과잉양수 이용하는 분지는 2020년 1월 31일까지, 과잉양수 하지 않는 분지는 2022년 1월 31일까지 지하수 지속가능성 계획(GSPs)을 수립하고 운영하여야 한다.
- 지하수 지속가능성 기관(GSAs)에는 효율적인 시행을 위하여 재정적, 법적 집행권이 부여되고, 캘리포니아 수자원국(DWR)은 분지별 지하수 지속가능성 계획 수립, 시행 및 평가업무를 한다. 지속가능한 지하수 관리에 의지가 없거나 역량이 부족한 분지에 대해서는 캘리포니아 주 수자원 관리 위원회(SWRCB; state water resource control board)가 개입하여 임시계획을 수립하고 이를 강제할 수 있다.
- 127개 분지 이 외의, 지하수 지속가능성 계획이 요구되지 않는 388개 분지는 2016년 4월 1일부터 각 분지의 지하수에 대한 연차보고서를 캘리포니아 주 수자원국(DWR)에 제출하여야 한다.
- 2016년 5월 캘리포니아 주 수자원국(DWR)은 지역별 지하수 지속가능성



계획(GSPs) 및 유사계획을 평가하고, 시행을 감독하기 위해, 지하수 지속가능성 계획 비상 규정(GSP ERs)을 만들고, 이익단체들과의 다양한 사회적 합의를 거쳐서 이를 통과시켰다. 따라서 127개 각 지하수 분지의 지하수 지속가능성과 불확실성이 현재 서로 다를지라도(GSA-1 단계), 지속가능성 계획이 시행된 약 20년 후에는 최종적으로 모든 지하수 지속가능성 기관(GSAs)은 지하수 지속가능성을 확보(GSA-2 단계)해야만 한다<그림 6-2>.

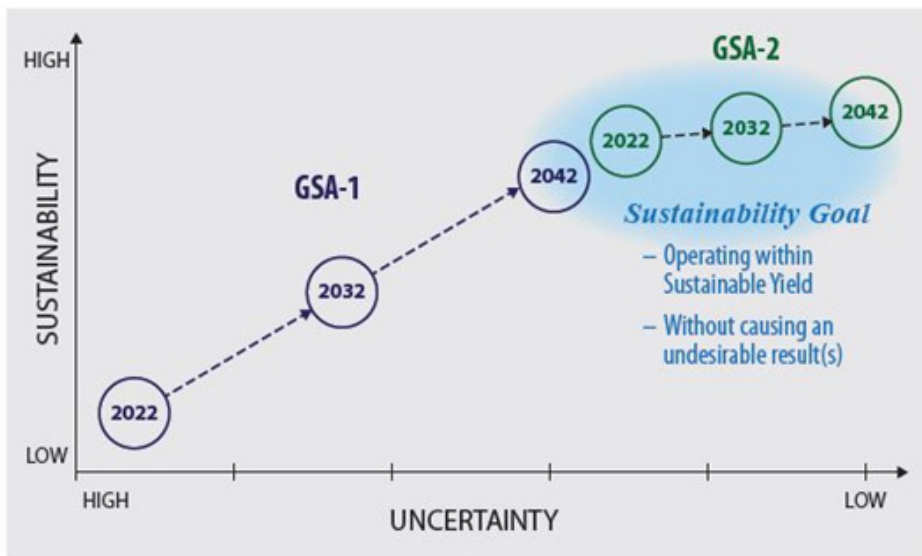


그림 6-2. 캘리포니아 주 지하수 분지별 연차별 지하수 지속가능성 목표 (DWR, 2016)

### 6.1.3 지하수 지속가능성 계획 비상 규정

- 지하수 지속가능성 계획 비상 규정(GSP ERs)에 의한 지하수 지속가능성 계획 수립 및 시행은 크게 4단계로 구분되어 진행된다<그림 6-3>.
- 1단계는 지하수 지속가능성 기관(GSAs) 설립 및 조합 단계로서, 우선 각 분지간의 경계를 보정하고, 지하수 지속가능성 기관(GSAs)을 설립하여 지하수 분지 관할권을 조정한다. 2단계는 지하수 지속가능성 계획(GSPs) 준비 및 제출 단계로서, 지하수 지속가능성 기관(GSAs)은 지하수 지속가능성 계획(GSPs)을 수립하고 적용성을 평가하여 캘리포니아

주 수자원국(DWR)에 제출한다. 3단계는 지하수 지속가능성 계획(GSPs) 검토 및 평가 단계로서, 수자원국(DWR)은 각 분지별 지하수 지속가능성 계획(GSPs)의 적합성을 검토하고 평가한다. 4단계는 시행 및 보고 단계로서, 분지별 지하수 지속가능성 기관(GSAs)은 연차보고서를 제출하고 매 5년마다 지역 지하수 지속가능성 계획(GSPs)에 대한 평가를 받는다.

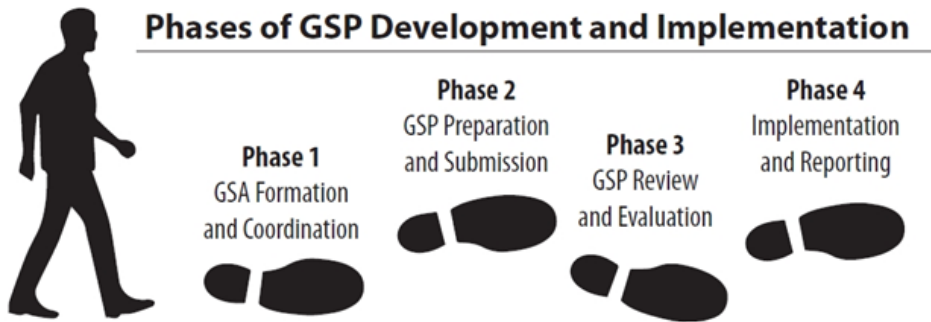


그림 6-3. 지하수 지속가능성 계획 수립 및 시행 단계(DWR, 2016)

가. 제1단계: 지하수 지속가능성 기관 설립 및 조합

- 2016년 3월 지하수 분지 간 경계 변경이 완료되었지만, 과학적인 관리를 위해 향후 변경 기간에 분지 간 경계 변경이 가능하며, 분지 간 이해관계가 생길 경우 이를 해결해야 한다. 또한 127개 분지는 2017년 6월 30일까지 지하수 지속가능성 기관(GSAs)을 설립하여야 한다.
- 수자원국(DWR)은 분지간 경계 변경을 승인하고, 지하수 지속가능성 기관(GSAs) 설립을 위한 추진비용으로서 미화 2백만USD를 분지별로 제공한다.
- 1개 지하수 분지 내 지하수 지속가능성 기관(GSAs)은 여러 개 설치될 수 있다. 다수의 지하수 지속가능성 기관(GSAs)이 1개 분지의 지하수를 관리하는 경우 대표 기관을 지정하여야 하고, 기관 간 조정 협정(Coordination Agreements)을 의무적으로 체결하여 다수의 지하수 지속가능성 계획이 해당 1개 분지의 지속가능성 목표를 어떠한 방식으로 달성할 수 있는지 지하수 지속가능성 계획(GSPs)에 기술해야 한다.
- 만약 인접한 2개 이상 분지의 지하수 지속가능성 기관(GSAs)들이 지속

가능성 목표를 조화롭게 달성하고자 한다면 자율적으로 분지간 협정 (Interbasin Agreements)을 체결할 수 있다. 분지간 협정은 분지간 지하수의 수리적 연결성이 있을 때 적용 가능하다.

나. 제2단계: 지하수 지속가능성 계획 수립 및 제출

- 지하수 지속가능성 계획(GSPs)을 과학적으로 수립하기 위해서는, 우선적으로 각 분지의 수리지질학적 특성 분석이 완료되어야 한다. 또한 지하수 지속가능성 계획(GSPs)에는 각 지하수 분지의 고유 지하수 관측망(계획)에 대한 상세한 기술이 포함되어야 하며, 지하수 장애의 원인을 알아낼 수 있는 지하수 관측 방법이 기재되어야 한다. 지하수 지속가능성 기관(GSAs)은 지하수 자료 관리 시스템을 구축하여야 한다.
- 지속가능성 계획 수립 시 가장 중요한 점은 지속가능한 관리 기준을 정하는 것이다<그림 6-4>. 향후 20년 간 분지 내에 어떠한 지하수 장애도 발생시키지 않는다는 가정 하에서, 지역 이해관계자(또는 기관) 간의 협의를 통해 지속가능성 목표가 결정되어야 한다.

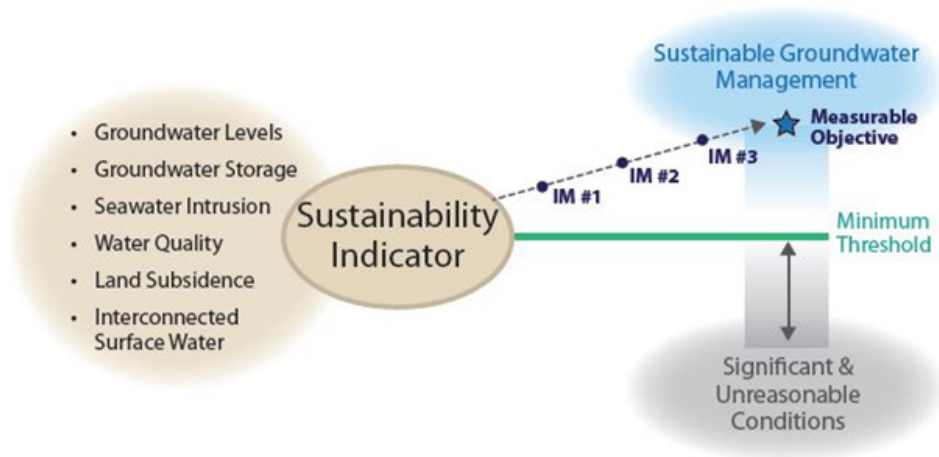


그림 6-4. 지하수 지속가능성 지시인자(DWR, 2016)

- 이를 위해 각각의 지속가능성 지시인자(지하수 수위, 부존량, 해수침투, 수질, 지반침하, 하천수-지하수 상호작용)에 대해 최소 문턱값이 설정되어, 각 지시인자별 매 5년마다 도달할 수 있는 임시 목표치(IM; interim

milestones)가 기재되어, 최종적으로 지속가능한 관리 기준(sustainable groundwater management criteria)에 도달하여야 한다.

- 매 5년마다의 임시 목표치는 수자원국의 검토를 거쳐야 한다. 지하수 지속가능성 기관들은, 분지 내 지하수 장애가 발생하였을 경우, 이것이 임시 목표치 달성에 얼마나 영향을 주며, 최소 문턱값을 얼마나 초과하는지, 그리고 지하수 장애가 일어났던 경과 등을 지하수 지속가능성 계획(GSPs)에 기술하여야 한다.
- 1개 분지 내에는 여러 개의 관리구역(MA; management areas)을 둘 수 있다. 각 관리구역마다 고유한 지하수 이용량, 지하수 수원, 지질, 대수층 특성 등에 근거하여 최소 문턱값, 측정목표치, 모니터링 또는 예측 및 관리 등이 다양할 수 있기 때문이다.
- 수자원국(DWR)은 제2단계의 지하수 지속가능성 계획(GSPs) 수립을 위해 지하수 지속가능성 기관(GSAs)에 대한 재정지원, 계획수립 및 예산 계획 수립을 위한 기술지원 등을 할 수 있다. 각 분지별 이익단체들은 수자원국(DWR)에 지하수 지속가능성 계획(GSPs) 초안이 접수된 후부터 의견을 제시할 수 있다.

다. 제3단계: 지하수 지속가능성 계획 검토 및 평가

- 수자원국(DWR)은 제출된 분지별 지하수 지속가능성 계획(GSPs)을 향후 20년 동안 검토 및 승인할 예정이며, 초안은 2년 이내에 평가할 예정이다.
- 제출된 지하수 지속가능성 계획(GSPs)에 대해서는 약 60일 동안 공청회 등을 통해 공공의견을 청취할 예정이다. 지하수 지속가능성 계획(GSPs) 검토 결과, 부적합으로 결정되거나, 지속가능한 지하수 관리법(SGMA)의 요구조항을 반영하지 않았거나, 부적절한 내용이 삽입되어 있을 경우, 캘리포니아 주 수자원 관리위원회(SWRCB)는 이에 개입하여 계획을 강제 조정할 수 있다.

라. 제4단계: 시행 및 보고

- 지하수 지속가능성 기관(GSAs)은 지하수 지속가능성 계획(GSPs)의 실천 내용이 담긴 연차보고서를 다음 해 4월 1일까지 수자원국(DWR)에 제출하여야 한다. 수자원국(DWR)은 연차보고서, 지하수 지속가능성 계획(GSPs)의 5년주기 개정본을 검토하고 평가할 예정이다.

- 연차보고서, 5년주기 개정본이 부적절할 경우, 캘리포니아 주 수자원 관리위원회(SWRCB)는 이에 개입할 수 있다.

## 6.2 미국 텍사스 주 사례

- 텍사스 주 지하수는 총 9개의 주대수층 및 21개 부대수층에서 공급된다. 이 중 서북부에 위치한 오갈라라(Ogallala) 주대수층에서 전체 지하수의 약 60%(68억  $m^3/year$ )를, 캐리조-윌콕슨(Carrizo-Wilcox) 및 걸프연안(Gulf coast) 주대수층에서 30%(34억  $m^3/year$ )를 공급하며, 이들을 제외한 나머지 대수층들로부터 10%(12억  $m^3/year$ )의 지하수가 공급되고 있다(RCGCD, 2014).
- 텍사스 주는 미국 내 주요 농산물 생산규모 1위를 자랑하는 만큼, 농업용 지하수의 이용 비율(73%)이 매우 크다. 그러나 미국 텍사스 주에서는 지난 2009년부터 2013년까지 발생한 장기가뭄으로 물 공급과 수요 사이에 불균형이 발생했고, 하천수와 지하수가 심각한 고갈 위기를 맞이하였다.
- 또한 도시화에 따른 인구증가(2014년 현재 인구증가율 24.4%)로 과거보다 더 많은 하천수를 전용하고, 더 많은 지하수를 양수하여 이용하였지만, 이러한 대응방안은 항구적인 해법이 될 수 없었다(Airhart, 2012). 아래 텍사스 주에서 가뭄대응 지하수 최적관리에 대한 몇 가지 노력에 대하여 분석하였다.

### 6.2.1 지역지하수 관리 방향

- 텍사스 주에서는 시·군 지자체별로 지하수 보전 구역(GCDs; groundwater conservation districts)이라는 기관을 자발적으로 창설하여 해당 구역의 지하수 개발, 공급, 보전 업무를 맡기고 있다(TWDB, 2004)<그림 6-5>.
- 각 보전 구역은 개인(법인)의 재산세, 시·군지자체 지원금, 지하수 이용 부담금 등의 예산으로 기관운영비를 충당하며, 지하수 양수량 제한, 관정 간격의 제한, 새로운 허가에 대한 규제, 포화대 두께 비율의 제한, 그리고 타 구역으로 이동하는 지하수의 허가 등에 대한 권리를 행사한다(Sahs, 2009).

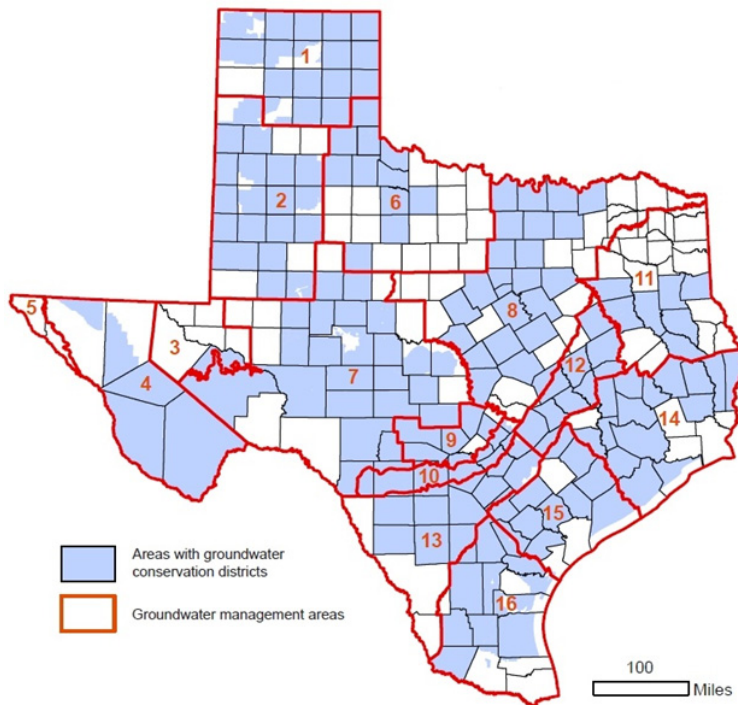


그림 6-5. 텍사스 주 지하수보전구역과 지하수관리지역

- 그러나 텍사스 주는 아직까지도 ‘절대 소유권’에 의거하여 지하수가 관리되고 있기 때문에, 지하수 수량 규제에 불복하는 관정 소유주의 소송이 발생하면 관정 소유주의 무제한 양수를 보호하는 방향으로 판결이 나오는 추세에 있다(Hardberger, 2013). 이 때문에 대수층 최적 관리를 위한 지하수 보전 구역의 법적 권리 행사가 제한되는 결과를 낳곤 한다.
- 대다수의 지하수 보전 구역은 대수층의 수문지질 경계에 맞추어 설립되어 있기보다는 시·군 경계를 따라 형성되어 있다. 결국 1개 대수층에 대하여 시·군 경계로 쪼개진 다수의 보전 구역들이 관리를 시행하는 과정에서, 여러 보전 구역들 사이에는 관리측면에서 수리지질학적 비연결성과 분쟁이 발생하게 된다(Dupnik, 2012).
- 따라서 지하수 관리를 광역화하기 위해 『지하수 관리 지역(GMAs; groundwater management areas)』이라는 기관이 수립되어 운영 중에 있다. 지하수 관리 지역의 목적은 전체 대수층 경계와 유사하게 관리 지역의 경계를 지정하여 해당 대수층의 지하수를 관리하는 데에 있다.

- 결과적으로 다수의 소규모 지하수 보전 구역을 하나로 묶어 관리하므로 효율성을 제고하고, 각 대수층의 수리지질 특성에 기반한 과학적인 대수층 환경관리가 가능하다. 2014년 현재, 텍사스 주에는 16개의 지하수 관리 구역과 101개의 지하수 보전 구역들이 설치되어 있지만, 일부 지하수 보전구역이 설치되지 않은 곳도 있다.

### 6.2.2 에드워드 대수층 관리국: 지하수 수위관리

- 에드워드 대수층 관리국(EAA; Edward Aquifer Authority)은 텍사스 중앙부에 위치하는 광역 물 관리 대행기관(regional water management agency)이다<그림 6-6>.

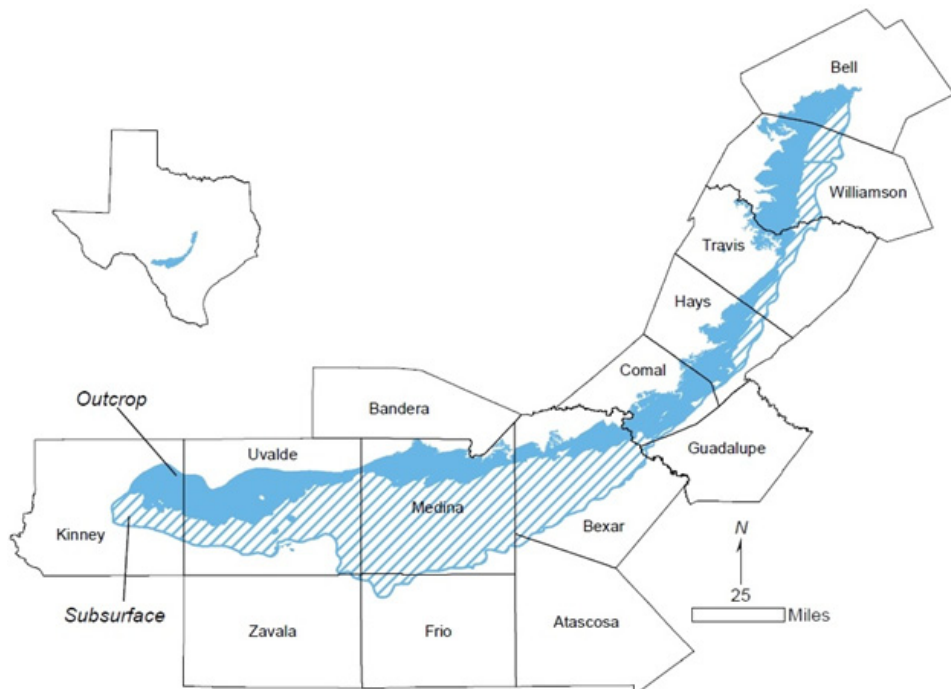


그림 6-6. 텍사스 주 에드워드 지하수 대수층(서쪽지역, Uvalde pool; 동쪽지역, San Antonio pool)(TWDB, 2011)

- 8개 시·군에 걸쳐있는 에드워드 대수층은 석회암 대수층으로, 약 2백만 명의 주민에게 지하수를 용수로 공급한다. 대수층으로부터 용출된 지하수는 지역 내 대규모 호수와 하천을 조성하며, 도롱뇽, 시어, 모기고기

등 멸종위기 동식물이 이들 호수와 하천에 서식한다. 따라서 에드워드 대수층의 청정한 관리는 멸종위기종 보호 및 수생태환경 보전과 직결된 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

- 에드워드 대수층 관리국은 멸종위기종을 보호하기 위한 고소고발의 결과로 1993년에 신설되었다(www.edwardsaquifer.org). 즉, 멸종위기종의 항구적인 서식처 마련을 위해서는 지속가능한 지하수의 용출과 이로 인한 적정한 하천수량 확보가 필요하였다.
- 이를 위하여 에드워드 대수층 관리구역 내 개인(법인) 관정에 제한된 갯수의 ‘지하수 이용 허가권’을 발부하고, 각 관정에 대하여 지하수 양수량을 제한하여, 지속가능한 대수층 관리를 도모하도록 하였다.
- 에드워드 대수층은 크게 샌안토니오 구역(San Antonio Pool)과 유발드 구역(Uvalde Pool)으로 구분된다. 지하수 수량 관리는, 상기한 두 개 구역별 대표 지하수 관측공의 수위 변화, 용천수 유출량(spring flow) 변화를 기준으로 한다. 지하수위 또는 용천수의 용출량이 멸종위기종 서식을 위한 기준치에 미달할 경우, 각 관정별 양수량을 의무적으로 줄여야 하는 요율(withdrawal reduction)을 지정하고 있다(표 6-4).

표 6-4. 텍사스 주 지하수 양수 제한 요율(www.edwardsaquifer.org)

구분	기준 <sup>1)</sup>	단계				
		I단계	II단계	III단계	IV단계	V단계
San Antonio 구역	J-17 관측공 수위 (msl <sup>2)</sup> )	<660	<650	<640	<630	<625
	San Marcos 용천수 유출량 (cfs <sup>3)</sup> )	<96	<80	n/a	n/a	n/a
	Comal 용천수 유출량 (cfs)	<225	<200	<150	<100	<45/40 <sup>4)</sup>
	양수량 제한요율	20%	30%	35%	40%	44%
Uvalde 구역	J-27 관측공 수위 (msl)	n/a	<850	<845	<842	<840
	양수량 제한요율	n/a	30%	35%	40%	44%

1) J-17 및 J-27 관측공에서는 10일 평균 지하수 수위변화를 기준으로 하고, 두 개의 용천(the Comal 및 San Marcos 용천)에서는 유출량의 변화를 기준으로 함

2) msl: 평균해수면 (feet)

3) cfs: 1초당 1세제곱 피트

4) <45/40: 10일간 이동평균이 45cfs 미만이거나, 3일간 이동평균이 40 cfs 미만일 경우



- 이처럼 생태계 보전을 위해 시작된 대수층 지하수 관리는, 지속가능한 지하수 이용을 위한 노력으로 이어졌으며, 결과적으로 에드워드 대수층의 최적 지하수 관리를 실현하는데 기여하고 있다.

### 6.2.3 물 시장: 가뭄 시 지하수 최적배치 전략

- 『물 시장(Water Markets)』은 제한적인 수자원을 물 판매자와 수요자 사이에 자발적으로 매매하여, 수자원을 가장 가치있게 사용할 수 있는 쪽으로 재배치하고 수자원 보전방안을 모색하는 제도로서(Ballem, 2014), 이미 오래된 제도이며 텍사스 주만의 새로운 제도는 아니다.
- 그러나 텍사스 주 중앙부에 위치한 『에드워드 대수층 관리국(EAA; Edward Aquifer Authority)』은 탄력적인 지하수 관리를 위해 이 제도를 유용한 도구로 사용해 왔으며, 물 판매자와 수요자 간의 자발적인 거래로, 필요한 곳에 물을 재배치함으로써 물수요에 대응하고, 지하수자원의 최적 분배를 실현코자 하였다. 그리고 좀더 높은 부가가치를 위해 지하수가 이용될 수 있도록 하여 경제성장을 지지할 수 있도록 추진하였다(Boadu et al., 2007).
- 물 시장 내에서 물 가격은 양자 간 협의에 의해 결정되고, 물을 가장 가치있게 사용할 수 있는 쪽으로 물의 이동을 도모한다. 간단한 예로, 1개 소유역에 농어민과 소도시가 있다고 가정하는 경우 도시화로 인해 급격히 인구가 늘어난 소도시에서, 갈수기 기간 동안 용수공급이 어려워지면, 그 기간 동안 농어민은 농작물을 재배하는데 소요되는 물의 양을 최소한으로 줄이고, 남은 잉여의 물을 주변 소도시에 판매한다.
- 이러한 판매로 농어민은 1년간 농작물을 수확해서 얻을 수 있는 금액보다 훨씬 큰 이익을 얻을 수도 있다. 이 후 물 공급이 원활해지면 농어민은 물 판매를 중지하고 농작물 재배를 위해 물을 평소대로 사용하며, 소도시 역시 평소 공급 수준으로 되돌아간다.
- 이처럼 물 시장을 통해 재배치된 수자원은 보다 더 경제적으로 이용되며, 물 부족 지역에서 수자원의 무분별한 개발을 방지할 수 있다. 아래 Ballem(2014)를 참고하여 미국 텍사스 주의 사례를 기술하고, 이를 국내에 도입하기 위해서는 어떠한 것들이 필요한지에 대해 설명하였다.

#### 가. 물 시장 도입을 위한 기준

- 물 시장 도입을 위해서는, 아래와 같은 4가지 기준이 지켜져야 한다 (AG-NWC, 2011).
- 첫째, 물은 교환가능한 재화로 취급되어야 한다. 둘째, 모든 물 판매자와 수요자는 물 가격 정보에 쉽게 접근할 수 있어야 한다. 셋째, 물 매매 관리시스템을 통해 물이 이동한 양을 정확하게 관측할 수 있어야 한다. 넷째, 물 시장 진입을 위해 행정적으로 소요되는 금액과 관로 등을 통해 물리적으로 물을 이동시키는 금액 등은 최소화되어야 한다.
- 물 시장에서 지하수의 이동은 비교적 간단하고 경제적으로 이루어진다. 동일한 대수층에 물 판매자와 수요자가 존재할 경우, 판매자는 수요자에게 판매수량만큼 지하수를 양수를 줄이고, 수요자는 그의 관정에서 구매수량만큼 지하수를 더 양수하면 지하수 이동을 위한 비용이 소요되지 않는다.
- 물 판매자와 구매자 사이에 물 권리의 이동은 다양한 방법으로 이루어지며, 물 권리는 일부 또는 전부가 이동될 수 있다(Griffin, 2011).
- 물 교환 방법은 크게 판매, 대여, 갈수연도 선택, 그리고 물 은행을 통한 거래로 구분할 수 있다. 물 판매란 물 권리의 항구적인 이양을 일컫는다. 물 대여란, 지정된 기간 동안 물 권리의 임시 이양을 일컫는다. 갈수연도 선택은 물 권리 판매자와 구매자 사이에 강수량이 부족한 연도에만 물을 이동시키는 것을 협약하고, 이 기간 동안에만 권리 이양이 발생하는 것을 일컫는다.
- 물 은행을 통한 거래란 공공기관에서 물을 우선 임차하고, 물을 필요로 하는 수요자에게 재배치하는 것을 일컫는다.
- 물 시장 활성화를 위해, 텍사스 수자원 개발 위원회(TWDB; Texas Water Development Board)는 텍사스 물 은행(Texas Water Bank)을 운영하고 있다. 텍사스 물 은행은 공공 데이터베이스를 기반으로 개인(법인) 간 물 권리 이동을 관리하도록 개발되었다. 즉, 온라인 거래망을 통해, 판매자들은 물의 양과 가격을 기재해 올리고, 수요자들은 각자의 여건에 따라 이를 구매한다. 그리고 텍사스 수자원 개발 위원회(TWDB)는 환경용수 확보를 위해 텍사스 물 신탁(Texas Water Trust)을 운영 중에 있다. 그러나 홍보의 부족으로 최근까지도 이들 시스템을 통한 물 권리 매매 건수는 많지 않은 편이다.

#### 나. 에드워드 대수층 관리국 물 시장

- 에드워드 대수층 관리국(EAA; Edward Aquifer Authority)은 텍사스 중앙부에 위치하는 지하수 관리기관이다. 에드워드 대수층 관리국(EAA)은 관리 구역 내 개인(법인)에게 농어업용수, 생활용수, 공업용수 및 환경용수를 공급한다.
- 판매 초기에는 농어업용수 공급이 주된 목적이었으나, 관리구역 내 샌안토니오(San Antonio) 시가 커짐에 따라 농어업용수에서 생활용수 공급으로 목적이 바뀌었다.
- 에드워드 대수층 관리국(EAA)은 관리구역 내 지하수 수량 관리를 위해, 각 지하수 이용자들에게 지하수 이용 허가증을 배부하고, 관정별로 지정된 양수량 만큼만 지하수를 이용할 수 있도록 하며, 기준 수위 이하로 지하수 수위가 하강할 경우 관정별 지하수 양수량을 강제적으로 줄일 수 있는 권한을 행사한다([www.edwardsquifer.org](http://www.edwardsquifer.org)).
- 에드워드 대수층 관리국(EAA)은 지하수 관리 권한을 기반으로 지하수 물 시장을 운영한다. 1998년에 물 시장이 개시된 후부터 2014년 11월까지 개인(법인)간 판매(이동)된 물 권리(지하수 양수 권리) 통계에 따르면 <그림 6-7>, 농어업용수로 이용되던 물 권리를 또 다른 농어업목적으로 거래되는 경우가 가장 많았고, 농어업용수를 생활용수로 거래하는 경우가 그 다음이었다. 초기 몇 년간은 물 시장 제도가 덜 알려져 권리의 이동이 적었지만, 가뭄이 들었던 2011년에는 물 권리 교환에 따른 이익이 최고조에 이르렀다<그림 6-8>.

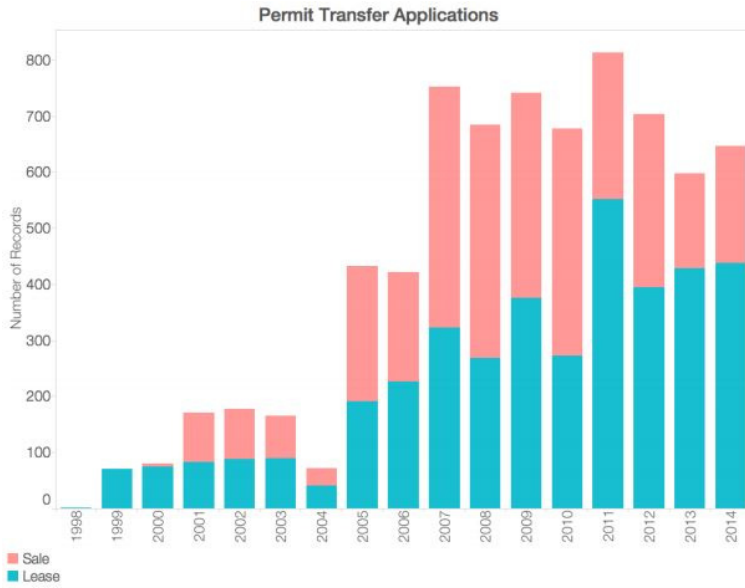


그림 6-7. 에드워드 대수층 관리국에 접수된 연차별 물권리 이동 통계(Ballew, 2014)

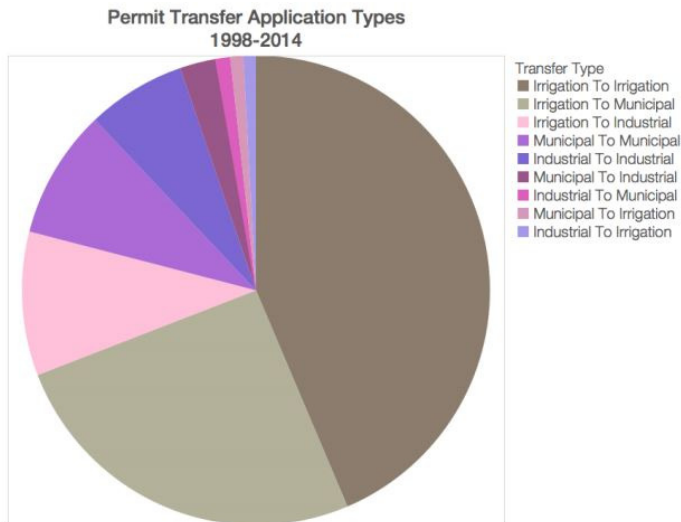


그림 6-8. 에드워드 대수층 관리국에 접수된 물권리 이동 형태(Ballew, 2014)

#### 다. 에드워드 대수층 관리국의 제도적 규제

- 이상적으로 운영되는 물 시장에서는 불이익을 받는 개인(법인)이 생길 수 없고, 모든 물 판매자와 수요자는 그 전보다 많은 이익을 얻는다. 그러나 어떠한 제도도 완벽할 수 없고, 제도의 허점을 비집고 들어오는 불편한 사례가 언제든지 생길 수 있다.
- 에드워드 대수층 관리국(EAA)은 이에 대응하기 위해 법령(the Edward Aquifer Authority Act)으로 개인(법인)의 물 권리를 보호해 왔다. 상세하게는, 오직 에드워드 대수층 관리국(EAA)만이 지하수를 관리하고 이용량을 제한할 수 있도록 했고, 개인(법인)은 물 권리 이동과 관련된 임차허가권을 에드워드 대수층 관리국(EAA)으로부터 받도록 하였다(Boadu et al., 2007).
- 그리고 농어촌 물 권리 보호를 위해, 농어업용수에서 생활용수로 물 권리의 이동은 법적으로 정해진 수량의 50%만 이동될 수 있도록 제한했다. 이는 대도시에 의한 농어촌지역 물권리의 무분별한 매입은 농어촌 물 복지 감소를 유발할 수 있고, 농어촌지역 물 권리를 매입하여 도시 지역에 판매하는 전문적인 물 판매 회사의 출현에 대한 우려 때문이다.
- 에드워드 대수층 관리국(EAA)에 의한 물 권리 이동제한은 완벽한 시장경제의 실현이 아니기 때문에, 물 권리 판매자는 해당 권리를 100% 행사하지 못하게 되어 물 매매에 의한 이익을 최대화 할 수 없는 단점도 있다.
- 또한 농업용수 사용자들간의 물 권리 이동은 복지 증진에 현저한 도움을 주지 않으며, 이는 지하수 최적관리가 실현되는 경우와 동일한 효과를 발생하는 것으로 분석된다. 그리고 농어업용수로 이용되던 물 권리를 생활용수로 이동하는 것은 물 가격이 높게 책정될 경우에 발생하는 것으로 분석된다(Kaiser and Phillips, 1998).



Chapter **07**  
결 론







## 7. 결론

- 본 연구는 관측공별로 실시간 지하수위 관측자료를 이용한 농업가뭄 평가 기술 개발을 목적으로 수행되었다. 연구 결과 기존의 농업가뭄 평가 정밀도 향상 및 가뭄대처 능력 제고 방안을 도출하였으며, 농업용 지하수 관정을 이용한 지하수위 변동 특성이 반영된 새로운 가뭄 예·경보 기준이 제시되었다.
- 이를 위하여 현재 가뭄지수로 사용되고 있는 표준강수지수(SPI)를 기반으로 표준지하수위지수(SGI)를 계산하여 적용하였으며, 각 관측공별로 장기간의 지하수위 시계열 자료를 분석하여 기존의 농업가뭄 예·경보 기준에 포함될 수 있는 방안을 정립하였다. 이때 SGI는 SPI와 지하수위와의 상관분석을 위한 표준화된 새로운 지수로, 지하수 가뭄의 특성화에 활용하기 위하여 기존의 강수량 시계열 자료를 이용한 표준화 지수인 SPI와 동일한 자료처리 과정으로 계산되었다.
- 시계열 자료 분석 방법은 평균과 표준편차가 각각 0과 1인 표준정규분포를 이용한 SPI 가뭄 기준을 토대로, 각 단계별 가뭄에 해당되는  $-1.0 \sim -1.5$ (moderate drought),  $-1.5 \sim -2.0$ (severe drought),  $-2.0$  이하(extreme drought)에 대한 정규분포(normal distribution) 값인 0.2420, 0.1295, 0.0540에 해당하는 백분위(percentile) 기준에 대한 지하수위 선정 기준을 적용하였다.
- 본 연구에서는 최소 4년 이상의 관측자료가 축적된 관측공을 대상으로 SGI를 분석하기 위하여, 행정구역별로 대표적인 관측공 1개씩을 선정하여 이용하였다. SGI 계산은 전체 관측기간 중 전국적으로 가뭄이 발생된 3년(2014~2016년) 기간 동안의 지하수위를 기준으로 매일 12시 기준의 지하수위를 정규분포로 전환하여 계산하는데, 이때 분석 기준은 SPI 정의에서 5개 단계의 구분을 적용하고 확률분포의 평균값과 표준편차를 각각 1과 0으로 설정하였다.
- SGI와 SPI의 AP 결정을 위하여 관측공별로 계산된 SGI와 1개월 단위로 계산된 SPI에 대한 상관분석을 실시하였는데, 상관분석 결과는 SGI와 1개월 단위의 SPI 사이의 상관계수 최대값을 갖는 개월을 관측공별로 누적기간으로 정하였으며, 이 기간이 해당 관측공에서 가뭄의 영향을 최

대로 나타나는 것으로 해석이 가능하다. 각 도별 관측공에 대한 상관분석 결과, AP는 주로 1~3개월이 주를 이루고 있지만 7~10개월까지 큰 값을 갖는 관측공도 일부 나타났다. 이러한 분석 결과는 장기적인 가뭄 상황에서 지표수자원(댐과 저수지)의 저수량은 지속적으로 감소하지만, 지하수 부존량은 크게 감소하지 않고 유지되는 것으로 판단할 수 있다. 분석 결과 도별 관측정의 평균 AP 최대치와 최소치는 충청북도와 강원도가 각각 4.1과 1.8로 나타났으며, 상관계수의 최대치와 최소치는 경상남도와 충청남도/전라남도가 각각 0.623과 0.530으로 분석되었다.

- 결과적으로 짧은 기간의 AP는 단기간의 가뭄에 반응하지만 이 기간 보다 긴 가뭄이 발생하는 경우에도 가뭄이 지하수계(groundwater system)에 미치는 영향이 거의 없다는 의미인 반면 상대적으로 장기간의 AP는 저수지와 같이 장기간의 가뭄에 영향을 받기 때문에 상대적으로 대수층의 지하수 보유 능력이 약한 것으로 해석될 수 있다.
- 가뭄 단계별 지하수위 저하 한계치는 앞서 제시한 바와 같이 관측공별 장기 시계열 자료에 대한 백분위 분석으로 결정하였는데, 이때 가뭄 단계는 SPI 분류에 의한 -2.0 이하, -1.5~-2.0, -1.0~-1.5에 대하여 각각 5.4% 이하, 12.95%, 24.20%로 구분하였다. 이번 분석에서 제시된 지하수위 저하 한계치는 2016년까지의 시계열 자료를 이용함에 따라, 자료 축적에 따라 지하수위 한계치는 지속적으로 바뀌게 된다. 따라서 농어촌 지하수넷(<https://www.groundwater-m.or.kr>)에 본 연구에서 제시된 분석 과정을 탑재하여 매년 update할 예정이다.
- 전국적인 가뭄에 의한 지하수위 변화량을 정량적으로 분석하기 위하여, 2014년 이후 농촌지하수관리 관측망 자료의 지역별 지하수위 변동 특성을 파악하였다. 이를 위하여 분석 기간 3년 전인 2011년 말까지 관측자료가 있는 총 74개소에 대한 최소 3년 월 평균 지하수위 대비 해당 월 평균 지하수위 차이를 분석하였다.
- 2014년의 전국적인 지하수의 변화는 예년 평균 대비 0.13 m 하강하였으며, 도별로는 경기도가 0.34 m로 가장 큰 하강 폭을 나타낸 반면 경상남도의 경우에는 0.16 m 상승한 것으로 나타났다. 2015년의 경우에는 예년 평균 대비 0.07 m 하강하였으며, 도별로는 경기도와 충청북도가 각각 0.30 m로 가장 큰 하강 폭을 나타낸 반면 경상남도의 경우에는 0.83 m 상승한 것으로 나타났다. 2016년은 예년 평균 대비 0.02 m 하강

하였으며, 도별로는 가뭄이 심각했었던 충청남도, 경상북도 및 경기도가 각각 0.53 m, 0.44 m 및 0.39 m로 큰 하강 폭을 나타낸 반면 전라북도, 전라남도 및 경상남도의 경우에는 각각 0.14 m, 0.04 m 및 1.52 m 상승한 것으로 분석되었다.

- 본 연구에서는 지하수 공급능력이라는 개념을 제시하였으며, 이는 지표수자원이 부족한 가뭄 시기에 일시적(3~4개월)으로 관정을 통해 공급할 수 있는 최대 취수가능량으로 정의하였다. 용수구역별 지하수 공급 능력은 관정의 갯수 및 배치, 관정의 허용 수위강하량, 대수층의 수리전도도, 지하수 함양량 및 하천과의 상호작용 등 다양한 요인에 의하여 결정되며, 이러한 모든 인자들이 반영된 지하수 흐름 모델의 개발을 통하여 평가할 수 있다.
- 본 연구에서는 지하수 모델링 기법을 이용하여 지하수 공급능력을 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 개발된 모델을 이용한 시뮬레이션 결과, 대수층의 지하수 공급능력은 관정의 허용 수위강하량, 관정의 갯수 및 배치 및 대수층의 수리특성에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났으며, 2015년과 같은 장기가뭄 시기에도 평년과 유사한 값을 가지는 것으로 확인되었다. 지하수 공급능력은 공급 필요기간이 길어질수록, 허용 수위강하량이 작을수록 점차 감소하였으며, 관정 이격거리가 작을수록 간접 효과에 의해 지하수 공급능력이 감소하였다.
- 지하수 공급능력을 가뭄 평가에 반영할 경우, 농업용 저수지의 저수율에 주로 의존하는 기존의 평가방법에 비해 보다 실질적인 농업가뭄 평가 결과를 제공할 수 있다. 본 연구에서 제시한 지하수 공급능력 평가 모델은 앞으로 표준화된 방법으로 널리 이용될 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 지하수 공급능력 평가방법을 기반으로 지표수-지하수 통합수자원 기반의 농업가뭄 평가방법을 개발한다면 현장의 수문학적 상황에 잘 부합하는 신뢰성 높은 가뭄평가가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.
- 최근 논의 발로의 전환 등 농업환경 변화에 수반된 농업용수 수요시기 및 수요량이 변화에 최적화된 농업가뭄 예·경보 기준의 개선을 위하여, 기존 농업가뭄 예·경보 기준의 저수율 기준에 지하수위 기준을 포함시킬 필요가 있다. 실제 사례로 기상관측소별 SPI와 저수지 저수율의 AP값과 SPI와 지하수위의 AP값을 적용하면, 공주지역의 경우 저수율의

AP가 9개월인데 반해 지하수위의 AP는 1개월 나타났다. 이는 저수지 저수율은 9개월 기간의 농업가뭄이 발생하면 영향을 받는 반면 공주1 관측공은 1개월의 농업가뭄의 영향을 받지만 그 이후 지속되는 가뭄의 영향에도 일정한 지하수위를 유지함에 따라 공급능력이 충분한 것으로 나타났다.

- 결과적으로 앞서 분석된 SPI와 저수율 및 SPI와 표준지하수위지수(SGI) 각각의 상관분석를 이용한 누적기간(AP)을 활용하는 경우, 두 가지 주요한 기준의 통합이 가능할 것으로 판단된다.

# 참 고 문 헌





## 참고문헌

- 구민호, 김태근, 김성수, 정성래, 강인옥, 이찬진, 김용철, 2013, 지하수위 변동법에 의한 함양량 산정: 하천-대수층 상호작용의 영향, 지하수 토양환경, 18(5), 65-76.
- 구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, 대한지질학회지, 38(3), 407-420.
- 국토교통부, 한국수자원공사, 2016, 지하수관측연보.
- 권형중, 김성준, 2007, 국가 지하수 관측망 자료를 이용한 가뭄평가 방법 연구, 대한토목학회논문집, 27(2B).
- 김규범, 윤한흠, 김대호, 2006, 표준강수지수와 지하수위의 상관성 평가 및 가뭄관측정 설치 방안 고찰, 한국지하수토양환경학회지, 11(3), 31-42.
- 김규범, 이소현, 2012, 지하수위 자료의 로지스틱 회귀 모형을 이용한 가뭄 예측 적용성 고찰, 지질학회지, 48(3), 275-284.
- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2016, 2016 농촌지하수관리 관측망 보고서.
- 송성호, 2015, 가뭄이 농업용 지하수 부존량 감소에 미치는 영향, 전원과 자원, 57(4), 25-30.
- 송성호, 이병선, 최광준, 김진성, 김기표, 2014, 지하수위 자료를 이용한 제주도 지하수계의 가뭄 영향 평가, 한국환경과학회지, 23(4), 637-647.
- 송성호, 이진용, 이명재, 2007, 변동유형 분석법을 이용한 해수침투 관측망 자료 평가, 한국지구과학회지, 28, 478-490.
- AG-NWC, 2011, Water markets in Australia: a short history, AG-NWC (Australian Government National Water Commission), 139 p.
- Airhart M., 2012, Groundwater depletion in semiarid regions of texas and california threatens U.S. food security, Retrieved from: <https://news.utexas.edu/2012/05/29/groundwater>.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, San Diego, CA, 381 p.
- Ballew, N., 2014, Water Marketing: designed for groundwater management in Texas, Retrieved from: <http://www.texaswaterpolicy.com>.

- Bhuiyan, C., Singh, R.P., and Kogan, F.N., 2006, Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data, *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 8, 289–302.
- Bloomfield, J.P., Marchant, B.P., 2103, Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4769–4787.
- Boadu, F.O., McCarl, B.M., and Gillig, D., 2007, An empirical investigation of institutional change in groundwater management in Texas: The Edwards Aquifer case, *Natural Resour. Jour.*, 47, 117-136.
- Bredehoeft, J.D., 1967, Response of well-aquifer systems to earth tides, *Journal of Geophysical Research*, 72(12), 3075-3087.
- Chen, Z, Grasby, S.E., and Osadetz, K.G, 2004, Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada, *J. Hydrol.*, 290, 43-62.
- Dupnik J.T., 2012, A Policy proposal for regional aquifer-scale management of groundwater in Texas, Master thesis, Univ. of Texas at Austin, 176 p.
- DWR, 2014, California groundwater elevation monitoring: Basin prioritization process, DWR (Department of water resource), State of California, 28 p.
- DWR, 2016, Sustainable groundwater management program: Groundwater sustainability plan (GSP) emergency regulations guide, DWR (Department of water resource), State of California, 21 p.
- Edwards, D. C. and McKee, T. B., 1997, Characteristics of 20th century drought in the United states at multiple time scales, Colorado State University, Climatology Report No. 97-2, Colorado.
- Fiorillo, F. and Guadagno, F. M., 2010, Karst spring discharge analysis in relation to drought periods, using SPI, *Water Resour. Manage.*, 24, 1864–1884.
- Fiorillo, F. and Guadagno, F. M., 2012, Long karst spring discharge time series and drought occurrence in Southern Italy, *Environ.l Earth Sci.*, 65, 2273–2283.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*. Prentice-Hall.



- Griffin, R.C., 2011, Water policy in Texas: Responding to the rise of scarcity, RFF press, Washington, D.C. 250 p.
- Hardberger A., 2013, Texas courts start to fill in the blanks on groundwater law, Retrieved from: <http://texaslivingwaters.org/texas-courts-start-fill-blanks-groundwater-law>.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., and Widhalm, M., 2011, The Lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 92, 485-488, doi:10.1175/2010BAMS3103.1.
- Kaiser, R.A. and Phillips, L.M., 1998, Dividing the waters: Water marketing as a conflict resolution in the Edwards aquifer region, *Natural Resour. Jour.*, 38, 411-444.
- Kumar, R., Musuuza, J.M., Van Loon, A.F., Teuling, A.J., Barthel, R, Broek, J.T., Mail, J., Samaniego, L., and Attinger, S., 2016, Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 1117-1136.
- Leelaruban, N., Padmanabhan, G., and Oduor, P., 2017, Examining the Relationship between Drought Indices and Groundwater Levels, *Water* 9, 82; doi:10.3390/w9020082.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., Portela, M. M., and Almeida, A. B., 2009, Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal, *Water Resour. Res.*, 45, W02405, doi:10.1029/2008WR007198.
- McEvoy, D. J., Huntington, J. L., Abatzoglou, J. T., and Edwards, L. M., 2012, An evaluation of multiscalar drought indices in Nevada and eastern California, *Earth Interact.*, 16, 1-8, doi:10.1175/2012EI000447.1.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Leist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration time scales, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California, 179-184.
- Mishra, A. K. and Singh, V. P., 2010, A review of drought concepts, *J. Hydrol.*, 391, 202-216.

- Palmer, W. C., 1965, Meteorologic drought, Research paper No. 45, US Department of Commerce, Weather Bureau, [www.isws.uiuc.edu/pubdoc/C/ISWSC-169.pdf](http://www.isws.uiuc.edu/pubdoc/C/ISWSC-169.pdf), last access: December 2013, 58 pp.
- Park, C., Lee, J., and Koo, M., 2013, Development of a fully-distributed daily hydrologic feedback model addressing vegetation, land cover, and soil water dynamics (VELAS). *Journal of Hydrology*, 493, 43-56.
- Prickett, T.A., 1967, Designing pumped well characteristics into electrical analog models, *Ground Water*, 5(4), 38-46.
- RCGCD, 2014, Where does our water come from and where is it used?, RCGCD (Rusk County Groundwater Conservation District), Retrieved from: <http://rcgcd.org/question3.html>.
- Sahs, M.K., 2009, Essentials of Texas water resources, State bar of Texas, 757 p.
- Sheffield, J. and Wood, E. F., 2008, Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation – driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle, *J. Climate*, 21, 432–458.
- Sheffield, J., Andreadis, K. M., Wood, E. F., and Lettenmaier, D. P., 2009, Global and continental drought in the second half of the 20th century: severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events, *J. Climate*, 22, 1962–1981, doi:10.1175/2008JCLI2722.1.
- Shulka, S. and Wood, A. W., 2008, Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02405, doi:10.1029/2007GL032487.
- Song, S.H., Zemansky, G., 2012, Vulnerability of groundwater systems with sea level rise in coastal aquifers, South Korea, *Environmental Earth Sciences*, 65(6), 1865-1876.
- Thiem, G., 1906, *Hydrologische Methoden*, J. M. Gebhardt, Leipzig.
- Todd, D.K., 1980, *Groundwater hydrology*, second edition. John Wiley & Sons Inc.
- TWDB, 2004, 100 Years of rule of capture: From east to groundwater management, TWDB (Texas water development board), 189 p.

- TWDB, 2011, Aquifers of Texas, TWDB (Texas water development board), 172 p.
- USDA, 2012, Which are the top 10 agricultural producing states?, USDA (United States Department of Agriculture), Retrieved from: <https://www.ers.usda.gov/faqs.aspx#Q1>.
- USGS, 2014, Estimated use of water in the United States in 2010, USGS (U.S. Geological Survey), 56 p.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M., and Baillon, M., 2010, Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 459–478, doi:10.5194/hess-14-459-2010.
- Vincente-Serrano, S. M. and López-Moreno, J. I., 2005, Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 523–533, doi:10.5194/hess-9-523-2005.
- Vincente-Serrano, S. M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J. I., 2010, A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index, *J. Climate*, 23, 1696–1718.
- Walton B., 2014, California, Texas, and the southwestern U.S. face a critical year for water supplies: 2014 preview, Part I, Retrieved from: <http://www.circleofblue.org/2014/world/2014-preview-california-texas-south-west-face-critical-year-water-supplies>.
- WMO, 2012, Standardized Precipitation Index User Guide, edited by: Svoboda, M., Hayes, M., and Wood, D. A., published by WMO, Geneva, Switzerland.



## 부 록

- 1 | 수질성적서(관측공별 지하수 1점 및 인근 하천수 2점)
- 2 | 토성 및 토양입도분석(관측공별 각 5개 심도별 토양시료)





문서번호 제R17110889호      제 목 수질검사성적서 교부  
시행일자 2017년 11월 29일      발 원 경기도 안산시 상록구 해안로 870 (사동, 농업기반공사농어촌연구원), 한국농어촌공사 농어촌연구원 귀하  
발 신 한울생명과학(주)      15834  
담당자 민기

**수질검사 성적서**

검 체 명	농업용수	검사목적	참고용	검 수 일	2017년 11월 22일
의뢰인	한국농어촌공사 농어촌연구원	채수.병인	최정숙	소 속	한울생명과학
채수장소	광주1 지하수			원수/경수	원수

먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제83조제2항의 규정에 의하여 다음과 같이 먹는물 수질검사성적서를 교부합니다.

수질검사결과

NO	검사항목명	검사기준	검사결과	NO	검사항목명	검사기준	검사결과
1	수소이온농도	6.0-8.5	6.0	8	유기인	0.005mg/L 이하	불검출
2	질산성질소	20mg/L이하	2.7	9	피놀	0.005mg/L이하	불검출
3	염소이온	250mg/L이하	66.7	10	납	0.1mg/L이하	불검출
4	카드뮴	0.01mg/L이하	불검출	11	8가크롬	0.05mg/L이하	불검출
5	비소	0.05mg/L이하	불검출	12	트렌클로로에틸렌	0.05mg/L이하	불검출
6	시안	0.01mg/L이하	불검출	13	펜트라클로로에틸렌	0.01mg/L이하	불검출
7	수은	0.001mg/L 이하	불검출	14	1,1,1-트렌클로로에탄	0.3mg/L이하	불검출
관 정		적합					
수질기준초과항목							



본 성적서는 검사목적 이외의 용도(광고, 홍보용)로 사용할 수 없습니다.

2017년 11월 29일

한울생명과학(주)









문서번호 제R17110891호      제 목 수질검사성적서 교부  
 시행일자 2017년 11월 29일      발 용 경기도 안산시 상록구 해안로 870 (사동,  
 발 신 한울생명과학(주)      농업기반공사농어촌연구원)  
 담당자 민기      한국농어촌공사 농어촌연구원 귀하 15634

**수질검사 성적서**

검 체 명	농업용수	검사목적	참고용	검수일	2017년 11월 22일
의뢰인	한국농어촌공사 농어촌연구원	채수·봉인	최현숙	소 속	한울생명과학
채수장소	공주1 B			원수/경수	원수

먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제8조제2항의 규정에 의하여 다음과 같이 먹는물 수질검사성적서를 교부합니다.

수질검사결과

NO	검사항목명	검사기준	검사결과	NO	검사항목명	검사기준	검사결과
1	수소이온농도	6.0-8.5	7.8	8	유기인	0.005mg/L 이하	불검출
2	질산성질소	20mg/L이하	8.8	9	포화	0.005mg/L이하	불검출
3	염소이온	250mg/L이하	27.1	10	납	0.1mg/L이하	불검출
4	카드뮴	0.01mg/L이하	불검출	11	8가크롬	0.05mg/L이하	불검출
6	비소	0.05mg/L이하	불검출	12	트리아트로프에틸렌	0.01mg/L이하	불검출
8	시안	0.01mg/L이하	불검출	10	테트라클로로에틸렌	0.01mg/L이하	불검출
7	수은	0.001mg/L 이하	불검출	14	1,1,1-트리클로로에탄	0.2mg/L이하	불검출

판 정	적합
수질기준초과항목	



본 성적서는 검사목적 이외의 용도(광고, 홍보용)로 사용할 수 없습니다.

2017년 11월 29일

한울생명과학(주)











# 한울생명과학(주)

환경부 환경부적합환경 지정 제1호 / 먹는물 수질검사기관  
 국립농산물품질관리원 지정 제5호 / 검정기관  
 99-306-900 대전광역시 유성구 대덕로 2번 167 미켄테크노빌드 2차 511호  
 TEL 042-826-4033 FAX 042-826-4035



문서번호 제R17110895호      제 목 수질검사성적서 교부  
 시행일자 2017년 11월 29일      발 용 경기도 안산시 상록구 행안로 870 (사동,  
 발 신 한울생명과학(주)      농업기반공사농어촌연구원)  
 담당자 민기      한국농어촌공사 농어촌연구원 귀하      15634

## 수질검사 성적서

검 체 명	농업용수	검사목적	참고용	검수일	2017년 11월 22일
의뢰인	한국농어촌공사 농어촌연구원	채수·병인	최현숙	소 속	한울생명과학
채수장소	충양1 지하수			원수/경수	원수

먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제8조제2항의 규정에 의하여 다음과 같이 먹는물 수질검사성적서를 교부합니다.

수질검사결과

NO	검사항목명	검사기준	검사결과	NO	검사항목명	검사기준	검사결과
1	수소이온농도	8.0-8.5	7.7	5	유기인	0.0005mg/L 이하	불검출
2	질산성질소	20mg/L이하	2.0	8	피놀	0.005mg/L이하	불검출
3	염소이온	250mg/L이하	16.5	9	납	0.1mg/L이하	불검출
4	카드뮴	0.01mg/L이하	불검출	11	B가크롬	0.05mg/L이하	불검출
6	비소	0.05mg/L이하	불검출	12	트리아클로로에틸렌	0.03mg/L이하	불검출
8	시안	0.01mg/L이하	불검출	13	테트라클로로에틸렌	0.01mg/L이하	불검출
7	수은	0.001mg/L 이하	불검출	14	1,1,1-트리아클로로에탄	0.3mg/L이하	불검출
판 정		적합					
수질기준초과항목							



본 성적서는 검사목적 이외의 용도(광고, 홍보용)로 사용할 수 없습니다.

2017년 11월 29일

한울생명과학(주)





# 한울생명과학(주)

환경부 환경부의원환경 지정 제1호 / 먹는물 수질검사기관  
 국립농산물품질관리원 지정 제5호 / 검정기관  
 470306-500 대전광역시 유성구 대저노 2로 167 미전테크노빌드 2차 511호  
 TEL 042-826-4033 FAX 042-826-4035



문서번호 제R17110896호      제 목 수질검사성적서 교부  
 시행일자 2017년 11월 29일      발 용 경기도 안산시 상록구 현안로 870 (사동,  
 발 신 한울생명과학(주)      농업기반공사농어촌연구원  
 담당자 민기      한국농어촌공사 농어촌연구원 귀하 15834

## 수질검사 성적서

검 체 명	농업용수	검사목적	참고용	검수일	2017년 11월 22일
의뢰인	한국농어촌공사 농어촌연구원	재수.봉인	최현숙	소 속	한울생명과학
재수장소	충양1 A	원수/경수	원수		

먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제8조제2항의 규정에 의하여 다음과 같이 먹는물 수질검사성적서를 교부합니다.

### □ 수질검사결과

NO	검사항목명	검사기준	검사결과	NO	검사항목명	검사기준	검사결과
1	수소이온농도	6.0-8.5	7.6	8	유기인	0.005mg/L 이하	불검출
2	질산성질소	20mg/L이하	6.0	9	피놀	0.005mg/L이하	불검출
3	염소이온	250mg/L이하	21.6	10	납	0.1mg/L이하	불검출
4	카드뮴	0.01mg/L이하	불검출	11	8가크롬	0.05mg/L이하	불검출
5	비소	0.05mg/L이하	불검출	12	트리아클로로에틸렌	0.03mg/L이하	불검출
6	시아나이드	0.01mg/L이하	불검출	13	테트라클로로에틸렌	0.01mg/L이하	불검출
7	수은	0.001mg/L 이하	불검출	14	1,1,1-트리아클로로에탄	0.3mg/L이하	불검출

판 정	적합
수질기준초과항목	



본 성적서는 검사목적 이외의 용도(광고, 홍보용)로 사용할 수 없습니다.

2017년 11월 29일

한울생명과학(주)





문서번호 제R17110897호      제 목 수질검사성적서 교부  
 시행일자 2017년 11월 29일      발 출 경기도 안산시 상록구 해안로 870 (사동,  
 발 신 한울생명과학(주)      농업기반공사농어촌연구원)  
 담당자 딘기      한국농어촌공사 농어촌연구원 귀하  
 15634

**수질검사 성적서**

검 체 명	농업용수	검사목적	참고용	검수일	2017년 11월 22일
의뢰인	한국농어촌공사 농어촌연구원	채수·보인	최현숙	소 속	한울생명과학
채수장소	중앙1 B			원수/경수	원수

먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제8조제2항의 규정에 의하여 다음과 같이 먹는물 수질검사성적서를 교부합니다.

수질검사결과

NO	검사항목명	검사기준	검사결과	NO	검사항목명	검사기준	검사결과
1	수소이온농도	6.0-8.6	7.7	8	유기인	0.0005mg/L 이하	불검출
2	질산성질소	20mg/L이하	0.0	9	피놀	0.005mg/L이하	불검출
3	염소이온	260mg/L이하	21.6	10	납	0.1mg/L이하	불검출
4	카드뮴	0.01mg/L이하	불검출	11	8가크롬	0.05mg/L이하	불검출
5	비소	0.05mg/L이하	불검출	12	트리아클로로에틸렌	0.08mg/L이하	불검출
6	시안	0.01mg/L이하	불검출	13	테트라클로로에틸렌	0.01mg/L이하	불검출
7	수은	0.001mg/L 이하	불검출	14	1,1,1-트리아클로로에탄	0.3mg/L이하	불검출
판 정		적합					
수질기준초과항목							



본 성적서는 검사목적 이외의 용도(광고, 홍보용)로 사용할 수 없습니다.

2017년 11월 29일

한울생명과학(주)





# 시험성적서

발급번호 : 2017-RA-1263

<b>1. 신청인</b>			
① 기관명	한국농어촌공사 농어촌연구원	② 대표/신청인	장중석/이병현
③ 주소	경기도 안산시 상록구 해안로 870		
④ 전화	031-400-1858	⑤ 팩스	-
<b>2. 의뢰내용</b>			
① 접수 번호	2017-A-1241	② 접수 날짜	2017-11-22
③ 시료 종류	지함시료(로양 5점)		
④ 시험 기간	2017-11-22 ~ 2017-12-05	⑤ 성적서용도	참고용

## 시험 결과 (붙임참조)

이 성적서는 의뢰자와 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 금하여  
선언, 소송 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

접도자 : 천일권연구원 최현일

(인)

승인자 : 권리장 이근덕

(인)

농생명과학공동기기원 분석시험위탁규정에 의하여 분석 시험한 결과를  
위와 같이 통지합니다.

2017년 12월 08일



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원  
National Instrumentation Center for Environmental Management



(주) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

<http://nicem.snu.ac.kr/>





시험항목 : 토성(Soil texture)

시료명	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Soil Texture
청양 30cm	63.80	29.36	16.84	Sandy loam
청양 60cm	69.66	19.36	11.08	Sandy loam
청양 70cm	66.16	21.92	11.92	Sandy loam
청양 90cm	69.44	18.36	12.20	Sandy loam
청양 110cm	80.84	10.04	9.12	Loamy sand



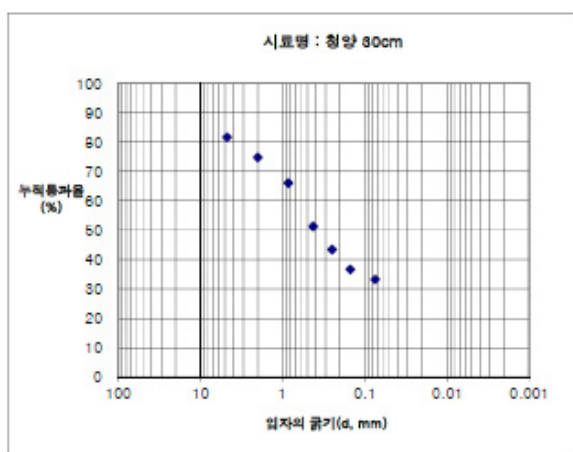
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for Environmental Management



(주) 181-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967-8 Fax) 888-4953

시료번호	칭양 30cm						
	체질호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	박분율(%)
4	4.75	487.00	642.35	65.35	65.35	18.45	81.55
10	2	472.93	493.31	20.38	75.73	25.24	74.76
20	0.85	386.21	412.55	26.34	102.07	34.02	65.98
40	0.425	346.95	390.99	44.04	146.11	48.69	61.31
60	0.25	348.51	372.17	23.66	169.77	56.68	43.42
100	0.15	339.56	359.84	20.28	190.05	63.34	36.66
200	0.075	324.28	334.63	10.35	200.40	66.79	33.21
residual	-	287.12	386.78	99.66	300.06	100	0.00

\* 분석방법 : Methods of Soil Analysis



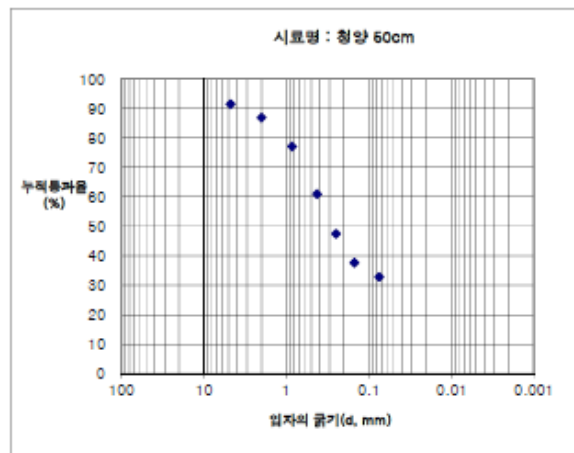
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



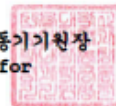
(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

칭양 60cm							
시료명							
체번호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	489.38	613.69	24.31	24.31	8.64	91.36
10	2	478.08	491.09	13.01	37.32	13.26	86.74
20	0.85	387.06	414.66	27.61	64.83	23.03	76.97
40	0.425	363.12	398.26	45.13	109.96	39.06	60.94
60	0.25	368.77	396.77	38.00	147.96	62.66	47.44
100	0.15	339.46	367.26	27.79	176.76	62.43	37.67
200	0.075	321.94	336.33	13.39	189.14	67.19	32.81
residual	-	287.12	379.60	92.38	281.62	100	0.00

\* 분석방법 : Methods of Soil Analysis



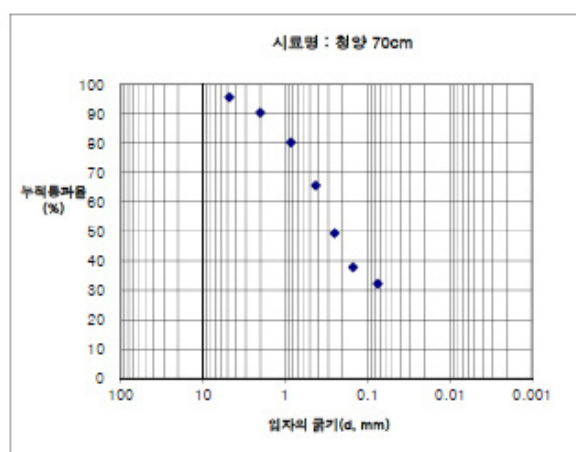
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



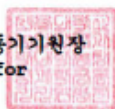
(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

시료명	칭양 70cm						
체질호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	486.96	497.31	11.36	11.36	4.60	95.60
10	2	479.11	492.28	13.17	24.63	9.72	90.28
20	0.85	388.22	413.77	25.55	60.08	19.85	80.15
40	0.425	362.68	389.37	36.79	86.87	34.44	65.66
60	0.25	362.67	393.64	40.87	127.74	60.64	49.36
100	0.15	341.16	370.36	29.20	166.94	62.22	37.78
200	0.075	322.83	336.86	14.02	170.96	67.78	32.22
residual	-	287.12	368.40	81.28	262.24	100	0.00

\* 분석방법 : Methods of Soil Analysis



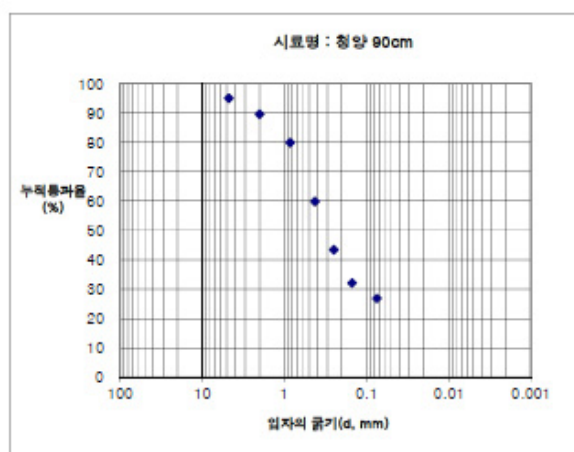
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

시료명	청양 90cm						
	체질호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)
4	4.75	487.37	602.43	15.06	15.06	6.07	94.93
10	2	477.78	493.96	16.17	31.23	10.62	89.48
20	0.85	390.27	418.96	28.69	69.92	20.18	79.82
40	0.425	361.28	410.70	69.42	119.34	40.18	69.82
60	0.25	364.69	403.47	48.78	168.12	66.61	43.39
100	0.15	341.66	376.16	33.49	201.61	67.88	32.12
200	0.075	326.11	341.66	15.54	217.16	73.12	26.88
residual	-	287.12	366.96	79.84	296.99	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



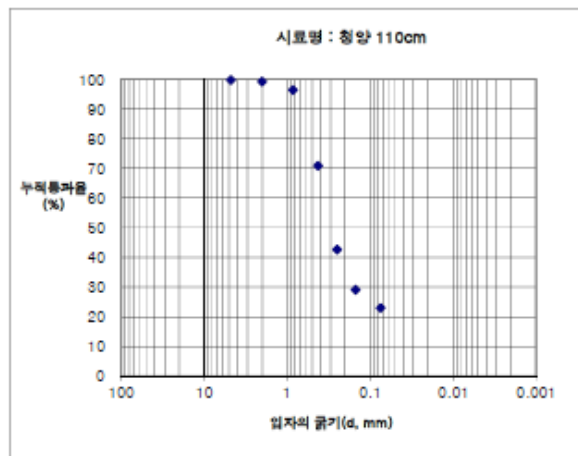
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

시료명 : 청양 110cm							
체번호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	489.41	490.27	0.86	0.86	0.28	99.72
10	2	473.60	476.31	1.81	2.67	0.87	99.13
20	0.85	386.86	395.36	8.50	11.17	3.66	96.34
40	0.425	364.62	432.62	77.90	89.07	29.16	70.86
60	0.25	351.64	437.96	86.32	175.39	67.39	42.61
100	0.15	340.80	382.01	41.21	216.60	70.88	29.12
200	0.075	326.84	344.68	18.74	235.34	77.01	22.99
residual	-	287.12	367.38	70.26	305.60	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963



# 시험성적서

발급번호 : 2017-RA-1264

## 1. 신청인

① 기관명	한국농어촌공사 농어촌연구원	② 대표/신청인	장금석/이병선
③ 주소	경기도 안산시 상록구 해안로 870	④ 전화	031-400-1856
⑤ 팩스	-		

## 2. 의뢰내용

① 접수 번호	2017-A-1244	② 접수 날짜	2017-11-24
③ 시료 종류	지함시료(모양 5점)	④ 시험 기간	2017-11-24 ~ 2017-12-05
⑤ 시험서종도	참고용		

## 시험결과 (붙임참조)

이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 금하여  
선전, 소송 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

검토자 : 천인연연구원 최현일

(인)

승인자 : 센터장 이근택

(인)

농생명과학공동기기원 분석시험위탁규정에 의하여 분석 시험한 결과물  
위와 같이 통지합니다.

2017년 12월 08일



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 860-4967~8 Fax) 868-4963

<http://nicem.gnu.ac.kr/>





시험항목 : 토성(Soil texture)

시료명	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Soil Texture
공주 30cm	33.16	66.66	11.28	Silt loam
공주 60cm	24.36	60.60	16.04	Silt loam
공주 70cm	22.44	63.84	13.72	Silt loam
공주 90cm	13.88	68.66	17.66	Silt loam
공주 110cm	67.60	33.16	9.24	Sandy loam



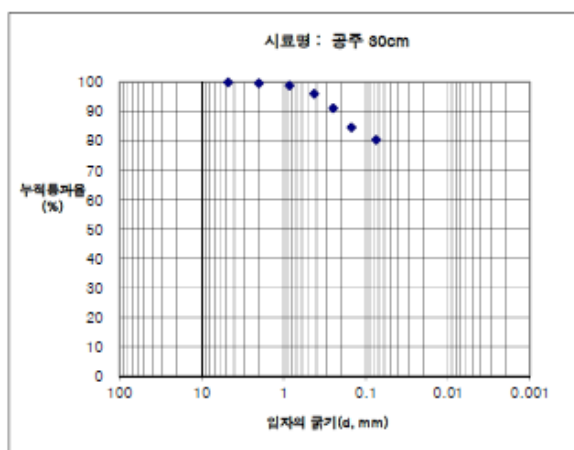
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for Environmental Management



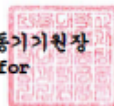
(주) 181-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4067-8 Fax) 888-4065

공주 30cm								
시료번호	체분호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	박분율(%)	누적분과박분율(%)
4	4.76	487.00	487.29	0.29	0.29	0.13	99.87	
10	2	472.93	473.60	0.67	0.96	0.42	99.68	
20	0.86	386.21	387.99	1.78	2.74	1.19	98.81	
40	0.426	346.96	363.32	6.37	9.11	3.97	96.03	
60	0.26	348.61	369.81	11.30	20.41	8.90	91.10	
100	0.16	339.66	364.66	16.10	36.51	16.49	84.61	
200	0.076	324.28	333.91	9.63	46.14	19.69	80.31	
residual	-	287.12	471.29	184.17	229.31	100	0.00	

• 분석방법 : Methods of Soil Analysis



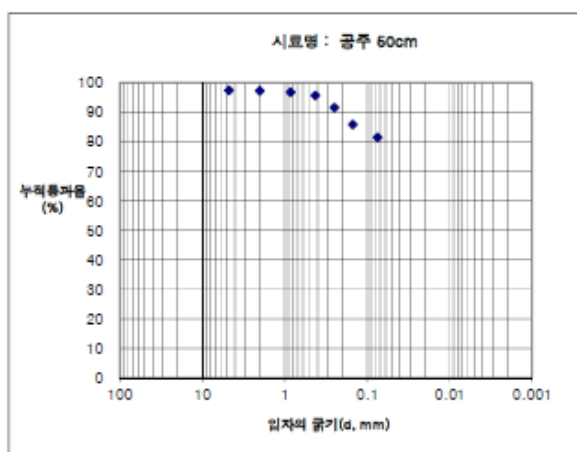
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



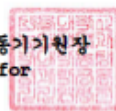
(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

공주 50cm							
시료명							
체질호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	박분율(%)	누적분과박분율(%)
4	4.76	489.38	496.49	6.11	6.11	2.66	97.36
10	2	478.08	478.39	0.31	6.42	2.79	97.21
20	0.86	387.06	388.11	1.06	7.48	3.26	96.76
40	0.426	363.12	366.70	2.68	10.06	4.37	96.63
60	0.26	368.77	368.33	9.66	19.62	8.62	91.48
100	0.16	339.46	362.49	13.03	32.66	14.17	86.83
200	0.076	321.94	331.97	10.03	42.68	18.62	81.48
residual	-	287.12	474.84	187.72	230.40	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



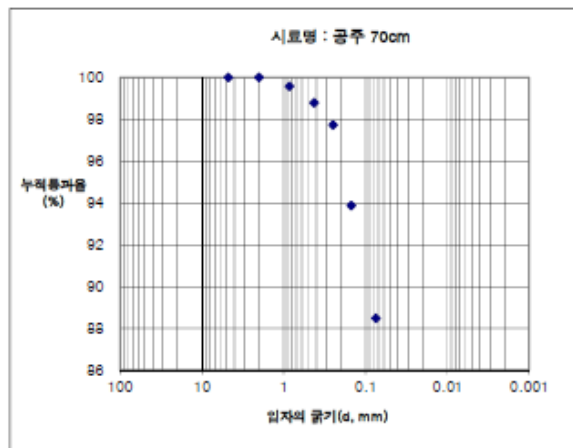
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원  
 National Instrumentation Center for  
 Environmental Management



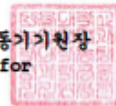
(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

공주 70cm							
시료번호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	박분율(%)	누적분과박분율(%)
4	4.75	486.96	486.96	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2	479.11	479.11	0.00	0.00	0.00	100.00
20	0.85	388.22	389.28	1.06	1.06	0.42	99.58
40	0.425	362.68	364.68	2.00	3.06	1.21	98.79
60	0.25	362.67	366.33	2.66	6.72	2.27	97.73
100	0.15	341.15	360.86	9.71	16.43	6.12	93.88
200	0.075	322.83	336.43	13.60	29.03	11.51	88.49
residual	-	287.12	610.22	223.10	262.13	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



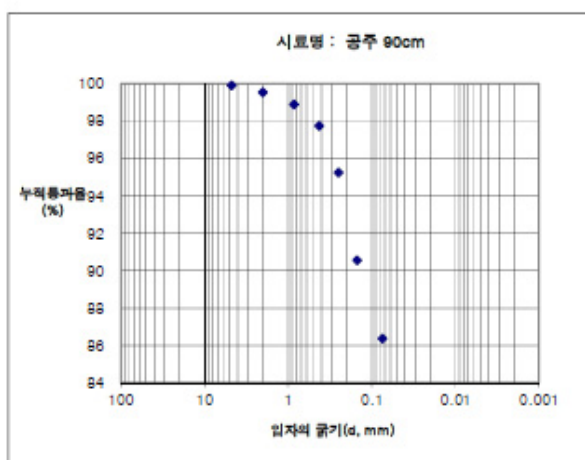
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

공주 90cm								
시료명	체질호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	박분율(%)	누적총과박분율(%)
	4	4.75	487.97	487.63	0.26	0.26	0.10	99.90
	10	2	477.78	478.73	0.96	1.21	0.47	99.63
	20	0.85	390.27	391.92	1.65	2.86	1.12	98.88
	40	0.425	361.28	364.21	2.93	6.79	2.26	97.74
	60	0.25	364.69	361.09	6.40	12.19	4.76	96.24
	100	0.15	341.66	363.67	12.01	24.20	9.44	90.66
	200	0.075	326.11	336.84	10.73	34.93	13.63	86.37
	residual	-	287.12	608.46	221.33	266.26	100	0.00

\* 분석방법 : Methods of Soil Analysis



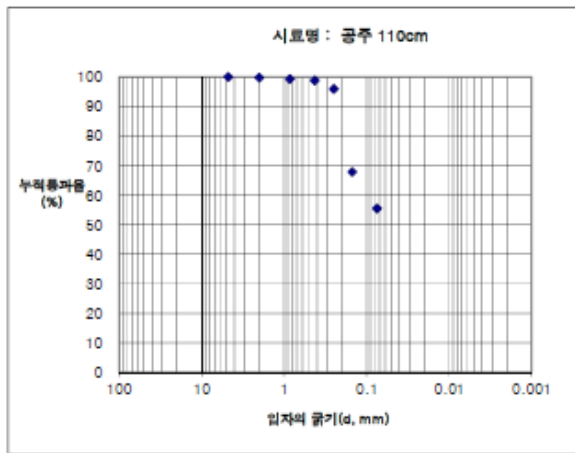
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

공주 110cm							
시료명							
체질호	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.76	489.41	489.41	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2	473.60	474.12	0.62	0.62	0.26	99.74
20	0.86	386.86	387.86	1.00	1.62	0.68	99.32
40	0.426	364.62	366.81	1.19	2.81	1.17	98.83
60	0.26	361.64	368.48	6.84	9.66	4.03	96.97
100	0.16	340.80	408.13	67.33	76.98	32.16	67.86
200	0.076	326.84	366.49	29.66	106.63	44.63	66.47
residual	-	287.12	419.96	132.83	239.46	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

# 시험성적서

발급번호 : 2017-RA-1265

## 1. 신청인

① 기관명	한국농어촌공사 농어촌연구원	② 대표/신청인	장규석/이병선
③ 주소	경기도 안산시 상록구 해안로 870		
④ 전화	031-400-1858	⑤ 팩스	-


## 2. 의뢰내용

① 접수 번호	2017-A-1245	② 접수 날짜	2017-11-24
③ 시료 종류	시람시료(모양 5점)		
④ 시험 기간	2017-11-24 ~ 2017-12-05	⑤ 성적서용도	참고용

## 시험 결과 (불임참조)

이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 위하여  
선전, 소송 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

검도자 : 권일영연구원 최천익 

승인자 : 센터장 이근력 

농생명과학공동기기원 분석시험위탁규정에 의하여 분석 시험한 결과를  
위와 같이 통지합니다.

2017년 12월 08일



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for Environmental Management



(주) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 860-4967~8 Fax) 866-4963

<http://nicem.snu.ac.kr/>





시험항목 : 토성(Soil texture)

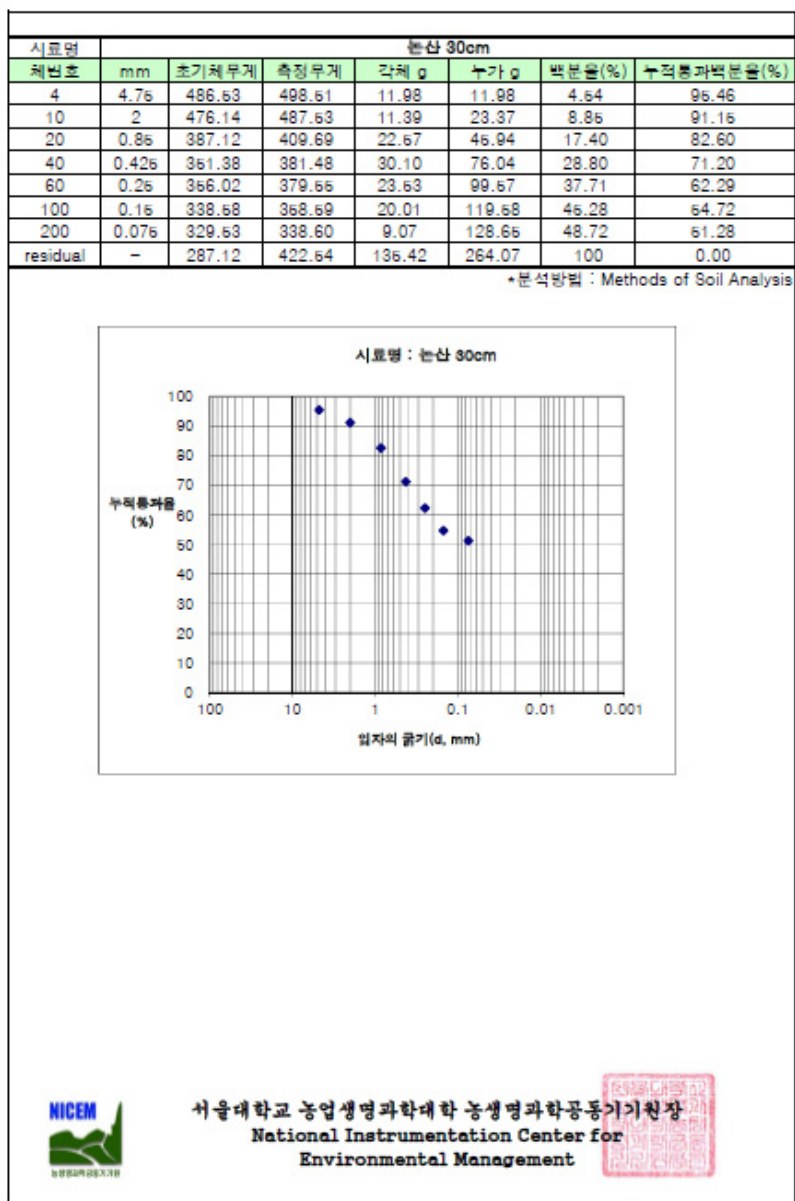
시료명	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Soil Texture
논산 30cm	60.16	32.08	17.76	Loam
논산 60cm	40.32	36.66	23.12	Loam
논산 70cm	26.68	42.00	31.32	Clay loam
논산 90cm	16.24	44.72	39.04	Silty clay loam
논산 110cm	26.28	43.62	30.20	Clay loam



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for Environmental Management

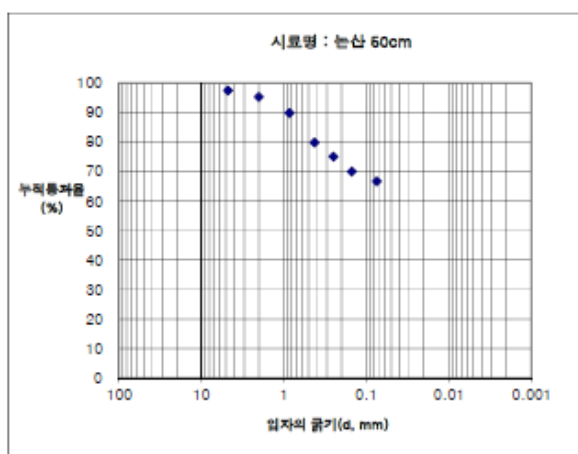


(주) 181-021 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 880-4967~8 Fax) 888-4953



토산 50cm							
시료명	mm	초기체무게	측정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	486.77	492.23	6.46	6.46	2.69	97.41
10	2	479.16	483.73	4.58	10.04	4.77	96.23
20	0.85	387.84	399.38	11.54	21.58	10.26	89.76
40	0.425	348.60	369.60	21.00	42.58	20.22	79.78
60	0.25	351.72	361.72	10.00	52.58	24.96	75.04
100	0.15	338.61	349.26	10.65	63.23	30.02	69.98
200	0.075	323.01	329.97	6.96	70.19	33.33	66.67
residual	-	287.12	427.65	140.43	210.62	100	0.00

\* 분석방법 : Methods of Soil Analysis



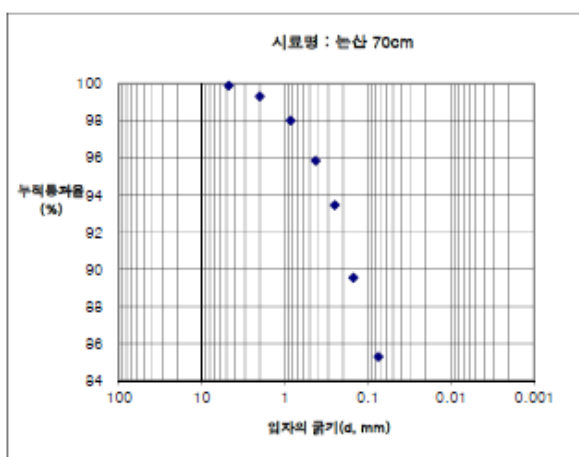
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

시료명	논산 70cm						
체번호	mm	초기체무게	속정무게	잔체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	487.00	487.33	0.33	0.33	0.12	99.88
10	2	472.93	474.52	1.59	1.92	0.70	99.30
20	0.85	386.21	389.76	3.55	5.47	1.99	98.01
40	0.425	346.95	352.92	5.97	11.44	4.16	95.84
60	0.25	348.51	355.07	6.56	18.00	6.55	93.45
100	0.15	339.56	350.30	10.74	28.74	10.46	89.64
200	0.075	324.28	335.97	11.69	40.43	14.71	85.29
residual	-	287.12	521.53	234.41	274.84	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



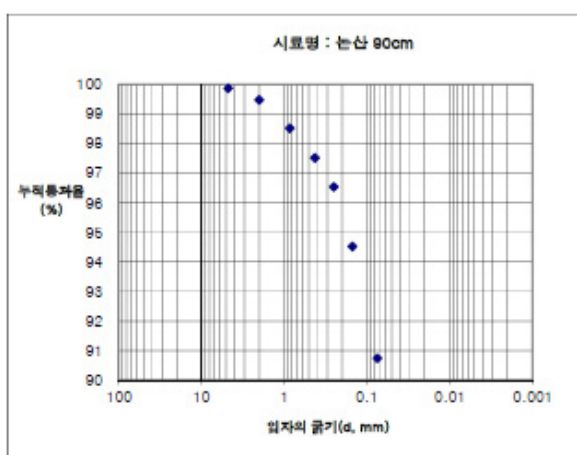
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

시료명	토산 90cm						
체번호	mm	초기체무게	축정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	489.38	489.75	0.37	0.37	0.14	99.86
10	2	478.08	479.12	1.04	1.41	0.63	99.47
20	0.85	387.06	389.69	2.64	3.96	1.49	98.61
40	0.425	363.12	366.78	2.66	6.61	2.49	97.61
60	0.25	368.77	361.36	2.69	9.20	3.47	96.63
100	0.15	339.46	344.81	6.35	14.66	6.48	94.62
200	0.075	321.94	331.96	10.01	24.66	9.26	90.74
residual	-	287.12	627.90	240.78	266.34	100	0.00

\*분석방법 : Methods of Soil Analysis



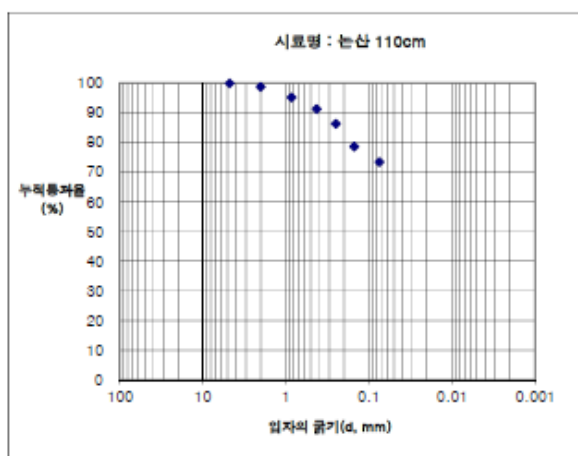
서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963

시료명	논산 110cm						
체번호	mm	초기체무게	숙정무게	각체 g	누가 g	백분율(%)	누적통과백분율(%)
4	4.75	486.96	486.41	0.46	0.46	0.17	99.83
10	2	479.11	482.24	3.13	3.59	1.36	98.66
20	0.85	388.22	397.63	9.31	12.90	4.86	96.16
40	0.425	352.68	363.09	10.61	23.41	8.80	91.20
60	0.25	362.67	366.92	13.26	36.66	13.79	86.21
100	0.15	341.16	361.42	20.27	66.93	21.41	78.69
200	0.075	322.83	336.76	13.92	70.85	26.64	73.36
residual	-	287.12	482.18	196.06	266.91	100	0.00

\* 분석방법 : Methods of Soil Analysis



서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장  
National Instrumentation Center for  
Environmental Management



(-우) 151-921 서울특별시 관악구 관악로 1 Tel) 02) 880-4967~8 Fax) 888-4963





## 참 여 연 구 원

목 차	소 속	참여자
1장 서론	농어촌연구원	송성호
2장 농업가뭄과 가뭄지수	농어촌연구원	송성호
3장 가뭄평가를 위한 지하수 관측망 활용	농어촌연구원	송성호
4장 지하수 공급능력을 고려한 농업가뭄 평가 모델 개발	공주대학교	구민호
5장 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립	농어촌연구원	송성호
5장 지하수위 인자를 이용한 농업가뭄 평가 기준 수립(토양수분함량 상관성 평가)	농어촌연구원	안중기
6장 연구개발과정에서 수집한 해외 사례	농어촌연구원	이병선
7장 결론	농어촌연구원	송성호

## 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

### ■ 발 행 처

연구과제명: ICT 기반의 지하수위 실시간 분석에 의한 농업가뭄 평가 기술 개발	
발 행 일	2017. 12
발 행 인	장 중 석
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 해안로 870 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재 또는 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	