

표준강수지수와 지하수위의 상관성 평가 및 가뭄관측정 설치 방안 고찰

김규범^{1*} · 윤한흠² · 김대호¹

¹한국수자원공사 국가지하수정보센터, ²한국수자원공사 조사기획처

Relationship Between Standardized Precipitation Index and Groundwater Levels: A Proposal for Establishment of Drought Index Wells

Gyoo-Bum Kim^{1*} · Han-Heum Yun² · Dae-Ho Kim¹

¹National Groundwater Information Management and Service Center, KWATER

²Water Resources Investigation and Planning Department, KWATER

ABSTRACT

Drought indices, such as PDSI (Palmer Drought Severity Index), SWSI (Surface Water Supply Index) and SPI (Standardized Precipitation Index), have been developed to assess and forecast an intensity of drought. To find the applicability of groundwater level data to a drought assessment, a correlation analysis between SPI and groundwater levels was conducted for each time series at a drought season in 2001. The comparative results between SPI and groundwater levels of shallow wells of three national groundwater monitoring stations, Chungju Gageum, Yangpyung Gaegun, and Yeongju Munjeong, show that these two factors are highly correlated. In case of SPI with a duration of 1 month, cross-correlation coefficients between two factors are 0.843 at Chungju Gageum, 0.825 at Yangpyung Gaegun, and 0.737 at Yeongju Munjeong. The time lag between peak values of two factors is nearly zero in case of SPI with a duration of 1 month, which means that groundwater level fluctuation is similar to SPI values. Moreover, in case of SPI with a duration of 3 month, it is found that groundwater level can be a leading indicator to predict the SPI values 1 week later. Some of the national groundwater monitoring stations can be designated as DIW (Drought Index Well) based on the detailed survey of site characteristics and also new DIWs need to be drilled to assess and forecast the drought in this country.

Key words : Standardized Precipitation Index, Groundwater levels, Cross-correlation coefficients, Drought index well

요 약 문

가뭄의 정도를 정량화하고 예측하기 위하여 다양한 가뭄지수중 가장 일반적으로 사용되는 것들로는 PDSI(Palmer Drought Severity Index), SWSI(Surface Water Supply Index) 및 SPI(Standardized Precipitation Index) 등이 있다. 본 연구에서는 가뭄을 평가하는 방법 중 표준강수지수(SPI)를 활용한 가뭄도 산정 결과와 지하수위 관측자료간의 상관성을 평가함으로써 향후 지하수위 자료를 활용한 가뭄 평가의 가능성을 제시하고자 하였다. 본 연구 결과, 충주개군, 양평개군 및 영주문정 관측소 지역에서 가뭄 평가 인자인 표준강수지수와 지하수위는 높은 상관성을 갖고 있는 것으로 분석되었으며, 지하수위는 표준강수지수 보다 기상 조건에 민감하지 않고 지속성과 연속성을 갖는 것으로 분석되어 가뭄 평가 인자로서 활용성이 있는 것으로 나타났다. 이들 지역의 지속기간 1개월 표준강수지수 및 층적층 지하수 관측정의 수위 관측자료 간의 교차상관계수는 충주개군 0.843, 양평개군 0.825 및 영주문정 0.737 등으로 높게 나타났다. 지속시간 1개월의 경우에는 지하수위 변화와 표준강수지수가 1주일의 범위내에서 동시기적인 특성을 보이는 반면, 지속시간 3개월의 경우에도 지하수위 변화가 표준강수지수 보다 1주일 정도 선행하기 때문에 가뭄 예측시 충분히 활용할 수 있을 것으로 평가되었다. 따라서 가뭄을 보다 과학적으로 평가·예측하기 위해서는 기

*Corresponding author : gbkim@kwater.or.kr

원고접수일 : 2005. 9. 20 게재승인일 : 2006. 2. 17

질의 및 토의 : 2006. 8. 31 까지

존 국가지하수관측정중에서 가뭄 관측정으로 사용될 수 있는 지점을 선정함과 아울러, 주변의 인위적인 영향이 최소화될 수 있는 지점에 신규 가뭄 관측정(DIW, Drought-Index Well)을 설치 운영하는 것이 필요하다.

주제어 : 표준강수지수, 지하수위, 교차상관계수, 가뭄관측정

1. 서 론

2001년 봄에 우리나라 중부지방은 극심한 가뭄을 겪었다. 경기도, 강원도 및 경상북도 북부 일부 지역에서는 가뭄으로 인한 생활용수의 부족현상이 심화되는 등 가뭄으로 인한 피해가 커서 국가적인 차원에서 용수부족에 대한 대책을 수립 시행한 바 있다. 이와 같은 극심한 가뭄현상은 인간 생활에 지장을 초래할 뿐 아니라 국가적인 재앙을 의미하게 된다. 일반적으로 가뭄이란 가뭄의 정의에 따라 5가지로 구분된다(Wilhite and Gilantz, 1985). 첫째, 주어진 기간 동안의 강수량이나 무강수 계속 일수 등으로 정의되는 기상학적 강수가뭄, 둘째 월별 또는 연별 평균 값과 당해연도의 월별 또는 연별 강수량과의 비교에 의하여 정의되는 기후학적 강수 가뭄, 셋째 기온, 바람 및 습도 등에 의해 정의되는 대기가뭄, 넷째 농작물의 생육에 직접 관계되는 토양내 수분에 의하여 정의되는 농업가뭄, 다섯째 하천, 저수지 및 지하수 등의 수위에 중점을 두고 용수부족에 의하여 정의되는 수문가뭄 등으로 분류된다. 가뭄의 정도를 정량화하고 예측하기 위하여 다양한 가뭄 지수가 개발되어 있으며, 가장 일반적으로 사용되는 것들은 PDSI(Palmer Drought Severity Index), SWSI(Surface Water Supply Index) 및 SPI(Standard Precipitation Index) 등이 있다.

미국지질조사소(www.USGS.gov)에서는 지하수 수위 관측자료를 활용하여 지역에 따라 매 월 단위로 보통 이하(Below-normal), 보통(Normal), 보통 이상(Above-normal) 지하수위 등 3단계로 구분하여 분포도를 작성하고 있다. 가뭄에 대한 판단은 지하수위 관측 값이 전체 기간의 최소 25% 이상 기간에서 보통 이하(Below-normal)를 보이는 경우에 근거하고 있다. 이와 같은 가뭄 판단 기법은 장기간의 지하수 관측 자료가 축적된 경우에 가능한 방법으로서, 현재 국내에도 293개소의 국가 지하수관측소가 운영되고 있는 만큼 가뭄판단에 필요한 기초 자료 구축이 진행되고 있어 조만간에 가뭄 예측 기법으로 지하수위를 활용한 방법의 도입이 필요할 것으로 본다.

일반적으로 지하수위는 강우에 대한 반응이 지표수보다 느릴 뿐 아니라 지하수의 순환 흐름이 지하 심부를 통과하는 것과 천부를 통과하는 것 등에 의하여 복합적으로 영향을 받기 때문에 지하수위의 변동 특성은 수시간-수일

정도의 단기간의 외부 인자 변화 특성을 잘 반영할 뿐 아니라 수개월 이상의 장기간의 변화 경향도 함께 갖게 된다. 즉, 장기적인 가뭄에 의하여 나타나는 지하수 수위 강하 패턴은 강수에 대한 반응 효과가 지표수와 달리 서서히 지속적으로 나타나게 된다. 따라서 이와 같은 지하수 수위 반응 및 강하 패턴이 표준강수지수와 밀접한 관련이 있고 특정 모델로 대표될 수 있다면 지하수 수위 자료를 활용하여 단기간의 가뭄을 예측 및 평가할 수 있는 방안이 제시될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 가뭄을 평가하는 방법 중 표준강수지수(SPI)를 활용한 가뭄도 산정 결과와 지하수위 관측자료간의 상관성을 비교 평가함으로써 향후 지하수위 자료를 활용한 가뭄 평가의 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 표준강수지수에 의한 가뭄 평가

표준강수지수는 각 시간 규모에 대한 강수량의 확률에 근거한 지수이다. 이 지수는 미국의 많은 가뭄대비 계획에 이용되고 있으며, 전문가들은 표준강수지수의 효용성을 높이 평가하고 있다. McKee et al.(1995)은 가뭄은 상대적으로 물의 수요에 비해 물의 부족을 유발하는 것으로서, 이는 강수량의 감소에 의해 시작된다는 것에 착안하여 표준강수지수를 개발하였다. 즉, 강수량이 부족하면 용수 공급원인 지하수량, 적설량, 저수지 저류량, 토양 함유 수분, 하천 유출량 등에 각기 다른 영향을 미친다는 것으로부터 표준강수지수를 개발하였다. 표준강수지수는 특정한 시간에 대한 계산 시간단위를 수개월 등과 같이 설정하고 시간단위별로 강수 부족량을 산정하여 개개의 용수공급원이 가뭄에 미치는 영향을 산정 하는 것이다. 이렇게 특정 시간단위로 산정된 표준강수지수는 각 시간단위에 따라 여러 관심에 따른 분야에 사용될 수 있다. 표준강수지수는 선형적으로 강수 부족에 비례하고 확률, 누적강수 평균 백분율(Accumulative precipitation percent of average) 및 누적강수 부족량을 고려한다. 이렇게 산정된 표준강수지수는 확률분포형을 도입하였기 때문에 현재의 가뭄 뿐만 아니라 가뭄이 끝나기에 필요한 강수의 확률을 결정하는 것을 가능하게 하며 다음과 같은 특성을 갖고 있다.

1) 표준강수지수는 확률 특성을 갖는다.

Table 1. SPI (Standardized precipitation index) values

Range of SPI	Wetted condition
> 2.00	Extremely Wet (Extremely flood)
1.50 ~ 1.99	Very Wet (Very strong flood)
1.00 ~ 1.49	Moderately Wet (Moderate flood)
-0.99 ~ 0.99	Near Normal (Normal climate)
-1.00 ~ -1.49	Moderately Dry (Moderate drought)
-1.50 ~ -1.99	Severe Dry (Severe drought)
< -2.00	Extremely Dry (Extreme drought)

Table 2. Meteorological observation data used for SPI analysis

Location of weather station	Chungju, Yangpyung, Yeongju
Data	Daily rainfall
Periods of analyzed data	from 1973 to 2001

2) 표준강수지수에서 이용된 강수는 현재 기간의 강수 부족량을 계산하는데 이용될 수 있다.

3) 표준강수지수에서 이용된 강수는 수개월의 기간에 대한 평균 강수의 현재 백분율을 계산하는데 이용될 수 있다.

4) 표준강수지수의 분포는 정규분포이다. 따라서 표준강수지수는 건조기간뿐 아니라 습윤기간을 감시하는데 이용될 수 있다.

5) 표준강수지수는 용수 공급원, 즉 적설량, 저수지 저류량, 하천유출량, 토양수분 및 지하수량 등의 추정치에 이용될 수 있다.

표준강수지수의 결과로부터 얻은 가뭄 심도를 정의하기 위하여 Table 1과 같은 분류체계가 이용된다.

2.1. 강수 기초 자료

본 연구에서는 가뭄이 가장 심했던 2001년 봄을 연구 대상 기간으로 설정하였다. 2001년 봄가뭄 기간의 가뭄정도를 표준강수지수로 표현하기 위해 기상청 측후소의 강수량 자료를 이용하였다. 가뭄지수 산정을 위해 1973년부터 2001년까지의 일단위 강수자료를 수집하여 3월에서 6월까지 기준일자 별로 지속기간 1주일, 1개월 및 3개월의 시계열을 선정하였다. 기준일자는 각 월별 주단위 분석을 위해 7, 14, 21, 30(31)일을 기준으로 정리하였다. 본 분석에 이용된 기상청 측후소는 가뭄이 극심하였던 중부지역의 측후소 3개소(충주, 양평 및 영주)를 대상으로 하였다(Table 2) (한국수자원공사, 2001). 이들 3개 관측 지점의 예년 평균 대비 2001년 강수량 현황은 Table 3과 같다. 1월 및 2월에는 3개 측후소에서 예년에 비하여 156~218%의 많은 강수량을 보이고 있으나, 3월부터 5월까지는 12~20%에 불과하여 극심한 가뭄을 보여주고 있다.

Table 3. Rainfalls of the year of 2001 compared with average rainfalls at three weather stations

Location	Jan.~Feb.	March~May
Chungju	218%	12%
Yangpyung	156%	19%
Yeongju	182%	20%

2.2. 표준강수지수 분석 결과

표준강수지수는 용어에서 알 수 있듯이 강수량을 표준화한 지수를 말하는데 주어진 지속기간에 대한 각 월별 강수량의 확률분포로부터 해당 연도 월의 변량값(해당 연도 월의 이동누적평균 강수량)이 발생할 누적확률을 구함으로써 산정할 수 있다. 먼저 각 지점별 매년 3월에서 6월까지 주단위별로 이동누적평균 계열을 작성하였다. 예를 들어, 3월 7일 기준일에서 지속기간 1주, 1개월 및 3개월에 대하여 평균강수량값을 구하여 매년 시계열을 작성하였다. 확률분포형은 Pearson Type-분포를 선정하고 확률가중모멘트법(PWM)을 이용하여 매개변수를 산정하였다. 그 다음 각 계열의 변량에 대한 누적확률값을 계산하여 그에 해당하는 표준정규분포의 Z값을 구하는데 이것이 바로 표준강수지수가 된다. 이상 계산된 결과는 Table 4와 같다. 지속기간 1개월의 표준강수지수에 의하면 -1 이하의 값을 보이는 가뭄은 3월 하순부터 시작되어 6월 중순까지 계속되었으며, 3개월 표준강수지수의 경우 4월 하순부터 6월 중순까지 가뭄이 나타난 것으로 분석되었다.

3. 표준강수지수와 지하수 수위의 상관성

3.1. 지하수위 자료

2004년말 현재 건설교통부 및 한국수자원공사에서 전국에 293개소의 국가지하수관측소를 설치하여 운영 중에 있다. 일반적으로 국가지하수 관측소는 심도 약 70 m의 압반 지하수 관측정과 약 10~20 m 정도의 충적층 지하수 관측정으로 구성되어 있고, 매 6시간 마다 자동관측에 의한 관측을 실시하고 있다. 관측항목은 지하수위, 지하수 수온, 전기전도도 등으로서 관측된 자료는 현장의 Data logger에 저장된 후 Modem 또는 CDMA 방식에 의하여 국가지하수정보센터(www.GIMS.go.kr) 서버로 자동 전송되고 있다(Kim, 2005).

본 연구에서는 가뭄이 심했던 시군 3개 지역의 기상청 측후소 인근에 위치하고 있는 3개의 국가지하수 관측소의 충적층 지하수 관측정 자료를 분석에 활용하였다(Table 5,

Table 4. Results of SPI values from 1 March to 30 June for three weather stations

Date	1 Week SPI			1 Month SPI			3 Month SPI		
	Chungju	Yangpyung	Yeongju	Chungju	Yangpyung	Yeongju	Chungju	Yangpyung	Yeongju
7/3	-0.06	0.45	0.20	0.85	0.88	0.85	-	-	-
14/3	-0.66	-0.81	-0.46	0.55	0.77	0.89	-	-	-
21/3	-1.30	-0.76	-1.10	0.56	-0.07	0.65	-	-	-
31/3	-0.82	-0.44	-0.63	-1.59	-1.34	-1.34	-	-	-
7/4	-0.73	-0.88	-0.72	-1.77	-1.53	-1.81	-0.53	-0.41	-0.41
14/4	0.11	0.26	0.01	-1.42	-0.86	-0.94	-0.63	-0.43	-0.45
21/4	-1.32	-0.98	-1.23	-1.45	-1.05	-1.29	-1.05	-0.77	-0.89
30/4	-1.17	-1.38	-1.33	-1.49	-1.40	-1.46	-1.24	-1.04	-1.09
7/5	-0.95	-0.24	-0.46	-1.73	-1.12	-1.50	-1.45	-1.15	-1.25
14/5	-1.16	-1.30	-1.24	-2.01	-2.14	-2.31	-1.52	-1.32	-1.36
21/5	-1.30	-1.18	-1.52	-1.91	-1.70	-1.74	-1.84	-1.85	-1.50
31/5	-0.59	-0.42	-0.61	-2.07	-2.00	-1.87	-2.52	-2.36	-2.29
7/6	-1.27	-0.75	-1.11	-1.84	-2.16	-1.86	-2.16	-1.95	-2.09
14/6	-0.87	-0.95	-0.11	-2.05	-2.00	-1.87	-2.37	-2.14	-2.11
21/6	1.16	0.91	1.46	0.14	-0.40	0.23	-1.67	-1.91	-1.40
30/6	1.09	0.83	0.93	0.95	0.61	0.94	-0.28	-0.87	-0.51

Table 5. Groundwater monitoring stations used in this study

Monitoring stations	Chungju, Yangpyung, Yeongju
Data	Daily groundwater levels
Periods	March-June, 2001

Fig. 1). 암반관측정의 경우 지표에 내린 강수가 하방향으로 침투하여 지하수위에 이르기까지 다양한 지체 요인을 접하게 되어 지하수위에 직접 영향을 미치는 경우가 희박하므로 총적층 관측정만을 연구 대상으로 하였다. 본 연구에서는 충주개금, 양평개군 및 영주문정 지하수 관측소를 연구 대상으로 선정하였다. 분석에 활용된 관측기간은 가뭄현상이 극심하였던 2001년 3월초부터 가뭄이 해소되는 6월말까지로 하였다. Fig. 1에서 보듯이 이들 지역은 2001년 5월의 가뭄이 표준강수지수상 극심한 가뭄(Extremely dry) 지역으로 분류된 곳이다. 충주개금 관측소는 남한강 인근의 평탄지형에 위치하고 있으며, 대수층의 투수량계수가 69.04 m²/day로서 양호한 지역에 해당한다. 양평개군 관측소는 남한강 인근에 위치하며, 투수량계수가 6.76 m²/day로 다소 낮은 지역이다. 또한, 영주문정 관측소는 내륙 구릉지에 위치하며 22.17 m²/day의 투수량계수를 보인다.

Fig. 2는 3개 국가지하수관측소 지역에서의 2001년 1월부터 7월까지 가뭄이 나타났던 기간의 지하수위 일 평균

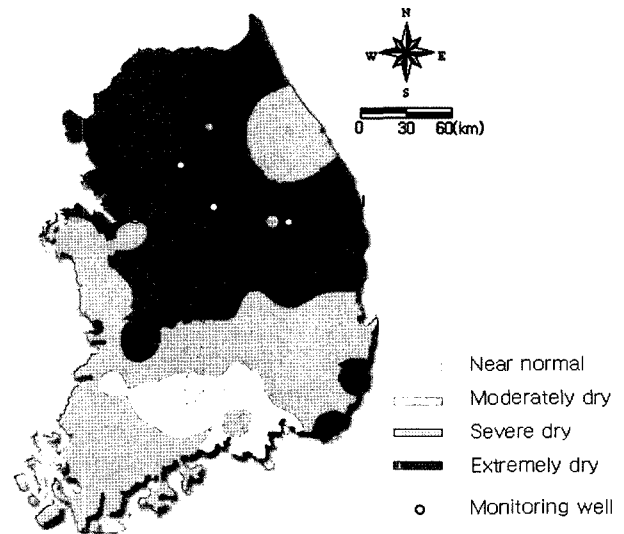


Fig. 1. Location of three groundwater monitoring stations and a distribution of drought in May, 2001.

변동 자료와 각 관측소의 개시 년도부터 2003년까지(가뭄 연도를 제외한 기간)의 일평균 지하수위 변동 자료를 비교한 것이다(건설교통부 · 한국수자원공사, 2004a). 2001년의 1월, 2월 및 3월의 지하수위가 예년보다 높았으나, 3월부터 시작된 무강우가 지하수위에 반영되면서 4월부터는 평균 지하수위보다 낮아지는 경향을 보이고 있다. 또한, 2001년 봄의 경우, 지하수위가 회복되는 시점(최저 수

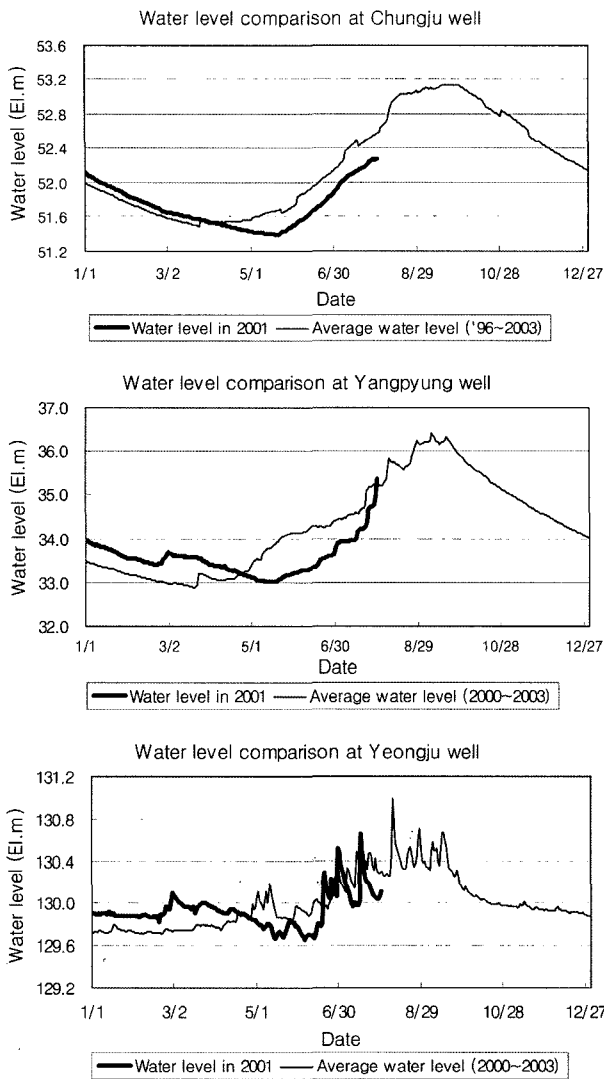


Fig. 2. Groundwater level time series in 2001 (from January to July) and average water levels.

위 시점이 예년보다 15~30일 정도 늦어 졌음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 무강수로 인하여 낮아진 지하수위가 회복되는데 많은 시간이 소요되었음을 의미한다.

3.2. 변동 패턴 비교

지하수위의 변동 양상과 표준강수지수의 변화를 비교하기 위하여 시계열 도표를 작성하였다(Fig. 3). 3개 기상청 측후소 강수량자료로부터 계산된 표준강수지수와 3개 국가 지하수 관측소 총적층 지하수 관측정의 3월초부터 6월말까지 지하수위의 변동 패턴은 매우 유사한 형상을 보이고 있으나, 표준강수지수는 시간이 지남에 따라 상하 변동을 폭을 보이기도 하는 반면, 총적층의 지하수 수위 변동은 가뭄이 계속되면서 수위의 편차가 심하지 않은 상태에서 일

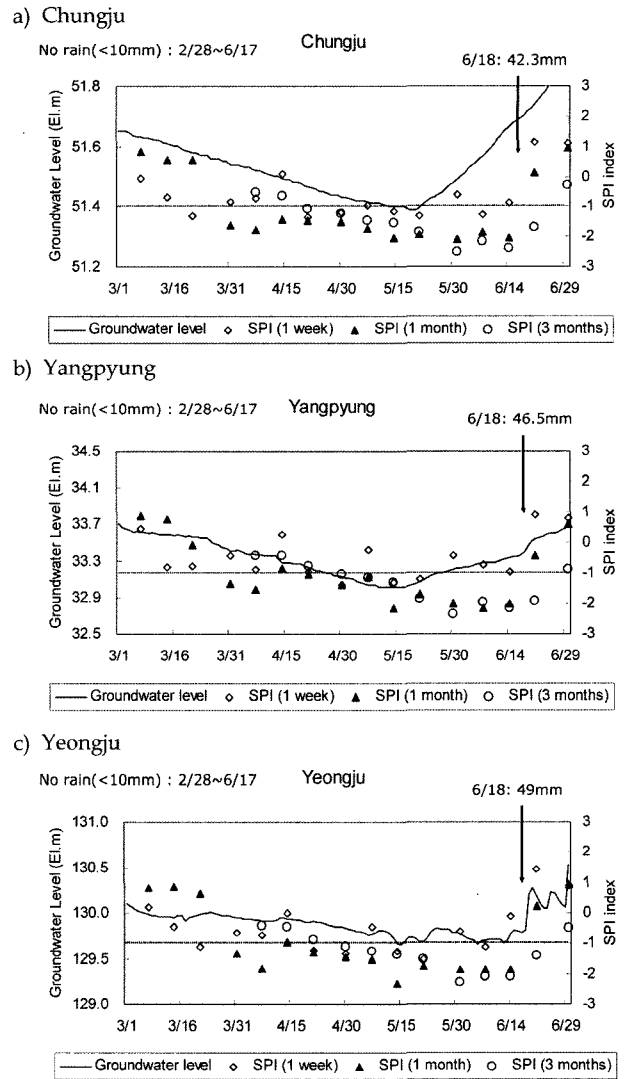


Fig. 3. Plots of SPI values and groundwater level time series.

정한 추세를 유지하여 지속적으로 하강하는 경향을 보이고 있다. 가장 북쪽에 위치한 양평개근 관측소의 경우에는 지하수위의 최저점(변곡점)에 해당하는 날짜가 약 5월 15일경으로서, 남쪽에 위치한 충주가금(5월 20일경) 및 영주문정(6월 10일경)보다 빠르게 나타난다. 봄에는 지하수위가 계속 강하됨에도 불구하고 모내기 및 생활용수 공급으로 지하수위 강하가 계속된다. 북쪽 지역이 남쪽 지역보다 모내기 시점이 빠르기 때문에 지하수 이용이 빨라지고 지하수위의 최저점이 북쪽 지역에서 선행하게 된 것으로 보인다. 모내기용 지하수 개발 및 이용이 중단되면서 지하수위 회복이 빠르게 나타나기 시작하였고, 40 mm 이상의 집중강우가 내린 6월 18일 이후에는 완전히 정상 수위로 회복하게 된 것이다.

3개 관측지점에서 지속시간 1주일, 1개월 및 3개월의 표준강수지수는 지하수위 변동 패턴과 비교적 일치하는 것으로 보이나, 지속시간 1주일의 표준강수지수는 그 변동 폭이 커서 연속되어 나타나는 지속되는 가뭄을 설명하기에는 미흡한 면이 있다. 지속시간 3개월 표준강수지수는 장기간의 연속적인 가뭄을 잘 설명하고 있으나 지하수위의 회복 시점에서는 지하수위와 정확히 일치하지는 못하고 있다. 일반적으로 주민들이 느끼는 가뭄의 정도는 시간이 지남에 따라 그 크기가 자주 바뀌는 것은 아니다. 즉, 각 지역의 표준강수지수는 시간이 경과함에 따라 부분적으로 상승과 하강을 반복하는 경향을 보일 수 있으나 실제 가뭄의 정도는 연속적이며 지속적으로 심화되는 특성을 보이는 것이 일반적인 현상이다. 즉 일시적인 강우가 왔다 하더라도 장기간 지속되어온 가뭄 현상이 해소되는 것은 아니기 때문에 상승 하강을 반복하는 표준강수지수에 의한 가뭄 평가시 유의하여야 한다.

이와 같은 지속적으로 진행되는 가뭄 특성은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 지하수 수위의 강하 패턴과 유사하다고 할 수 있겠다. 지하수 수위의 변화는 강수량의 증감, 하천유량의 증감, 하천수 및 지하수 채수량의 변화, 지하대수층 매질상태의 변화 및 기타 지표의 함양 작용 등에 따라서 영향을 받게 된다. 강수량이 감소하여 가뭄이 진행됨에 따라 하천유량이 감소하고 물의 사용에 따른 하천수 이용이 증가하며 이와 병행하여 지하수의 채수가 급증하게 되어 결국은 지하수 수위가 저하되는 현상을 보이게 되고 궁극적으로는 가뭄 특성이 종합적으로 반영되게 된다. 일반적으로 지하수 수위는 지표수와 달리 일시적인 소량의 강우에 의한 급격한 증가 현상을 보이지 않기 때문에 지속성을 갖는 변동 특성을 분석하는데 특히 유리한 점이 있다. 물론, 주변에 인위적인 요인이 없는 지역에 설치된 지하수 관측정이 가뭄의 평가 도구로 활용될 수 있다.

3.3. 상관 관계 분석

표준강수지수와 지하수위와의 상관성을 분석하기 위하

여 표준강수지수와 마찬가지로 1주일 간격의 지하수위 평균값을 산정하여 활용하였다. Table 6은 표준강수지수와 지하수 수위의 상관성을 나타낸 것이다. 표준강수지수와 지하수 수위 변동간의 상관성을 평가하기 위하여 Pearson 상관계수를 분석한 결과, 3개 관측지점에서 지속시간별 표준강수지수와 지하수 수위 변화가 95% 신뢰수준에서 관련성이 높은 것으로 분석되었다. 3개월 지속시간의 경우 표준강수지수와 지하수위 관계는 유의하지 못한 것으로 분석되었는데, 이는 최저 지하수위 시점이 표준강수지수 최저 시점과 일치하지 못하는 것에 기인한다. 1개월 지속시간의 표준강수지수의 경우 지하수위와의 상관계수는 총 추가금 0.771, 양평균 0.814 및 영주문정 0.791로 매우 높게 나타났다.

한편, 지하수위와 표준강수지수 사이에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 시간에 따른 상호 상관성이 존재하는 자료이기 때문에 산점도 및 단순 회귀식에 의한 결과는 시계열 자료의 특성을 갖는 관측자료를 설명하기에는 다소 미흡하다. 따라서 이와 같은 2개의 시계열 자료들 간의 시간적 상관관계, 즉 시차를 고려한 상관관계를 분석하기 위하여 교차상관분석을 실시하였다(건설교통부·한국수자원공사, 2004b; 이명재 외, 2004).

시계열성을 갖는 표준강수지수와 지하수 수위 관측자료의 상관성 분석을 위한 방법으로서 교차상관함수(Cross-correlation function)를 이용하였다. 시계열자료에 있어서 자기상관함수(Autocorrelation function : ACF)는 시계열 자체 자료들 사이인 y_t 와 y_{t-k} 와의 k 시차(time lag) 만큼의 상관관계를 보여주는 것이며, 교차상관함수(Cross-correlation function)는 시계열 y_t 와 다른 시계열 x_{t-k} 와의 k 시차의 상관관계를 나타낸다. 즉, 교차상관함수는 두 확률변수간의 관련성의 정도와 방향에 대한 유용한 척도가 되는 값으로서 두 시계열간의 상관관계를 보여줌과 동시에 하나의 시계열이 다른 시계열을 얼마나 선행하고 있는가를 보여준다.

시계열 y_t 의 평균이 $\mu = E[y_t]$ 이라면, 자기상관함수와 교차상관함수는 다음과 같이 표현된다. 시차 k 에서의 자기

Table 6. Pearson correlations between SPI values and groundwater levels from March to June

Site	1 Week SPI		1 Month SPI		3 Month SPI	
	P	Sig. level	P	Sig. level	P	Sig. level
Chungju	0.750	0.01	0.771	0.00	0.292	0.36
Yangpyung	0.533	0.03	0.814	0.00	0.309	0.33
Yeongju	0.581	0.02	0.791	0.00	0.725	0.01

공분산함수는 서로 다른 두 시점간의 시계열의 공분산으로서 :

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

시차 k 에서의 자기상관함수는 두 시점간 시계열의 상관계수로서 :

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

시차 k 에서의 교차공분산함수는 :

$$\gamma_{xy}(k) = E[(x_{t-k} - \mu_x)(y_t - \mu_y)] = E[(y_t - \mu_y)(x_{t-k} - \mu_x)] = \gamma_{yx}(-k) \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

시차 k 에서의 교차상관함수는 :

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

이다.

교차상관함수는 자기상관함수와 달리 원점에 대하여 대칭이 아니다. 즉, 자기상관함수의 경우에는 $\rho_{xy}(h) = \rho_{xy}(-k)$ 가 성립하지만 교차상관함수의 경우에는 $\rho_{xy}(k) \neq \rho_{xy}(-k)$ 이다. 만약에 y_t 가 y_{t+k} 의 선행지표라면 y_t 가 y_{t+k} 는 서로 상관관계가 있기 때문에 교차상관계수는 유의한 값이 존재할 것이다(오광우 외, 2000). 이러한 교차상관함수 값을 각 시차에 대하여 도표로 나타낸 것이 교차상관함수도표로서 두 시계열간의 상관성을 평가하는 자료로 활용된다.

상기 지역에 대하여 지하수위가 회복되기 전 기간인 2001년 3월부터 5월까지 표준강수지수 및 지하수 수위 자료 간의 교차상관계수를 분석하였다. Fig. 4 및 Table 7에서 보는 바와 같이 3개 지점의 교차상관계수는 지속기간 1개월의 경우가 지하수위와 상관성이 가장 높은 것으로 나타났으며, 충주개금 0.843, 양평개금 0.825 및 영주문정 0.737 등으로 분석되어 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 두 인자간의 선행관계를 분석한 결과, 지속시

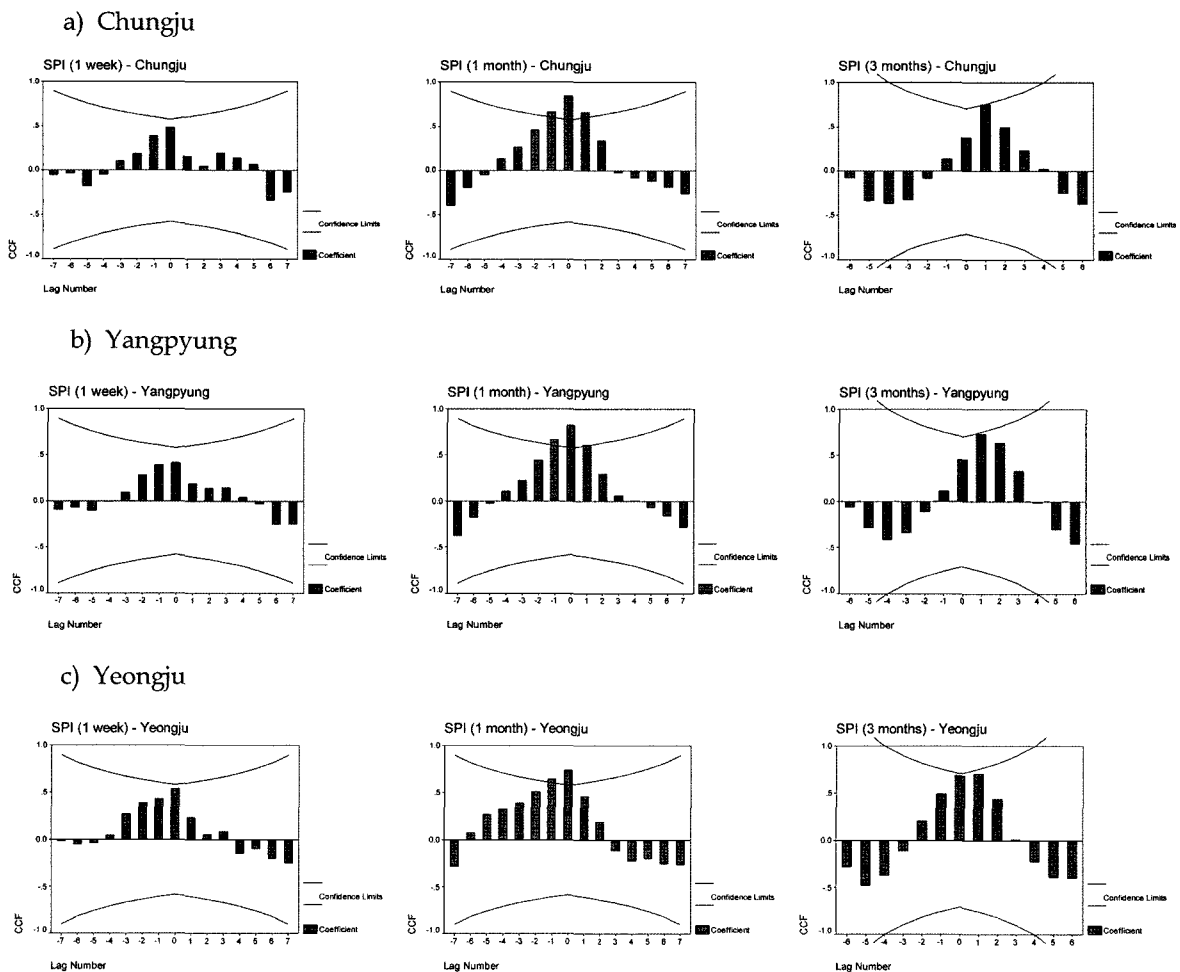


Fig. 4. Example of the cross-correlation plots between SPI values and groundwater levels.

Table 7. Cross-correlations between SPI values and groundwater levels

Site	1 Week SPI		1 Month SPI		3 Month SPI		
	Cross Corr. Coef.	lag K	Cross Corr. Coef.	lag K	Cross Corr. Coef.	lag K	Leading indicator
Chungju	0.480	0	0.843	0	0.753	1 week	Level
Yangpyung	0.419	0	0.825	0	0.731	1 week	Level
Yeongju	0.537	0	0.737	0	0.707	1 week	Level

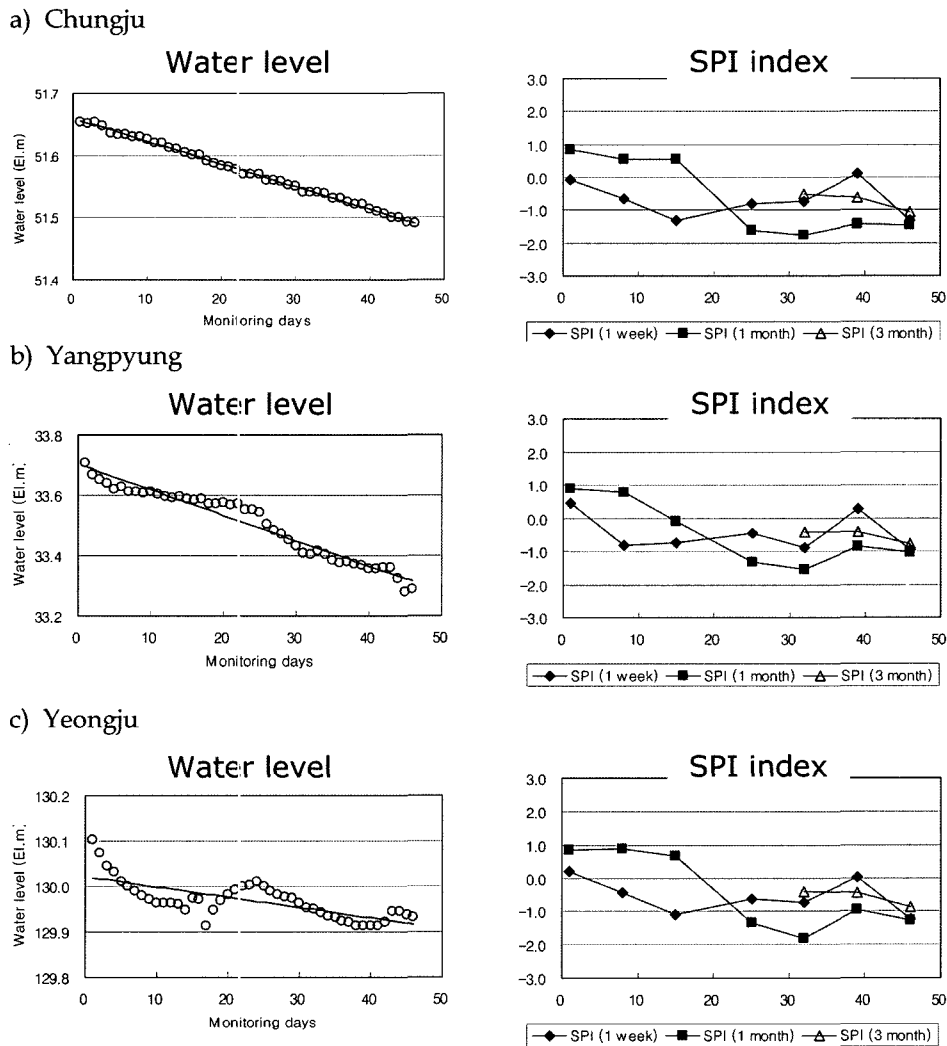


Fig. 5. Trends of groundwater levels and SPI values from 1 March to 15 April in 2001.

간 1주일 및 1개월의 경우에는 지하수위 변동과 표준강수지수가 동일한 시점에서 변화함을 알 수 있다. 반면에, 지속시간 3개월의 표준강수지수는 지하수위와 선행관계를 보이고 있으며, 지하수위가 표준강수지수보다 약 1주일 정도 앞서는 것으로 분석되었다. 이는 지속시간 3개월의 표준강수지수는 지수 결정시 2~3개월 이전의 강수량이 영향을 미치기 때문에 강우 반응이 짧은 지하수위보

다 늦게 변화하는 것으로 예상된다. 본 연구에서는 시간 단위를 1주일로 정하였기 때문에 정확히 1주일을 선행한다고 해석하기에는 무리가 따르나, 지하수 수위가 표준강수지수(지속시간 3개월) 보다 선행하여 변화함을 잘 보여준다. 이와 같은 현상은 지하수 수위 변화를 활용하여 향후 발생할 가뭄의 정도를 예측할 수 있음을 설명해주고 있다.

4. 가뭄의 평가를 위한 지하수위 활용성 고찰

가뭄의 피해를 최소화하기 위해서는 가뭄에 진입되고 나서 향후에 발생할 수 있는 단기간의 가뭄을 합리적으로 예측, 평가하는 것이 국가적인 손실을 최소화하기 위하여 요구된다. 앞에서 언급한 바와 같이 지하수위는 강우 및 지하수 채수 등 지속되어 온 변화 상황을 잘 반

영할 수 있는 지시인자가 될 수 있기 때문에 본 연구에서는 상기 3개 관측소를 대상으로 지하수위 자료 특성 분석 및 예측을 통하여 가뭄예측에 활용할 수 있는지를 검토하였다.

Fig. 5는 4개 관측소의 2001년 3월 1일부터 4월 15일 까지의 지하수위 변동과 동일 기간 동안의 표준강수지수를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 짧은 기간

a) Chungju

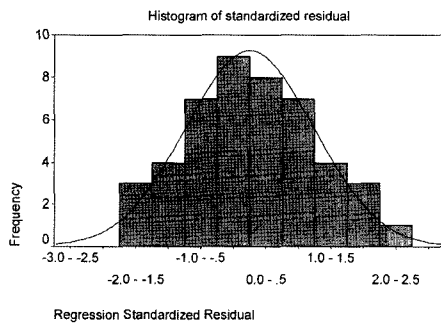
① Model summary

R Square	Adjusted R Square
0.995	0.995

② Coefficients

Contents	Unstandardized Coefficients		t	Sig.
	B	Std. Error		
Constant	51.6	0.001	47,485.5	0.000
Days	-3.65×10^{-3}	0.000	-90.6	0.000

③ Residual test



b) Yangpyung

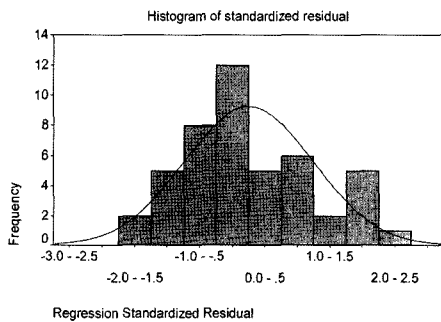
① Model summary

R Square	Adjusted R Square
0.949	0.948

② Coefficients

Contents	Unstandardized Coefficients		t	Sig.
	B	Std. Error		
Constant	33.7	0.008	4,256.0	0.000
Days	-8.41×10^{-3}	0.000	-28.7	0.000

③ Residual test



c) Yeongju

① Model summary ② Coefficients

R Square	Adjusted R Square	Contents	Unstandardized Coefficients		t	Sig.
			B	Std. Error		
0.519	0.508	Constant	130.0	0.009	14,737.1	0.000
		Days	-2.25×10^{-3}	0.000	-6.9	0.000

③ Residual test

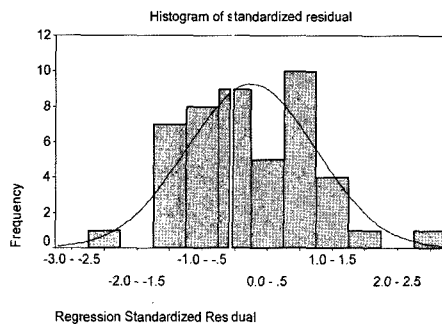


Fig. 6. Linear regression analysis between groundwater level time series and monitoring days from 1 March to 15 April in 2001.

동안의 지하수위 변화는 표준강수지수의 변화와 유사한 경향을 보인다.

시계열 자료의 변동은 순환 변동, 계절 변동, 불규칙 변동 및 선형 변동 등 여러 형태로 표현될 수 있으나, 본 연구에서는 단기간의 지하수위 변화와 표준강수지수를 비교하는 목적으로 단순 선형회귀 모형을 적용하여 보았다.

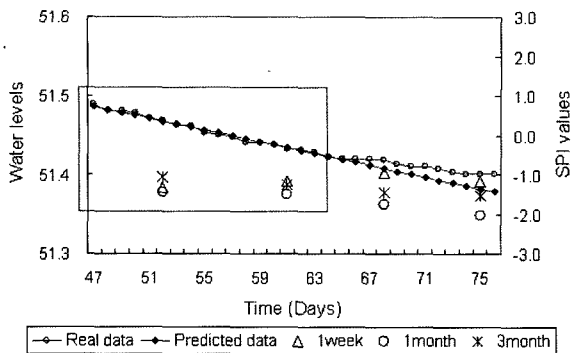
지하수위 변동의 선형회귀 모형은 $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$ 와 같이 표현된다. 여기에서 y 는 지하수위이며 x 는 관측일자라는 의미이다. 충주기금, 양평개군 및 영주문정 총적층 지하수 관측정의 F 검정통계량이 8,202.0, 321.7 및 47.5이며, 회귀계수에 대한 유의확률 p-value도 모두 약 0으로서 회귀식이 매우 유의한 것으로 분석되었다. 또한, 잔차의 히스토그램 분포가 정규성을 보이고 있고 표준화잔차의 정규 P-P Plot도 선형을 잘 보이고 있어 본 회귀모델이 적절함을 알 수 있다(Fig. 6). 이상 분석된 각 관측정 지하수위의 선형회귀 모델은 다음과 같다.

- 충주기금 : Water level = $-3.65 \times 10^{-3} \cdot \text{Day} + 51.6$
- 양평개군 : Water level = $-8.41 \times 10^{-3} \cdot \text{Day} + 33.7$
- 영주문정 : Water level = $-2.25 \times 10^{-3} \cdot \text{Day} + 130.0$

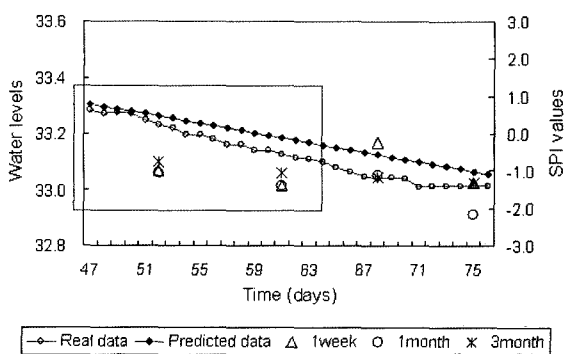
이상 구축된 선형회귀 모델을 활용하여 2001년 4월 16일부터 5월 15일까지의 지하수위 변동을 예측하여 보았

다(Fig. 7). 충주기금 및 양평개군 지하수 관측소의 지하수위는 실제값과 예측값이 거의 일치하고 있으며, 영주문정 지하수 관측소의 경우에도 변화 경향성을 반영하고 있다. 이들 각 관측소 지하수위의 예측값과 실제값의 교차상관계수는 충주기금 0.985, 양평개군 0.991 및 영주문정 0.906 등으로서 높은 상관 관계를 보인다. 양평개군과 영주문정 관측소는 4월말이 되면서 예측 지하수위보다 실제 지하수위가 더 낮아지기 시작하였는데, 이는 가뭄이 본격적으로 시작되면서 용수 확보를 위한 지하수 신규 굴착과 과다 개발이 이 시기에 집중되기 시작하였음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 이들 지역이 충주기금 지하수 관측소와 달리 대규모 하천 주변에 관측소가 위치하지 않고 구릉지, 평야 또는 주거지 인근에 위치하거나 투수성이 낮아 주변의 인위적인 활동에 영향을 쉽게 받기 때문으로 추정된다. 이와같이, 지하수위를 활용한 단기 예측은 가뭄을 예측하는 수단으로 고려될 수 있으나, 인위적인 요인이 지하수위에 반영된다면 실제 가뭄을 왜곡할 가능성도 갖고 있다. 그러나 Fig. 7에서 보듯이 예측 후 초기 15일 정도의 단기 지하수위 변화는 표준가뭄지수의 경향 및 지하수위 실제값과 매우 잘 일치하고 있으므로, 지하수위에 의한 단기 예측 방법은 표준가뭄지수 등 타 가뭄인자의 보조수단으로서의 활용성이 높다.

a) Chungju



b) Yangpyung



c) Yeongju

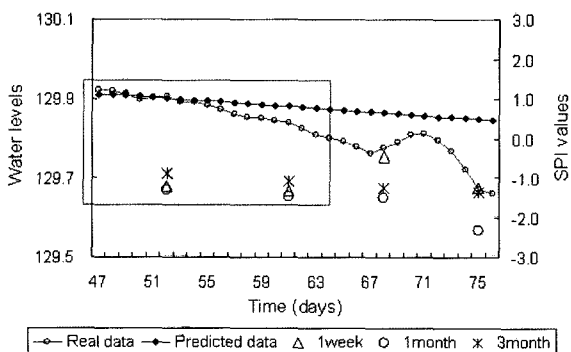


Fig. 7. Real and predicted data of groundwater levels from 16 April to 15 May in 2001.

5. 가뭄관측정(Drought-index well)의 설치 방안

지하수는 지표수와 달리 기후조건에 반응하는 시간이 상대적으로 느릴 뿐만 아니라 서서히 변화하는 특성을 갖고 있다. 결과적으로 지하수에 대한 평가와 분석은 일반적으로 연간 지하수 함양량의 분석 등과 같은 장기간의 평균 기후조건에 의존한 결과들을 도출한다. 이와 같은 장기적인 변화를 반영하는 지하수 수위는 가뭄과 같은 기후

변동 인자를 내포하고 있다.

지표 하천수량의 제한성 때문에, 가뭄의 효과를 적절하게 반영하고 있는 지하수 저류량 인자가 가뭄을 평가하는데 그 중요성을 더하고 있다. 즉, 지하수 저류량이 크다면 가뭄은 적어질 것이며, 지하수 저류량이 일정하게 유지된다면 가뭄은 큰 영향을 미치지 않을 것이다. 가뭄현상이 지하수위에 미치는 효과를 모니터링하기 위해서는 기후의 변화를 인지할 수 있는 관측정이 필요시 되며, 이들 가뭄 관측정은 기본적으로 기존 우물이나 지하수위에 영향을 미치는 인위적인 요인으로부터 상당히 떨어진 곳에 설치하는 것이 이상적이라 할 수 있다. 미국의 경우에는 USGS에서 약 150개의 기후 반응 관측정(Climat-response wells)의 네트워크를 구축하여 운영중에 있으며, 일부 주에서는 가뭄 관측정(DIW: Drought-index wells)을 구성하여 운영하고 있다. 가뭄 관측정의 관측 자료가 효과적으로 활용되기 위해서는 관측된 지하수위 데이터가 실시간 통신 시스템을 통하여 전송되어 즉각적인 분석이 이루어져야 한다(Alley, 2001; Taylor et al., 2001). 미국 펜실바니아주는 약 73개의 가뭄 관측정을 설치하여 운영중에 있으며 주의 Emergency Management Council에서는 주내에 운영중인 전체 관측정으로부터 실시간 취득된 자료를 토대로 도시별 가뭄 평가를 실시하고 있다.

가뭄 관측과 평가의 방법은 단기간의 가뭄 평가·예측과 장기간의 가뭄 평가·예측으로 구분할 수 있다. 단기간의 가뭄 평가·예측은 가뭄이 발생하기 시작한 이후 수일 또는 수주간의 지하수위 변동 자료를 토대로 향후 수일 내지 수십일의 지하수위 변화를 예측하고 관련된 가뭄의 정도를 평가한다. 본 연구의 표준강수지수와 지하수위 상관관계로부터 도출된 결과는 이와 같은 단기간의 가뭄 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 반면에, 장기간의 가뭄 평가·예측은 수년 내지 수십년간의 지하수위 변동자료를 토대로 현재의 지하수위를 평가하고 가뭄 발생 정도를 인지하는 방법에 해당한다. 장기간의 가뭄 평가는 가뭄 관측정으로부터 취득된 정보를 토대로 매월 단위로 높은 지하수위 분포, 평균 지하수위 분포 및 낮은 지하수위 분포 등을 지역별로 도시한 2차원 도면을 작성하고 이를 가뭄 예보에 활용하게 된다. 미국의 경우 가뭄 수위의 결정은 평균 수위로부터 하위 25% 구간에 해당하는 경우를 말한다. 또한 가뭄의 예보는 Normal, Watch, Warning, Emergency 등 다양한 단계별로 이루어지게 된다. 본 연구에서도 Fig. 2 및 Fig. 3에서 보듯이 예년보다 낮아지는 지하수위 변동과 시작 시점을 파악할 수 있으므로 추가 연구를 통하여 장기간의 가뭄에 대한 평가가 가능할

것으로 본다.

가뭄 관측정의 위치는 수문지질단위(Hydrogeologic unit)의 성격이 규명된 지역, 기상변화에 민감한 자유면 대수층(Unconfined aquifer) 분포지역, 주변의 인위적 양수 영향이 없는 지역, 관개·용수로 등 인위적인 함양원이 없는 지역, 장기적으로 관측정 운영이 가능한 지역 및 우물이 마르지 않는 지역 등을 대상으로 하여야 한다. 부가적으로 지하수위 강하자료의 해석을 위해서 장기간의 기존 지하수위 자료가 있어야 하며 관측정 지점에 대한 완전한 수리특성 해석자료가 있어야 한다.

한편, 외국의 경우와 마찬가지로 가뭄 관리를 위한 종합적인 대책의 구축이 필요하다. 미국의 경우에는, 가뭄 예측 및 피해경감 대책수립 등 위험관리를 위해 국가가뭄정책 최상위 기구인 국가가뭄 정책위원회(NDPC: National Drought Policy Commission)를 설립하여 가뭄을 관리하고 있으며, 국립가뭄경감센터(NDMC)에서 가뭄감시 시스템을 운영하여 매주 가뭄상황에 대한 정보를 제공하고 있다. 일본의 경우에는, 저수관리 시스템(갈수관리 시스템)을 운영하여 주요 수계 댐 및 가뭄현황에 대한 정보(기온, 강수량 등)를 제공한다. 영국의 경우에도, 국립하천공사(NRA: National Rivers Authority)에서 이수·치수·환경 등을 종합적으로 관리하고 있으며, 가뭄 정책의 초점은 가뭄재해 수습에 있고 갈수령 제도에 근거하여 추진되고 있다.

6. 결론 및 고찰

홍수와 달리 가뭄은 연속성을 갖고 있기 때문에 예측과 관리가 보다 용이함에도 불구하고 우리나라의 경우는 가뭄을 체계적으로 평가하고 예측하는 기술이 확립되지 못하고 있으며, 최근들어 정부 및 공공기관 등에서 국내 여건을 고려한 가뭄 평가 기술을 개발하고 있다(건설교통부·한국수자원공사, 2005).

본 연구 결과, 충주개금, 양평개군 및 영주문정 관측소 지역을 대상으로 표준강수지수(1개월 지속기간) 및 지하수 수위 관측자료 간의 교차상관계수를 구한 결과, 충주개금 0.843, 양평개군 0.825 및 영주문정 0.737로 분석되어 상관성이 매우 높은 것으로 나타나 지하수위의 가뭄 평가의 활용성을 파악할 수 있었다. 또한, 가뭄이 극심하였던 2001년 3월 1일부터 4월 15일까지의 지하수위 선형 변동 추세를 토대로 향후 30일 간의 수위를 예측한 결과, 실제 수위보다 예측 수위보다 다소 낮게 형성되었다. 그

러나, 예측 후 약 15일간의 단기간의 예측값은 표준강수지수의 변동 경향과 거의 일치하고 있어 과거의 기상 조건이 지속된다면 향후에 나타날 수 있는 단기간의 수위 변동을 예측하고 가뭄의 정도를 추정할 수 있을 것이다. 지속시간 3개월의 표준강수지수의 경우에는, 지하수위가 표준강수지수보다 1주일 정도 선행하는 것으로 분석되어 예측의 효용성도 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 지하수위의 가뭄 평가시 활용 가능성에 대한 사전 분석으로서, 지하수위 변동 자료가 가뭄을 평가하고 예측하는데 중요한 자료로 활용될 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 가뭄을 정확히 평가·예측할 수 있는 최적 지점을 선정하여 가뭄 전용 관측정(DIW: Drought-Index well)을 설치한다면 가뭄으로 인한 피해를 최소화하는데 기여할 것으로 본다.

참 고 문 헌

- 건설교통부·한국수자원공사, 2004a, 지하수관측연보, p. 869.
- 건설교통부·한국수자원공사, 2004b, 국가 지하수관측망 관리 시스템 보고서, p. 411.
- 건설교통부·한국수자원공사, 2005, 가뭄관리 모니터링체계 수립 보고서, p. 240.
- 오광우, 이성덕, 이우리, 2000, 시계열 분석 입문 및 응용, 탐진출판사, 서울, p. 388.
- 이명재, 김규범, 손영철, 이진용, 이강근, 2004, 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에 대한 시계열 분석 연구, 대한지질학회지, 40(3), 305-329.
- 한국수자원공사, 2001, 2001 전국 가뭄조사 보고서, p. 319.
- Alley, W.M., 2001, Groundwater and climate, *Ground Water*, 39(2), 161-165.
- Kim, G.B., 2005, Nationwide Monitoring and Assessment of Groundwater in Korea, Ph.D thesis, Seoul National University, Korea, p. 391.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J., 1995, Drought monitoring with multiple times scales, *Preprints of 9th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Dallas, TX, p. 233-236.
- Taylor, C.J. and Alley, W.M., 2001, Ground-water-level Monitoring and the Importance of Long-term Water-level Data, U.S. Geological Survey Circular 1217, p. 68.
- USGS, homepage, www.usgs.gov
- Wilhite, D.A. and Glantz, M.H., 1993, Understanding the drought phenomenon: the role of definition, *Water International*, 10, 111-120.