

# 국내 지하수 수위변동 특성 및 제주도에 적용방안

## A study on the characteristics of groundwater level change and application in Jeju island

김지옥\* · 박월배\*\*

### < 목 차 >

- |                     |             |
|---------------------|-------------|
| I. 서론               | IV. 결론 및 토의 |
| II. 지하수위 변동유형 분류    | 〈참고문헌〉      |
| III. 지하수위 변동 경향성 분석 |             |

### < 국문 초록 >

우리나라 물 이용량은 연간 약 255억 m<sup>3</sup>이며, 이 중 지하수는 약 15%에 해당하는 38억 m<sup>3</sup>을 사용하고 있다. 외국의 경우 OECD 국가들을 볼 때 평균적으로 22%를 지하수에 의존하고 있으며, 특히 음용수에 있어서는 유럽 75%, 미국 51% 등 지하수 이용비율이 매우 높게 나타나고 있다. 우리나라의 경우에도 생활수준 향상과 깨끗한 물에 대한 욕구 상승 등으로 지하수 이용량은 계속 증가할 것으로 예상되며, 이를 대비해 지하수의 철저한 관리가 매우 중요하다. 본 연구에서는 국가 지하수 관측망 중 5년 이상 장기관측자료가 축적된 관측정을 대상으로 수위변동 유형을 분류하였다. 계절형, 경사형, 계단형, 램프형, 정상형, 총동변화형의 6가지 유형을 기본으로 하고 강우에 대해 민감하게 반응하는

\* 한국수자원공사

\*\* 제주발전연구원 선임연구위원

정도와 주변지역에서의 양수의 영향을 받는 여부를 종합하여 총 24개 유형으로 분류하였다. 그 결과 계절형이 66.8% 로 가장 많으며, 다음으로 총동변화형 12.4%, 정상형 11.8%, 램프형 4%, 경사형 3.2%, 계단형이 1.7% 를 차지하고 있다. 또한, 국가지하수관측망의 일평균 수위자료에 대한 선형회귀분석을 통해 연간 변동율 0.05 m/year 를 기준으로 변동경향을 분류하였으며, 그 결과 전체 관측정의 3.5%가 수위상승, 14.7%가 수위하강 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

제주도의 경우 일찍이 지하수 관측을 시작하여 10년 이상 장기관측자료를 확보하고 있으며, 이를 활용하여 본 연구에서 분석한 바와 같이 변동 유형을 분류하고 정기적으로 추세분석 등 다양한 분석을 통해 지하수위 변동으로 인한 장애를 사전에 예방함으로써 제주도 지하수 관리에 보다 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심어:** 지하수위 관측, 수위변동 유형분류, 수위변동 경향성 분석, 선형회귀분석

## I. 서 론

### 1. 지하수 현황

수자원장기종합계획(2011, 국토해양부)에 의하면 2007년 기준으로 우리나라 수자원 총량은 1,297억 m<sup>3</sup>/년으로 이 중 연간 약 255억 m<sup>3</sup>을 이용하고 있으며, 1980년의 물 이용량(128억 m<sup>3</sup>)과 비교해 보면 30년 동안 약 2배가 증가하였다. 이 중 생활용수는 인구 증가, 생활수준의 향상 및 물이용 패턴의 변화, 상수도 보급 확대에 따라 약 4배로 증가하였으나 최근에는 인구증가를 감소, 누수량 감소 등으로 정체되는 경향을 보이고 있다. 공업용수는 산업화와 경제 발전에 따라 약 3배 증가되었고, 농업용수의 경우 약 1.6배 증가하였으나 최근 경지면적 감소에 따라 다소 감소하는 추세이다. 한편 장래 물수요 전망에 의하면 2020년에는 생활용수는 4.1% 증가, 공업용수는 53.7% 증가, 농업용수는 3.2% 감소되어 전체적으로 물수요량은 3.6% 증가된 264억 m<sup>3</sup>에 달할 것으로 예측하고 있다(표 1).

〈표 1〉 국내 연간 물 이용량 (10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/년)

구분	1980	1990	1994	1998	2003	2007	2020
수자원총량	1,140	1,267	1,267	1,276	1,240	1,297	-
물 이용량	128	216	237	260	262	255	264
생활용	19	42	62	73	76	75	78
공업용	7	24	26	29	26	21	32
농업용	102	147	149	158	160	159	154

지하수의 시설과 이용량에 대한 현황은 국토해양부와 한국수자원공사에서 지하수법 제17조의 규정에 따라 매년 발간하는 “지하수 조사연보”를 통해 파악할 수 있다. 지하수 조사연보에 의하면 2010년말 기준으로 전국에 138만개 지하수시설에서 연간 38억m<sup>3</sup>을 사용하고 있으며, 이는 우리나라 전체 물 이용량의 약 15%에 해당된다. 특히, 지하수 시설과 이용량은 꾸준히 증가하는 추세로서 본격적인 통계가 집계되기 시작한 1994년 이후 시설수는 2.2배, 이용량은 모두 1.5배 증가하였다. 연도별 지하수 변동현황을 용도별로 보면 공업용 지하수와 온천, 먹는샘물 등이 포함된 기타용 지하수는 시설수는 큰 변동이 없으며, 이용량은 오히려 감소하고 있다(표 2). 따라서, 생활용과 농업용 지하수가 전체 지하수 시설수와 이용량의 증가의 주된 원인인 것으로 판단된다.

〈표 2〉 국내 지하수 이용현황

년도	시설수(천개)					이용량(백만 m <sup>3</sup> /년)				
	계	생활용	공업용	농업용	기타용	계	생활용	공업용	농업용	기타용
1994	637	394	9	229	4	2,571	1,319	229	930	92
1995	764	463	11	286	3	2,623	1,339	211	1,018	55
1996	787	478	11	293	4	2,864	1,468	214	1,115	66
1997	946	572	12	358	4	3,243	1,597	220	1,347	79
1998	973	588	12	369	5	3,089	1,540	194	1,293	62
1999	989	601	12	370	5	3,084	1,519	178	1,320	66
2000	1,078	671	12	390	4	3,096	1,540	185	1,312	60
2001	1,110	684	13	408	5	3,210	1,600	185	1,362	63
2002	1,195	708	14	468	5	3,468	1,634	191	1,582	61
2003	1,228	721	14	487	6	3,749	1,847	197	1,659	47
2004	1,234	724	13	491	6	3,678	1,811	204	1,622	41

2005	1,270	739	14	512	5	3,717	1,799	201	1,682	35
2006	1,304	751	13	535	5	3,749	1,823	200	1,695	31
2007	1,323	758	13	547	5	3,725	1,791	184	1,721	29
2008	1,345	769	13	558	5	3,784	1,801	182	1,773	28
2009	1,364	774	13	573	4	3,807	1,786	179	1,816	26
2010	1,381	780	13	584	4	3,807	1,753	168	1,861	26

외국의 현황을 보면 (표 3)에서 보는 바와 같이 OECD에 가입된 국가들의 지하수 이용량은 통계가 작성되기 시작한 1980년대 이후 점차 증가하는 추세를 보이고 있다 (OECD, 2006-2008). 한편, 전체 물이용량 중에서 지하수가 차지하는 비율이 북미 국가들은 24%, 유럽 국가들은 21%에 이르며, OECD 전체 국가들의 평균은 22%인 것으로 보고된 바 있다(표 4). 특히, 음용수에 있어서는 지하수가 차지하는 비율이 더 높아서 유럽 75%, 미국 51%, 아시아 32%, 중남미 29% 수준인 것으로 조사된 바 있다(한국환경정책·평가연구원, 2007).

〈표 3〉 OECD 국가들의 지하수 이용량(백만 m<sup>3</sup>/년)

지역	1980	1985	1990	1995	2000	2006
북미	132,500	125,600	135,300	132,500	143,600	145,200
OECD 유럽	51,600	54,200	53,100	57,100	56,400	57,600
유럽	39,800	41,200	41,900	42,100	40,000	40,400
OECD	198,800	195,800	206,200	210,100	219,300	221,500

〈표 4〉 OECD 국가들의 담수 이용현황

지역	이용량 (백만 m <sup>3</sup> /년)	1인당 이용량 (m <sup>3</sup> /capita)	지표수 비율(%)	지하수 비율(%)
북미	596,300	1,400	76	24
OECD 유럽	277,600	530	79	21
유럽	207,600	550	81	19
OECD	1,008,000	870	78	22
세계	3,830,000	610	-	-

이와 같이 외국의 지하수 현황과 비교해 볼 때 우리나라의 경우 전체 물 이용량 중 지하수가 차지하는 비율이 아직도 낮은 실정이며, 특히 생활수준의 향상과 깨끗한 물에 대한 국민 욕구 상승, 수자원 총량 증대 노력 등의 이유로 지하수 이용은 더욱 많아질 것으로 예상된다. 특히, 우리나라의 경우 지하수 개발가능량(Sustainable yield)은 연간 108.5억 m<sup>3</sup>, 이용량은 38억 m<sup>3</sup> 으로서 개발가능량의 35% 수준에서 지하수를 이용하고 있는 상황으로서 향후 추가 이용의 여지는 충분하다고 볼 수 있다.

지하수는 지표 아래 부존하고 있어 육안으로 상태를 확인할 수 없으며, 유동 속도가 지표수에 비해 매우 느린 특성상 한번 오염되면 원상태로 회복하는 것이 거의 불가능하고, 무계획적인 지하수 이용은 지반을 약화시켜 지반침하를 유발하는 등 체계적인 관리 기반을 마련한 후 철저한 조사와 평가를 거쳐 이용하여야 지하수 장애를 예방하고 지속 가능한 이용이 가능하다. 다행히 정부에서는 지하수의 중요성에 대한 인식을 가지고 지하수법을 제정하고, 지하수 관리기반 마련을 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 국토해양부에서는 지하수관리 기본계획의 수립, 전국을 대상으로 한 지하수 기초조사의 수행, 지하수관측망의 설치운영, IT 기술을 활용한 지하수 자료의 정보 관리 등 여러 가지 사업을 추진함으로써 체계적인 관리의 기반은 갖추게 되었으며, 환경부에서는 수질측정망의 운영, 오염지하수의 정화 등 수질관리를 위해 노력하고 있다.

그러나 우리나라는 오랜 기간 지표수에 편중된 수자원정책을 추진하여 온 관계로 지하수에 대한 인식이 매우 왜곡되어 형성되어 있다. 국가 예산 편성에 있어서도 2011년 국토해양부의 수자원부문 예산이 5조원을 상회하고 있으나, 우리나라 전체 물 사용량의 15%를 담당하는 지하수 부문 예산은 150억원 수준으로 수자원부문 전체 예산의 0.3%에 불과한 실정이며, 이와 같은 현실은 1970년대 이후 급속한 경제성장으로 인해 단기간에 다량의 수자원을 확보해야 하는 여건상 지표수 위주의 수자원개발을 추진한 결과이다. 특히 우리나라 지하수 개발의 역사상 농업용수를 육성하기 위해 값싼 전기를 이용하여 지하수를 대량으로 개발, 농업용수로 공급하기 위해 본격적으로 지하수를 개발함에 따라 이후 지하수는 관개시설이 미비한 지역의 농업용수, 수도가 공급되는 가정 또는 업소의 허드렛물 등으로 그 위상이 전락하였으며, 지하수 개발도 정부나 지자체 등 공공부분의 방치 하에 대부분 개인에게 맡겨 두고 있는 실정이다. 이와 같은 현실은 공공 부분에서

지하수를 개발하고 수질에 따라 차별적으로 관리함으로써 용도에 맞게 효율적으로 이용하는 선진 외국의 경우와는 매우 대조적인 상황이다. 근래 들어 우리나라도 국민 소득 증가에 따라 양질의 물에 대한 욕구 증가로 암반 대수층 지하수를 수원으로 하는 먹는 샘물의 판매량이 1995년 연간 409 천 $m^3$ 에서 2006년 2,600 천 $m^3$ 으로 약 6.5배가 증가하였으며, 세계 물 위기(Global water crisis; UNESCO, 2006)속에서 빙하를 제외하면 음용수(fresh water)의 96%를 공급할 수 있는 능력을 가지고 있는 지하수에 대한 관심이 증가하고 있다(Shiklomanov and Radda, 2003). 이에 따라 국내에서도 가뭄 등 자연재해에 대비한 비상수원으로 지하수를 활용하고자 하는 노력이 많아지고 있는 실정이고, 선진국의 사례를 통해서 예상할 수 있듯이 이와 같은 추세는 향후 지속될 전망이다. 이와 같은 상황에서 향후 예상되는 지하수 수요 증가에 대비하여 국내 지하수에 대한 정확한 이해를 바탕으로 체계적이고 과학적인 지하수 관리가 반드시 필요하다.

## 2. 지하수 관측 개요

지하수 관측은 기본적으로 수위와 수질의 변동 상황을 감시함으로써 체계적인 관리를 통해 안정적으로 지하수를 이용하기 위해 실시한다. 이 외에도 지하수 관측자료는 대수층의 수리특성 및 지하수위 분포 파악, 장단기 지하수 함양 및 저장능력 변동 감시, 기후변화와 지하수 개발에 따른 영향 모니터링, 지하수위 변동에 대한 지구통계학적 분석, 지하수-지표수 상호작용 분석, 지하수 흐름 또는 오염물질 거동 모델링 등에 활용되며, 각각의 목적에 따라 관측주기를 달리하여 운영하게 된다(USGS, 2001)

지하수 관측망은 목적과 역할에 따라 1차 지하수 관측망(primary groundwater monitoring network), 2차 지하수 관측망(secondary groundwater monitoring network), 일시 지하수 관측망(temporary groundwater monitoring network)으로 구분할 수 있다.

1차 지하수 관측망은 전국적인 지하수 관측의 기준이 되는 관측망으로서 광역적인 규모의 지하수 정보를 제공하여 국가 차원의 지하수관리 정책을 수립하는데 사용되며, 국토교통부(한국수자원공사)에서 설치, 운영하고 있는 국가지하수관측망과 환경부에서 운영하고 있는 지하수수질측정망이 1차 지하수 관측망에 해당된다.

2차 지하수 관측망은 1차 지하수 관측망을 보조하는 역할을 하며, 국지적인 지역의 지하수 변동을 관측하기 위해 운영되며, 지역별 수문지질 특성, 수질 특성, 지하수 이용 패턴에 따라 특성에 적합한 형태로 운영된다. 국내에는 각 지방자치단체에서 설치, 운영하고 있는 보조지하수관측망, 농림수산식품부(한국농어촌공사)에서 운영하고 있는 해수침투관측망, 환경부에서 운영하고 있는 먹는샘물관측망 등이 2차 관측망에 해당된다.

임시 지하수 관측망은 특정 지하수 조사나 연구를 위해 설치, 운영되는 관측망으로서 목적에 맞게 설치, 운영된 후 폐쇄되거나 1차 지하수 관측망 또는 2차 지하수 관측망으로 전환되어 운영되기도 한다. 지하수법 제5조에 의한 지하수 기초조사, 지하수법 제7조에 의한 지하수 영향조사 등을 위해 설치되는 관측정이 임시 지하수 관측망에 해당된다. 국내 설치운영 중인 지하수 관측망 현황은 (표 5)와 같다.

〈표 5〉 국내 지하수 관측망 현황

관측망의 종류		주관	갯수	관측방법	관측망목/주기
1차 관측망	국가 지하수 관측망	국토교통부	374	자동	<ul style="list-style-type: none"> <li>지하수위, 수온, EC/1시간</li> <li>수질/연간 2회</li> </ul>
	지하수 수질 측정망	환경부	2,457	수동	<ul style="list-style-type: none"> <li>62~20 항목/연간 2~4회</li> </ul>
2차 관측망	보조 지하수 관측망	지자체	1,067	자동 혹은 수동	<ul style="list-style-type: none"> <li>지하수위, 수질</li> </ul>
	해수침투 관측망	농림수산 식품부	192	자동	<ul style="list-style-type: none"> <li>지하수위, 수온, EC/1시간</li> </ul>
	먹는샘물 관측망	환경부	77	자동	<ul style="list-style-type: none"> <li>지하수위, 수온, EC, pH/1시간</li> </ul>

### 3. 관측자료의 활용

국가지하수관측망은 1995년 15개 지하수관측소 설치를 시작으로 매년 30여개씩 추가로 설치하여 2012년 현재 374개 관측소가 설치되어 있으며, 1시간 간격으로 자동 측정된 수위자료들은 일평균으로 환산하여 1년간의 자료를 취합한 지하수 관측연보를 발간

하고 있다. 이와 같은 자료들은 기본적으로 우리나라 지하수위 현황 파악 뿐만 아니라 지하수 함양량 산정, 지하수위 변동특성 분석 등 각종 연구 분야와 지하 굴착 공사 발생 되는 지하수 유출 제어 등 여러 분야에서 활용되고 있다. 한편, 국가지하수관측망 설치가 시작된 지 15년이 넘어가면서 일부 지하수 관측망의 경우 장기 관측자료가 확보됨에 따라 이를 활용한 다양한 지하수 관리정책의 추진이 가능해 졌다.

지하수위 관측자료는 대수층에 미치는 수문학적 충격이 지하수의 함양, 저장, 배출에 미치는 영향을 이해하는데 가장 중요한 자료이다. 지하수위를 관측하는 목적은 매우 다양하며, 각각의 목적에 따라 필요한 수위관측 기간이 서로 다르다. 예를 들어 대수성 시험을 통한 대수층의 수문특성 파악과 지하수 등수위선 작성 등에는 일주일 정도의 관측자료가 필요하며, 장기적인 지하수 함양량 또는 저장량의 변화를 관찰하고 지하수 개발로 인한 광역적인 변화와 이로 인한 지반침하, 지하수위 고갈 등을 감시하고자 하는 경우에는 10년 정도 축적된 장기관측 자료가 필요하다(USGS, 2001).

일찍이 지하수 관측을 시작한 선진 외국에서는 장기간의 관측자료가 축적되어 적절한 분석을 통해 지하수를 효과적으로 관리하고 있다. 미국 펜실베니아는 1930년대 극심한 가뭄으로 지하수위가 강하한 이후 지하수위 변동을 관측하기 위한 네트워크를 구축하기 시작하여 현재 미국 지질조사소(USGS)에서 50개의 관측망을 운영하고 있다. 이 관측망의 가장 큰 목적은 지하수위 상태를 토대로 가뭄 여부를 판단하는 것이다. 즉, 관측된 장기간 관측된 지하수위 자료의 30일 이동평균을 가지고 월별로 백분위수 그래프를 작성하여 개별 지점의 월별 가뭄 경고(warning)와 위급(emergency) 기준 수위를 제시함으로써 현재 지하수위의 상태를 판단하는데 활용하고 있다(USGS, 2001). 영국의 경우에는 매년 수문보고서(Hydrological review-Groundwater, Environmental Agency) 발간을 통해 장기 관측자료의 월별 최대값, 최소값과 최근 5년간의 시계열자료를 중첩하여 현재 지하수위 상태를 파악하고 있으며, 이와 별도로 대수층별로 지하수위 변동량을 등급화(ranking)하여 공간적으로 도시하고 있다. 한편, 가뭄 발생시에는 과거 수위변동 자료를 이용하여 수위변동 범위를 파악한 후 가뭄 기간의 지하수위 시계열도를 중첩하여 가뭄이 지하수위 변화에 미친 영향을 파악하는데 활용하기도 한다.

우리나라의 경우 지하수법 제17조의 규정에 의하면 정부에서 관리하는 국가지하수 관



측망과 각 지자체에서 관리하는 보조지하수관측망을 운영한 결과 지하수위가 지속적으로 낮아지는 것으로 판단되는 경우에는 원인분석과 대책마련을 위한 세부적인 조사를 실시하여야 하며, 그 결과 필요하다고 인정되는 경우에는 지하수 보전구역으로 지정하는 등 적절한 조치를 취하도록 규정하고 있다. 이에, 국토교통부와 한국수자원공사는 지난 2005년부터 국가지하수관측망 운영 결과를 토대로 지하수위 하강 및 수질오염 등이 우려되는 지역에 대한 정밀조사를 실시하고 있으며, 2011년까지 수위하강 19개 지역, 수질오염 15개 지역에 대한 조사를 시행하고 대책을 제시한 바 있다(국토해양부-한국수자원공사, 2005, 2006, 2009, 2010, 2011).

특히, 2005년 시행한 “지하수 장해우려지역 조사 및 대책방안 연구”에서는 지하수 수위강하로 인한 장해우려지역을 선정하는 기준(안)을 제시한 바 있다(국토해양부-한국수자원공사, 2005). 동 연구에서는 지하수위 관측자료에 대하여 상자도식 방법, 모수적 선형추세 분석, 비모수적 추세분석을 실시하여 각각의 분석결과에 대해 점수를 부여하고 이를 합산함으로써 최종 합산점수에 따라 경고(Warning), 주의(Watching), 정상(Normal)으로 구분하여 관리하는 기준을 제시하였다. 상자도식 방법은 두 가지로 구분하였다. 먼저 전체 관측자료의 일평균 자료를 상자도식(Box-plot)으로 표현하고 10 백분위수 미만, 10 - 25 백분위수, 25 - 75 백분위수, 75 - 90 백분위수, 90 백분위수 초과 등으로 구분한 후 분석대상 연도의 지하수위 자료를 산술평균하여 중첩함으로써 현재 수위상태를 분석하였다(B-1 method). 다른 방법으로 전체 관측자료를 월별로 구분하여 상자도식하고 분석 대상연도의 관측자료의 시계열도를 작성하여 중첩함으로써 현재 수위상태를 파악하였다(B-2 method). 모수적 선형추세 분석은 최소제곱법(least squares method)을 사용하여 추세선을 도식하고 직선의 기울기와 결정계수( $r^2$ )를 토대로 수위 변동추세를 분석하였다(PT method). 비모수적 추세분석(NPT method)은 Sen's trend method 와 Mann-Kendall trend test 를 통해 수위의 변동경향을 분석하였다. 그러나 이와 같은 방법은 정부나 지자체에서 지하수관리를 담당하는 인력이 높은 전문성을 보유하고 있지 못한 현실을 감안할 때 적용이 어려운 부분이 있으며, 특히 모수적 선형추세분석과 비모수적 추세분석은 서로 비슷한 결과를 제시하고 있기 때문에 중복 분석으로 인한 행정력 낭비의 우려가 있다.

이에 본 연구에서는 국내 지하수의 변동 상황을 감시하기 위해 전국에 균등하게 설치하여 운영되고 있는 국가지하수관측망 중에서 5년 이상 관측자료가 축적된 관측정을 대상으로 일평균 수위에 대한 시계열도를 작성하고, 이를 토대로 수위 변동 유형을 분류하고 선형회귀분석을 통해 수위변동 추세를 분석함으로써 지하수위 하강으로 인한 지하수장해를 사전에 인지하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 하며, 또한 제주도에서 운영하고 있는 지하수 관측망의 관측자료의 분석에 적용 가능성을 제안하고자 한다.

## II. 지하수위 변동유형 분류

본 연구에서는 전국에 설치된 478개 지하수 관측정 중 5년 이상 장기관측자료가 확보된 346개 관측정을 대상으로 일평균 지하수위 자료의 시계열도를 작성하여 수위 변동유형을 분류하였다. 분석에 사용된 관측정 중 암반층 관측정은 226개, 충적층 관측정은 120개이다.

그 동안 지하수위 관측자료의 시계열분석을 통해 변동유형을 분류하는 시도는 몇 차례 있었다. 송성호 외(2007)는 해수침투관측망의 45개 관측정 수위자료를 가지고 Montgomery et al. (1990)의 6가지 분류법을 기본으로 하여 보다 세부적인 분류를 시도한 바 있다. 즉, 정상형(constant process)은 변동폭이 거의 없이 일정한 경우와 일반적인 정상형으로 구분하고, 선형추세형(linear trend)과 경사변화형(ramp)은 상승과 하강으로 분류하였으며, 주기형(cyclic variation)은 일주기, 연주기, 조석주기로 분류하고, 충동형(impulse)은 양수에 의한 영향과 지표수에 의한 영향으로 세분하였다. 여기에 각 유형별로 수위 변동폭을 2m 기준으로 하여 2가지 그룹으로 분류하였다. 한편, 한국수자원공사(2004)에서는 지하수 수위가 강우에 반응하는 정도에 따라 민감하게 반응하는 형태, 일정 시차를 가지고 완만하게 반응하는 형태, 강우와 특별히 상관성이 나타나지 않는 형태 등 3가지로 형태로 구분하고, 부가적으로 인위적인 양수에 의한 영향을 받고 있는지 여부에 따라 2가지 형태를 적용하여 총 6가지 유형으로 분류한 바 있다. 본 연구에서는 5년 이상 장기 관측자료가 확보된 346개 관측정(암반층 관측정 226개, 충적층 관측정

120개)을 대상으로 하여 기존 분류 방법에 대한 검토와 국가지하수관측망 수위자료의 시계열분석을 통해 새로 수위변동 유형을 분류하였다.

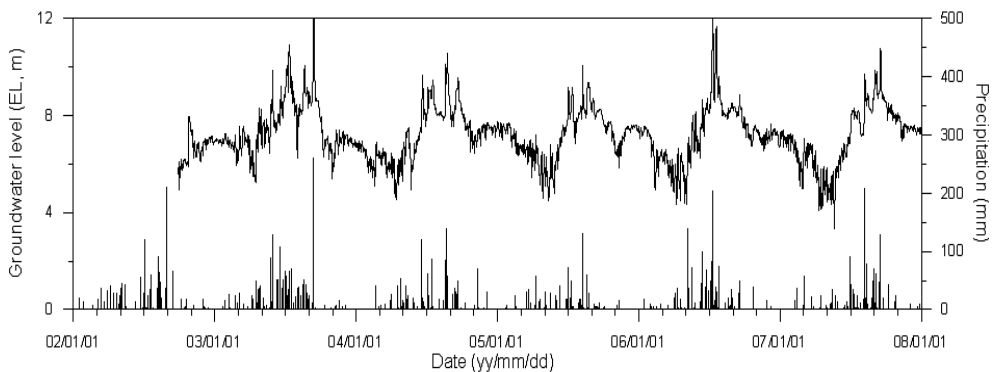
지하수위의 변동은 기본적으로 강우나 하천수위 등 자연적인 원인과 인근지역에서의 양수, 유출 또는 인공함양 등 인위적인 원인에 의해 발생된다. 다만, 대수층의 특성에 따라 이와 같은 원인들에 대한 수위의 반응형태가 서로 다르고 이는 장기적인 관측자료에서 특징적인 변동유형으로 나타나게 된다. 본 연구에서는 지하수위 변동유형 분류시 일반적으로 사용되는 Montgomery et al. (1990) 의 분류법을 준용하여 1차적으로 계절형(seasonal), 경사형(inclination), 계단형(step), 램프형(ramp), 정상형(constance), 충동변화형(impulse) 등 6가지로 분류하였다. 계절형은 연간 강우패턴에 따라 호우기와 갈수기가 구분되어 상승과 하강을 계절적으로 반복하는 유형이다. 경사형은 단기적으로 자연적, 인위적인 영향을 받는 경향을 감안하지 않고 장기적인 수위자료를 토대로 판단할 때 변동 패턴이 꾸준한 수위 하강 또는 상승 경향을 보이는 유형이다. 계단형은 일상적인 변동양상을 보이다가 특정 이벤트에 의해 수위가 급격히 변하고 이후 일상적인 변동양상으로 되돌아 가는 유형이다. 램프형은 경사형의 변동양상을 보이다가 다시 이전의 정상적인 변동 형태로 복귀하는 유형이다. 정상형은 자연적, 인위적인 영향을 받지않고 항상 비교적 일정한 수위를 유지하는 형태이며, 강우나 주변지역 양수에 일시적으로 반응하기도 하지만 반응 정도에 따라 충동변화형과 구분하였다. 충동변화형은 강우나 주변지역 강우에 급격한 반응을 보이는 유형으로 정상형과 유사하지만 외부 요인에 의한 반응이 심하게 나타나는 것으로 구분된다. 충동변화형은 주변지역의 양수에 의해 영향을 받은 경우가 대부분이며 양수에 의한 영향을 받지 않고 강우에 의한 영향만을 받는 충동변화형의 경우 계절형과 구분이 쉽지 않으나 호우기, 갈수기 구분 없이 강우사상별로 반응함으로써 전반적인 상승과 하강유형을 보이지 않는 유형을 충동변화형으로 구분하였다. 또한 양수에 의한 영향을 받는 경우에는 정상형과 구분이 쉽지 않으나 반응하는 정도가 심한 경우 충동변화형으로 구분하였다. 한편, 이와 같이 분류한 6가지 수위변동 유형을 기본으로 하여 수위변화에 영향을 주는 여러 자연적, 인위적 요인 중 가장 큰 영향을 미치는 강우와 주변지역의 양수로 인한 영향을 추가하여 수위변동 유형을 세분류하였다.

강우는 어떤 형태로는 지하수위 변화에 영향을 주게 되며, 대수층과 대수층 상부의 암

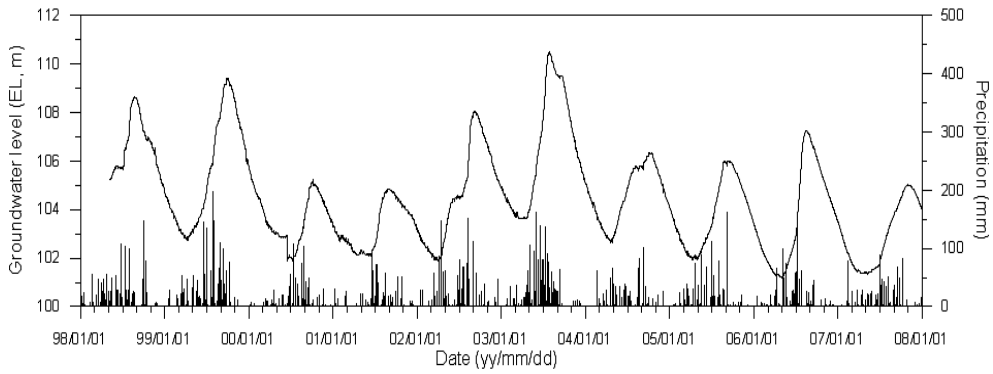
반, 토양 등의 수문지질특성에 따라 지하수위가 민감하게 반응하거나 둔감하게 반응하는 형태로 나타난다. 또한 지하수위에 영향을 주는 인위적인 요인 중 대표적인 것이 주변지역에서의 지하수 양수이며, 양수로 인한 영향의 유무로 구분할 수 있다. 여기서 주변지역에서의 양수로 인한 영향이 없는 것으로 분류되는 사례는 실제 양수가 이루어지고 있음에도 불구하고 수위변화에 영향이 없는 경우와 주변에 양수정이 없는 경우가 모두 포함된다. 이와 같은 요인들을 반영하여 6가지 기본적인 수위변동 유형별로 각각 강우에 민감하게 반응하는 유형(1), 둔감하게 반응하는 유형(2), 양수에 영향을 받은 유형(a), 양수에 영향을 받지 않은 유형(b) 등 4가지 세분류를 적용하여 총 24가지로 지하수위 변동유형을 분류하였다(표 6, 그림 1~8).

〈표 6〉 지하수위 변동유형 분류

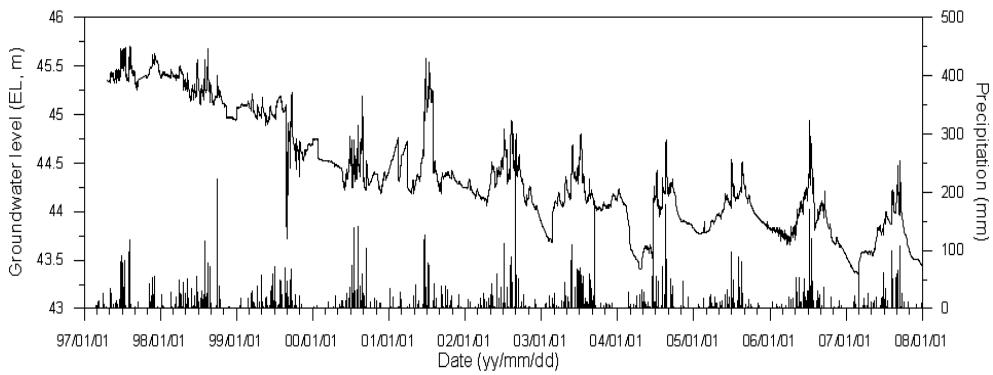
유형	강우에 민감하게 반응하는 유형		강우에 둔감하게 반응하는 유형	
	양수에 영향을 받음	양수에 영향을 받지 않음	양수에 영향을 받음	양수에 영향을 받지 않음
계절형	S1a	S1b	S2a	S2b
경사형	I1a	I1b	I2a	I2b
계단형	St1a	St1b	St2a	St2b
램프형	R1a	R1b	R2a	R2b
정상형	C1a	C1b	C2a	C2b
충동변화형	P1a	P1b	P2a	P2b



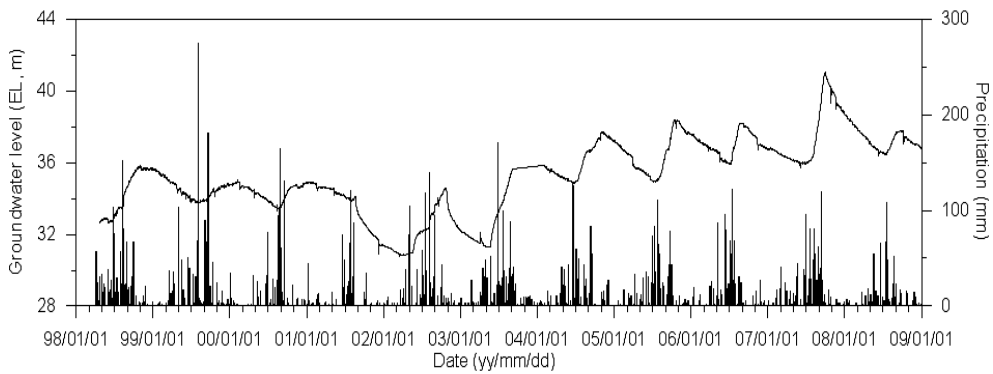
〈그림 1〉 의령의령 관측소의 지하수위 시계열도(S1; 강우에 민감하게 반응하는 계절형).



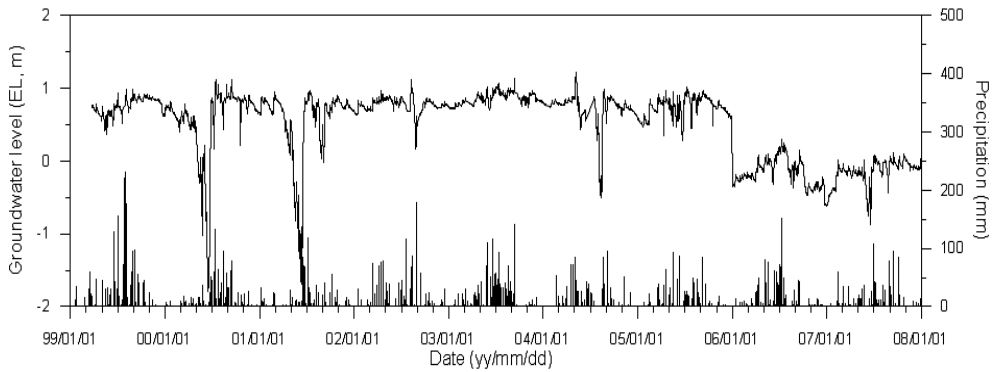
〈그림 2〉 부산동대신 관측소의 지하수위 시계열도(S2: 강우에 둔감하게 반응하는 계절형).



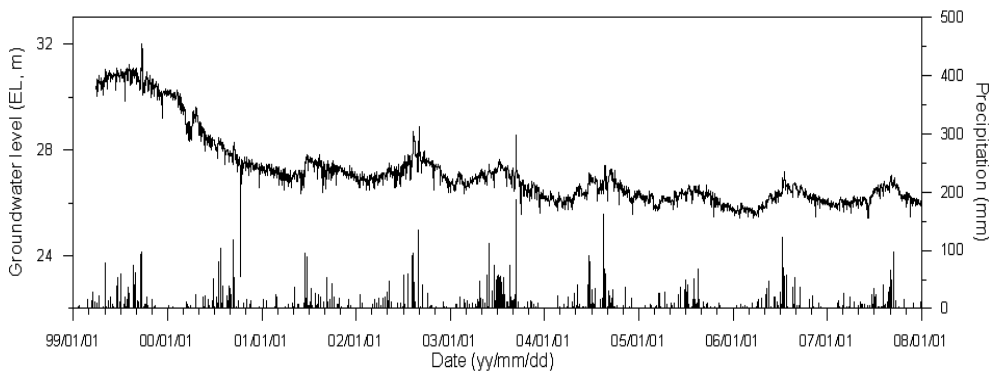
〈그림 3〉 합천합천 관측소의 지하수위 시계열도(I1: 강우에 민감하게 반응하는 경사형).



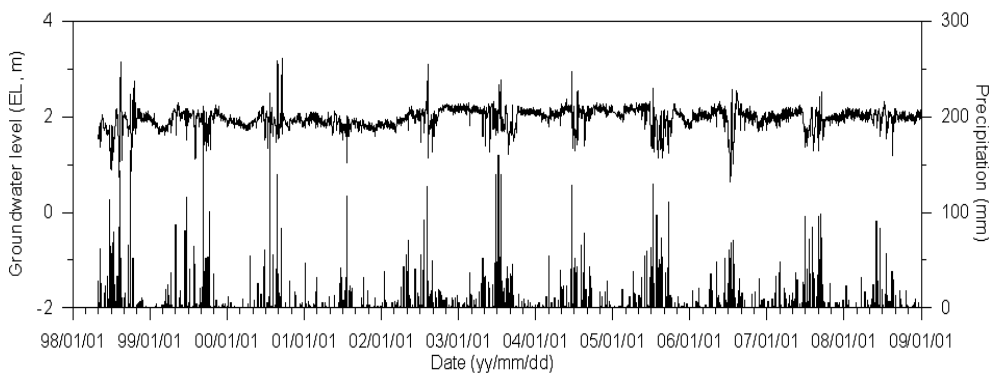
〈그림 4〉 흥성흥성 관측소의 지하수위 시계열도(I2: 강우에 둔감하게 반응하는 경사형).



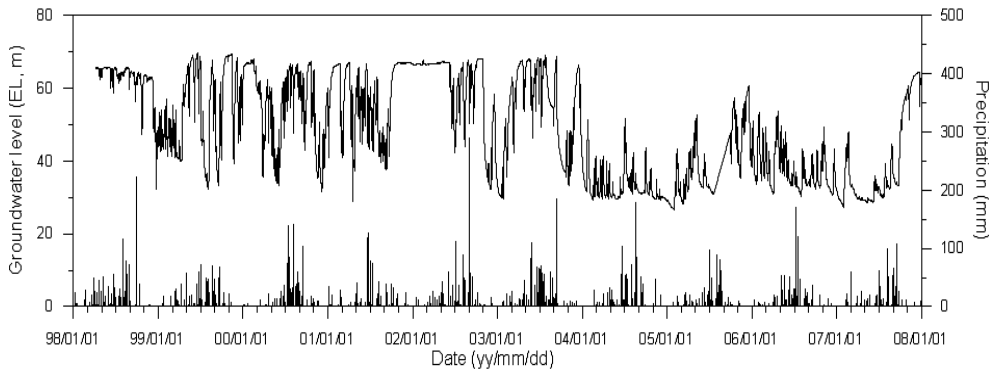
〈그림 5〉 통영용남 관측소의 지하수위 시계열도(St1: 강우에 민감하게 반응하는 계단형).



〈그림 6〉 대구대봉 관측소의 지하수위 시계열도(R2: 강우에 둔감하게 반응하는 램프형).



〈그림 7〉 부여양화 관측소의 지하수위 시계열도(C1: 강우에 민감하게 반응하는 정상형).



〈그림 8〉 의령봉수 관측소의 지하수위 시계열도(P1: 강우에 민감하게 반응하는 총동변화형).

수위변동 유형 분류 결과 계절형으로 분류된 관측정은 전체 관측정의 66.8%인 231개로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 총동변화형 43개(12.4%), 정상형 41개(11.8%), 램프형 14개(4.0%), 경사형 11개(3.2%), 그리고 계단형으로 분류된 관측정은 6개(1.7%)에 불과하다. 이와 같은 결과를 전국을 한강권역, 낙동강권역, 금강권역, 영산강·섬진강권역으로 구분하여 권역별로 유형 분포를 검토한 결과, 전국적인 유형별 분포와 큰 차이 없이 각 권역별로 유사한 분포를 보이는 것으로 분석되었다. 한편, 수위변동 유형과 관계없이 강우에 민감하게 반응하는 관측정은 전체의 72.5%인 251개 관측정이고, 강우에 둔감하게 반응하는 관측정은 95개이다. 또한 주변지역에서의 양수 등 인위적인 영향을 받는 관측정을 분류한 결과 전체의 24.6%인 85개 관측정은 영향을 받고 있었으며, 나머지 75.4%에 해당하는 261개 관측정은 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다(표 7).

수위변동 유형은 암반층과 충적층이 큰 차이를 보이지 않으며, 특히 암반층과 충적층 관측정이 모두 설치된 120개 관측소 중에서 수위변동 유형이 다르게 나타나는 관측정은 14개에 불과하다. 이와 같은 결과는 우리나라 대수층이 암반층과 충적층이 서로 긴밀히 연결되어 있어 두 대수층 사이에 지하수의 이동이 원활히 이루어지고 있거나, 아니면 암반층 관측정 설치 공사 과정에서 충적층 지하수 유입을 막기 위해 실시한 그라우팅 작업이 부실하게 시공되어 충적층 지하수가 암반층으로 유입된 것이 원인일 수 있을 것으로 추측된다.

수위변동 유형은 지하수 관리에 반영하여 각 유형별 적절한 관리에 활용할 수 있다. 계절형과 정상형과 같은 유형의 경우 지하수위의 큰 변동 없이 안정된 상태를 유지하고 있는 유형으로 향후 변동 상황을 지속적으로 감시하는 것으로 충분하다. 경사형의 경우 수위변동의 원인을 분석하고 특히, 수위가 하강하는 경사를 보이는 경우에는 원인을 파악하고 즉각 대처할 필요가 있다. 계단형의 경우 급격한 수위변화를 보인 후 안정된 상태이지만 가능하면 과거의 수위변동 원인을 파악하고 향후 재발 방지를 위한 관리를 할 필요가 있다. 충동변화형의 경우에는 특히 주변지역 양수에 의해 충동적인 수위변화가 빈번하게 나타나는 경우 원인을 파악하고 수위강하로 발전하지 않도록 제어할 필요가 있다. 램프형의 경우 경사형 유형을 보이다가 안정된 상태를 유지하는 경우로서 과거 경사형 유형이 발생한 원인을 분석하고 현재 그 원인이 제거되었는지 여부를 파악하는 한편 경사형 유형이 재현되는지 지속적으로 감시할 필요가 있다.

〈표 7〉 국가 지하수 관측망의 수위변동 유형 분류

유형	암반층 관측정					충적층 관측정					
	계	한강 권역	낙동강 권역	금강 권역	영산강·섬진강 권역	계	한강 권역	낙동강 권역	금강 권역	영산강·섬진강 권역	
계		226	43	69	64	50	120	23	39	32	26
계절형	sum	146	26	46	41	33	85	16	28	24	17
	S1a	19	2	9	3	5	13	-	9	1	3
	S1b	78	11	22	27	18	49	7	14	16	12
	S2a	5	3	2	-	-	3	2	-	1	-
	S2b	44	10	13	11	10	20	7	5	6	2
경사형	sum	7	1	2	2	2	4	1	2	1	-
	I1a	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-
	I1b	3	-	2	-	1	2	-	2	-	-
	I2a	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
	I2b	3	1	-	1	1	1	1	-	-	-
계단형	sum	6	1	4	-	1	-	-	-	-	-
	ST1a	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-
	ST1b	2	-	1	-	1	-	-	-	-	-
	ST2a	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	ST2b	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
램프형	sum	11	3	5	2	1	3	1	1	1	-
	R1a	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-
	R1b	7	3	3	1	-	3	1	1	1	-



	R2a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	R2b	2	-	-	1	1	-	-	-	-	-
정상형	sum	26	6	4	8	8	15	4	4	3	4
	C1a	5	2	1	2		2	2	-	-	-
	C1b	18	3	3	6	6	11	2	3	3	3
	C2a	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2b	2	-	-	-	2	2	-	1	-	1
총동변화형	sum	30	6	8	11	5	13	1	4	3	5
	P1a	16	3	6	5	2	5	-	2	1	2
	P1b	8	2	1	3	2	5	-	1	2	2
	P2a	6	1	1	3	1	3	1	1	-	1
	P2b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

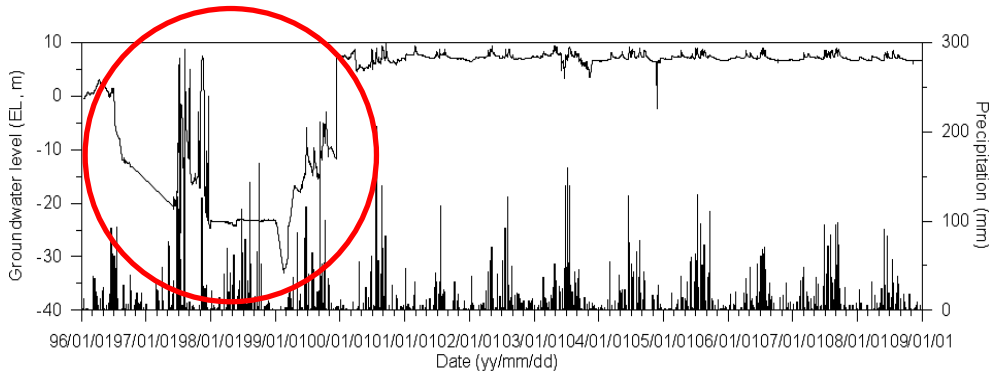
### Ⅲ. 지하수위 변동 경향성 분석

지하수위 관측의 가장 중요한 목적중의 하나인 수위 변동 경향을 파악하기 위해 지하수위 자료의 시계열도를 작성, 분석하였다. 전체 관측자료를 대상으로 작성된 시계열도는 수위의 상승과 하강에서 극대, 극소값이 명확히 나타나고 정보의 손실여부와 이상값을 판단하는데 유리하나 장기추세 및 주기변동 판단에 불리하고 분석자료가 방대해 지는 단점이 있다. 일평균 자료는 가장 일반적인 자료의 제공 주기로서 기압이나 조석과 같은 일주기 변동의 영향이 없어 강우, 양수 등 개별 사건의 변동 상태와 영향을 파악하는데 유리하고 통계 처리에 활용하는데 편리한 반면, 장기적인 변동 추세 및 주기 변동을 파악하는데 불리하다. 반면 월평균 자료는 분석 자료가 단순해지고, 장기적인 변동추세와 변동주기를 판단하는데 유리한 반면, 양수나 강우 등 단기적인 변동을 분석하기 어려우며 변동폭이 크게 줄어드는 특징이 있다. 본 연구에 사용된 지하수위 관측자료는 1시간 간격의 자료를 토대로 하여 일평균 및 월평균 수위로 전환하여 시계열도를 작성하였으며, 관측소 인접 기상대의 강우자료를 중첩함으로써 강우가 지하수위 변동에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

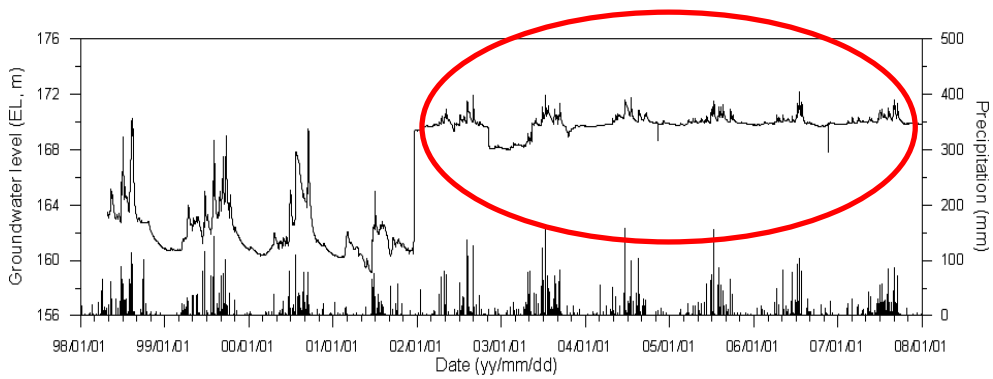
지하수위 변동의 경향성을 분석하기 위해 선형추세 분석을 실시하였다. 선형추세분석은 직선을 이용한 선형회귀(linear regression) 방법으로 최소제곱법(least square method)을 이용하여 추세선을 도출하게 된다. 선형회귀 분석에서 나타나는 직선은 기울기와 절

편으로 표현하고 기울기는 변동율을 나타내게 되며 결정계수( $r^2$ )는 선형추세분석의 적합도 또는 설명력을 보여준다. 선형추세분석은 자료의 변동폭이 크고 불규칙하더라도 지하수위의 장기적인 상승·하강 여부와 변동율을 간편하고 효율적으로 판단할 수 있는 방법으로 지하수위 관측을 시행하고 있는 외국 여러 국가에서도 선형추세분석을 통해 수위변동 경향을 파악하고 있다(USGS, 2001; Thamke, 2000).

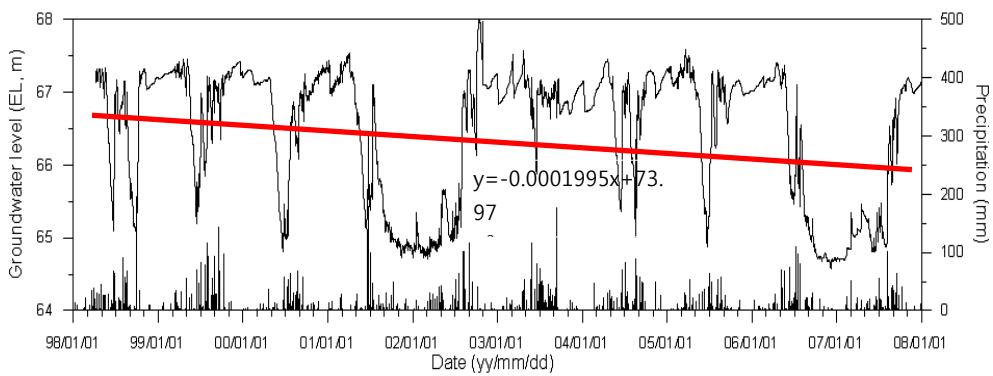
본 연구에서는 일평균 수위자료를 가지고 시계열도를 작성한 후 선형회귀 분석을 통해 추세선을 도출하고, 여기서 나타난 지하수위 연간 변동율을 토대로 수위변동 경향을 검토하였다. 우선 지하수위 연간 변동율이 0.05 m/year 이상인 관측정을 상승 또는 하강 경향이 있는 관측정으로 1차 분류하고, 관측정별 수위 변동 유형을 감안하여 시계열도를 재검토 함으로써 최종적으로 변동 경향을 결정하였다. 지하수위 변동 유형을 보면 관측 개시일로부터 지속적으로 동일한 변동 유형을 보이는 관측정이 있는 반면에 특정시점을 기점으로 변동 유형이 바뀌는 경우가 있기 때문에 선형 추세분석 결과를 토대로 육안으로 시계열도를 확인하는 과정이 필요하다. 수위자료의 시계열도를 보면 관측초기 매우 불규칙한 변동 양상을 보이다가 일정시점부터 안정적인 유형을 보이는 관측정이 있는데, 이는 지하수 관측 초기에 기술력의 부족으로 관측장비가 안정화 되지 못하여 나타난 경우로서 이와 같은 경우에는 추세분석을 함에 있어 초기의 관측자료를 배제하였다(그림 9). 또한 특정시점에 계단형의 급격한 수위의 상승, 하강이 있을 후 안정화되는 사례도 있는데 이 경우 전체 자료를 가지고 선형 회귀분석을 할 경우 상승 또는 하강의 경향이 나타나는 것으로 보인다(그림 10). 이러한 자료는 관측소 점검정비시 관측장비를 인양한 후 재설치하는 과정에서 초기 수위의 입력 오류일 가능성이 있어 이 경우에는 관측소 점검정비 일자를 확인을 통해 입력 오류로 판단되면 계단형 변동이 나타난 이후의 자료를 토대로 추세분석을 실시하였다. 마지막으로 비교적 일정하게 수위를 유지하고 있으나 주변지역의 양수로 인해 급격한 수위의 하강과 원상태로의 회복을 반복하는 경우가 있는데 이와 같은 유형은 선형 회귀분석을 하면 하강하는 추세로 나타내게 된다(그림 11). 이 경우 육안으로 시계열도를 직접 확인함으로써 변동 경향을 결정할 필요가 있다. 반면에 연간 변동량은 크지 않으나 경사형 유형을 보이면서 지속적으로 상승 또는 하강하는 경우가 있는데 이와 같은 경우는 연간 변동량이 기준에 미달하여도 경향성이 있는 관측정으로 분류하였다(그림 12).



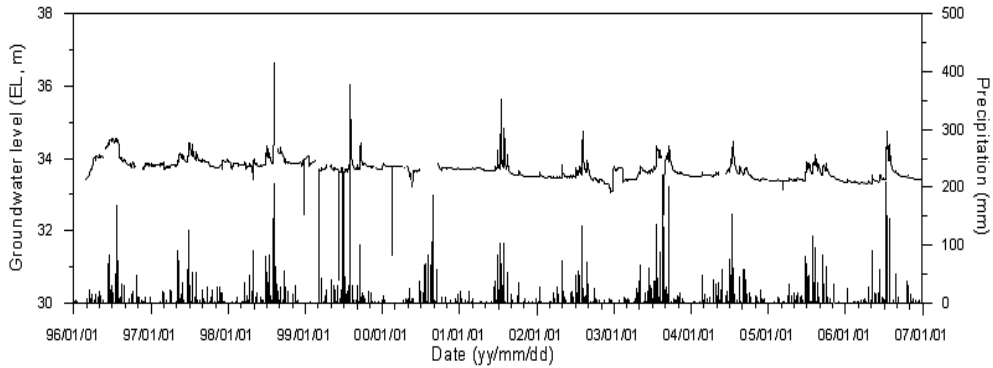
〈그림 9〉 두가지 수위변동 유형이 나타나는 부여부여 관측정(암반층).



〈그림 10〉 계단형 유형의 문경농암 관측정(암반층).



〈그림 11〉 양수에 영향을 받는 충동변화형 유형의 창녕성산 관측정(암반층).



〈그림 12〉 지속적으로 수위가 하강하는 경사형 유형의 의정부신곡 관측정(암반층).

이와 같은 방법으로 국가지하수관측망의 지하수위 변동 경향을 분석한 결과 대부분의 관측정은 큰 변동없이 일정한 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났으나, 12개 관측정에서 수위상승, 51개 관측정에서 수위하강의 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 수위상승 경향을 보이는 관측정은 충적층 관측정 1개소를 제외하면 모두 암반층 관측정이다. 수위하강 경향을 보이는 관측정은 암반층이 34개소로서 전체 암반층 관측정 226개소 중 15.1%에 해당되며, 충적층이 17개소로서 전체 충적층 관측정 120개소 중 14.2% 로서 암반층과 충적층이 비슷한 비율을 보이고 있다. 권역별로 수위하강 경향을 보이는 관측정을 보면 한강권역과 낙동강권역이 전체 관측정 중 15% 내외를 차지하고 있어 비슷한 비율을 점하고 있다. 한편, 금강유역은 수위하강 경향을 보이는 관측정이 가장 낮은 비율로 나타나며, 반면에 영산강-섬진강유역은 전국 4개 권역 중에서 수위하강 경향을 보이는 관측정이 가장 높은 비율로 나타나고 있다(표 8).

〈표 8〉 국가 지하수 관측망의 지하수위 변동 경향성

	계			한강권역			낙동강권역			금강권역			영산강-섬진강권역		
	상승	하강	경향 없음	상승	하강	경향 없음	상승	하강	경향 없음	상승	하강	경향 없음	상승	하강	경향 없음
계	12	51	283	5	10	51	4	16	88	2	9	85	1	16	59
암반층	11	34	181	4	7	32	4	11	54	2	6	56	1	10	39
충적층	1	17	102	1	3	19	-	5	34	-	3	29	-	6	20

## IV. 결론 및 토의

국가지하수관측망 지하수위 관측자료의 시계열도를 토대로 수위변동 유형을 분류하였다. 계절형, 경사형, 계단형, 램프형, 정상형, 충동변화형의 6가지 유형을 기본으로 하고 강우에 대해 민감하게 반응하는 정도와 주변지역에서의 양수의 영향을 받는 여부를 종합하여 총 24개 유형으로 분류하였다. 그 결과 계절형이 66.8% 로 가장 많으며, 다음으로 충동변화형 12.4%, 정상형 11.8%, 램프형 4%, 경사형 3.2%, 계단형이 1.7% 를 차지하고 있다. 한편, 국가지하수관측망의 일평균 수위자료에 대한 선형회귀분석을 통해 연간 변동율 0.05 m/년을 기준으로 변동경향을 분류하였다. 그 결과 전체 관측정의 3.5%(12개)가 수위상승, 14.7%(51개)가 수위하강 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

제주도를 제외한 내륙지역에서는 지하수법 제17조의 규정에 따라 지하수 관측결과를 토대로 지하수위가 지속적으로 낮아지는 것으로 판단되는 경우 원인분석을 위한 정밀조사를 실시하고 지하수 보전구역으로 지정하는 등 필요한 조치를 하도록 되어있다. 제주도의 경우에는 일찍이 자체적으로 지하수 관측을 시작하여 10년 이상 장기관측자료를 확보하고 있으며, 이를 활용하여 지하수 관리수위를 설정하는 등 지하수 관리에 적극 활용하고 있다. 본 연구에서 검토한 바와 같이 지하수위 장기관측자료는 지하수위 변동으로 인한 장애를 사전에 예방하는데 매우 유용하게 활용될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 제주도의 경우에도 그 동안 축적된 장기관측자료를 토대로 변동 유형을 분류하고 정기적으로 추세분석 등 다양한 분석 결과를 적용한다면 제주도 지하수 관리에 보다 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## [참고문헌]

- 국토해양부(2011), 『수자원장기종합계획(2011~2020)』 .
- 송성호, 이진용, 이명재(2007), 변동유형 분석법을 이용한 해수침투 관측망 자료 평가,  
Jour. Korea Earth Science Society Vol. 28, No.4, p. 478-490.
- 한국수자원공사(2004), 『국가지하수관측망 운영관리 최적화방안 연구』 .
- 한국수자원공사-국토해양부(2005), 『지하수 장애우려지역 대책방안 연구』 .
- 한국수자원공사-국토해양부(2006), 『2006 지하수 장애우려지역 조사 및 대책방안 연구』 .
- 한국수자원공사-국토해양부(2009), 『2009 지하수 장애우려지역 조사 및 대책방안 수립』 .
- 한국수자원공사-국토해양부(2010), 『2010 지하수 장애우려지역 조사』 .
- 한국수자원공사-국토해양부(2011), 『2011 지하수 변동실태 정밀조사』 .
- 한국환경정책·평가연구원(2007), 『지하수의 합리적인 이용·관리를 위한 정책방향』 .
- Montgomery, D.C., Johnson, L.A., Gardiner, J.S., 1990, *Forecasting and Time Series Analysis*, McGraw Hill, p. 381.
- OECD(2006-2008), *Environmental Data: compendium 2006-2008*
- Shiklomanov, I.A., Rodda, J.C., 2003, *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. International Hydrology Series, Cambridge.
- Thamke, N.J., 2000, Hydrology of Helena area bedrock, west-central Montana, 1993-98: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4212, p. 119.
- UNESCO(2006), *Water-a shared responsibility*. The United Nations World Water Development Report 2. UNESCO, Paris/Berghahn Books.
- USGS(2001), Circular 1217 - Groundwater Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water Level Data.