

광릉 수문연구부지 내 원두부 소유역에서 지하수면의 주기적 변동 특성

김유리¹ · 우남철^{1*} · 이상덕¹ · 홍태경¹ · 김 준²

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²연세대학교 대기과학과

Periodic Variation of Water Table at a Headwater Catchment in the Gwangneung Ecohydrological Research Site

Yu-lee Kim¹ · Nam C. Woo^{1*} · Sangduck Lee¹ · Tae-Kyung Hong¹ · Joon Kim²

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University

²Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

ABSTRACT

Periodic fluctuation of water levels were analyzed for their causes and effects on groundwater movement. Groundwater levels were monitored from two shallow monitoring wells, G1 and G4, located at a headwater catchment in the Gwangneung Ecohydrological Research Site using pressure transducers with automatic data-loggers by five-minute interval from February to October, 2006. The water table fluctuates on a daily basis with a clear diurnal variation, and the fluctuation amplitude increases with time from the winter to the summer. Results from spectral analysis of water-level data show periodic variations in 24.38 hour and in 12.19 hour, indicating P_1 diurnal and L_2 semidiurnal tidal components, respectively. The diurnal component of the water level in summer has greater power than that in winter, implying that the water table is affected not only by earth tides, but also by evapotranspiration. Right after rain stops, the power of diurnal component of the water level decreases, indicating that evapotranspiration influences significantly diurnal periodicity. The effects of diurnal and semidiurnal components of the water level range from 0.4 to 4.2 cm and from 0.2 to 0.7 cm, respectively.

Key words : Water-table fluctuation, Power spectral analysis, Periodicity, Earth tides, Evapotranspiration

요 약 문

광릉 수문연구부지 내 원두부 소유역에서 천부 관측정 G1, G4를 대상으로 2006년 2월부터 10월까지 5분 간격으로 관측한 지하수위 변동자료에 대한 주기적 변동원인과 그 영향을 분석하였다. 지하수위는 일주기의 반복성을 보이며, 겨울에서 여름으로 갈수록 변동폭이 증가하였다. 지하수위 관측 자료의 파워스펙트럼 분석 결과, 24.38시간의 일주기 성분과 12.19시간의 반일주기 성분이 나타나며, 이는 각각 지구 조석 성분 중 P_1 분조와 L_2 분조에 근접하다. 일주기 성분은 겨울에 비해 여름에 더 큰 power를 나타내어 지하수위가 조석 뿐 아니라 증발산에 의한 영향까지 함께 받고 있음을 보여준다. 또한 강우 직후의 지하수위 자료에서는 일주기 성분이 감소하는 현상 역시 일주기 성분에 증발산이 큰 영향을 미치고 있음을 지시한다. 조석과 증발산에 의한 지하수위 변동은 일주기 성분이 0.4~4.2 cm, 반일주기 성분은 0.2~0.7 cm 정도의 영향을 미친다.

주제어 : 지하수위 변동, 주기성, 파워스펙트럼 분석, 지구 조석, 증발산

*Corresponding author : newoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2007. 9. 21 게재승인일 : 2007. 12. 28

질의 및 토의 : 2008. 4. 30 까지

1. 서 론

수자원의 효율적인 관리를 위해서는 수문 순환을 이루는 각각의 성분들에 대한 이해와 정량화가 중요하다. 그 중 지하수위의 변동은 지하매질을 통한 물의 이동에 대한 다양한 정보를 제공할 수 있는 수문 순환에 매우 중요한 요소이다. 관측공을 통해 관측된 지하수위는 대수층에 가해지는 수문학적 스트레스에 대한 주요 정보를 제공할 뿐 아니라, 이러한 스트레스들이 지하수의 함양, 저장 및 배출과정에 어떻게 영향을 미치는지 보여주는 중요한 인자이다(Taylor and Alley, 2001). 즉, 지하수위는 수문 순환 체계에서 다른 수문 현상의 변화에 따라 연계된 상호반응의 결과로 변동하며, 이는 자연적/인위적 요인에 의해 발생한다. 지하수위 변동을 일으키는 요인들로는 강우에 의한 함양, 공기 포획 효과, 증발산, 대기압의 변화, 조석에 의한 영향, 지진 등의 자연적 요인과 인공함양, 양수 등의 인위적 요인을 들 수 있다(Freeze and Cherry, 1979). 그러나 일반적으로 이러한 요인들은 복합적으로 발생하기 때문에 지하수위 변동을 정확히 분석하여 각 요인들의 영향을 정량적으로 분석하는 것은 쉽지 않은 일이다.

지하수위 변동에 관하여 암반 자유면 대수층에서 나타나는 조석의 영향에 관한 연구(Marechal et al., 2002), 대기압과 조석에 의한 지하수위 변동 연구(Inkenbrandt et al., 2005), 주거지에서 나타난 장기 지하수위 자료의 주기성을 찾아내어 미래의 지하수위를 예측하는 모델에 적용한 연구(Almedeij and Al-Ruwaih, 2006), 지진과(Cuttillo and Ge, 2006) 식물에 의한 지하수위 변동(Butler et al., 2007)에 대한 연구 등이 보고된 바 있다. 국내에서도 부산 일대의 지하수위 변동의 주기성과, 내륙과 해안지역에서의 지하수위 조석변동에 대한 연구가 보고된 바 있으며(Lee et al., 2001, 2004), 이들은 모두 150 m 이상의 깊이를 가진 심부 관정에서 획득한 지하수위 자료를 분석하였다.

최근 국내에서는 HydroKorea/CarboKorea 연구를 통해 광릉 복합 수문연구 부지를 대상으로 물 에너지/탄소 순환에 관해 다양한 분야의 학제 간 연구가 수행중이다(Kim et al., 2006). 이 연구는 물과 탄소 수지에 대해 각각의 요소들에 대한 현장 실측자료를 다양한 규모별로 그리고 장기간의 연속적인 자료를 수집하여 위성 자료와 함께 GIS 도구를 사용함으로써 생태수문학적 특성의 규모 종속성을 밝히고, 나아가 이러한 연구결과를 바탕으로 몬순 기후 지역에 속하며 복잡 지형조건을 보이는 우리나라의 수문현상을 실시간으로 분석, 평가 및 예측할 수 있는 시스템을 구축하고자 시작되었다. 본 연구팀은 수문관측 순

환해석의 한 분야로서 천부/심부 관측공을 통해 지하수 순환 및 함양 특성을 밝혀 수문순환에 대한 지하수의 기여도를 정량적으로 평가하는 것을 목표로 하고 있다.

전술한 바와 같이 지하수면의 변동은 대기압의 변화, 증발산, 조석, 관개 및 양수 등의 다양한 요인에 의해 복합적인 결과로 나타난다. 따라서 이 연구는 인위적 요인을 최대한 제거할 수 있는 내륙 지역인 광릉 수문연구 부지에 설치한 두 개의 천부 관측공에서 장기 모니터링 계획에 의해 지속적으로 관측된 지하수위 변동자료를 이용하여, 지하수위의 주기적 변화를 일으키는 요인과 그들이 수문 현상에 미치는 영향을 정량화하고자 수행되었다.

2. 연구 지역

연구 지역은 경기도 포천시 소흘면 직동리에 위치한 광릉 소유역 내의 원두부 지역(headwater catchment)으로서 인위적인 교란이 없는 수문 연구의 적지로 다양한 분야의 학제 간 연구가 수행되고 있는 곳이다. 37°44'N, 127°09'E에 위치하며, 면적은 0.22 km²(22 ha), 고도는 280~470 m의 범위를 가진다. 광릉 소유역 전체 면적은 약 2 km²(200 ha)로, 넓게는 퇴계원 수위표 유역(약 201 km²)에 속하며 최종적으로 한강 대유역(약 26,000 km²)에 포함된다(Fig. 1)(Choi et al., 2007). 이 지역은 경기육괴를 구성하는 경기편마암복합체를 기반암으로 하고(KIGAM, 1999) 토양은 알피솔(alfisol), 토성(soil texture)은 사질양토를 나타내며 졸참나무, 서어나무 등의 낙엽활엽수림이 주된 임상을 이루고 있다(Lim et al., 2003).

본 연구에 사용된 지하수위 자료를 획득한 관측정은 G1, G4 관측정(Fig. 2)으로, 각 관측정 깊이는 지표로부터 65.2 cm, 54.7 cm이고, 스크린의 길이는 20 cm로 기반암 상부까지 관통 되어있다. 두 관측정은 약 13.5 m 떨어져 있으며, 관측정에는 수위자동관측계(CTD-Diver, model DI261, Schlumberger)를 설치하여, 2006년 2월부터 10월까지 5분 간격으로 지하수위를 관측하였다. 수위 관측자료의 기계적 오차와 민감도는 각각 $\pm 1 \text{ cm}$ $\pm 0.2 \text{ cm}$ 이다. 관측된 지하수위 자료는 동일 시간에 대기압 관측장치(barometer, Schlumberger)를 이용해 측정한 기압자료를 이용하여 기압변화에 의한 지하수위 변동효과를 제거하였다.

3. 자료 분석 방법

장기간에 걸쳐 연속적으로 관측된 지하수위 변동자료는

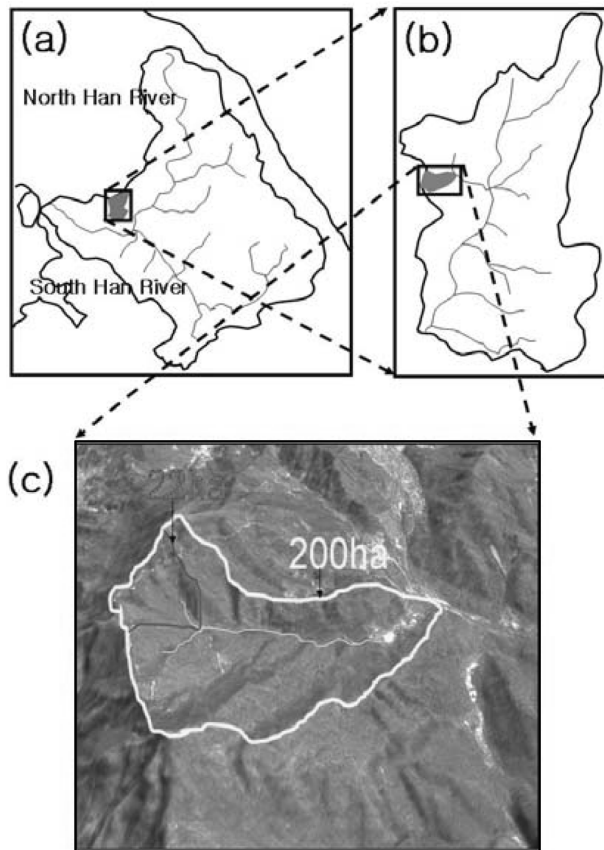


Fig. 1. Location of the study area: (a) Han-river watershed, (b) Toegyewon watershed, (c) Gwangneung watershed. Area in the thick line is the study area, Gwangneung headwater chatchment (after Choi et al., 2007).

일련의 시계열 자료이다. 따라서 시계열 자료에서 나타나는 각각의 주기함수들의 영향력을 알아보기 위해, 널리 사용되는 방법인 파워스펙트럼 분석(Power spectral analysis)을 이용하였다. 파워스펙트럼 분석은 시계열의 분산에 대한 각각의 주기함수들의 영향력을 주파수 영역에 대한 스펙트럼 밀도함수로 나타냄으로써 영향력이 큰 주기를 찾아내는 대표적인 분석법이다(Davis, 2002).

분석에 앞서, 관측된 자료의 신호(signal) 대 잡음(noise)의 비율을 높이기 위해 자료에 내포된 경향성(trend)을 없애는 과정이 필요한데, 일반적으로 최소자승법에 의해 선형의 경향성을 얻는 방법(Almedeij and Al-Ruwaih, 2006), 이동평균(moving average)을 이용하는 방법(Marechal et al., 2002), 필터(filter)를 이용하는 방법(Hsieh et al., 1987)등이 이용되고 있다. 여기서 분석한 자료들은 비교적 짧은 기간에 해당하므로, 최소자승법을 통해 선형의 경향성을 구한 후 해당 자료에서 제거하여 주기성만을 볼 수 있도록 하였다.

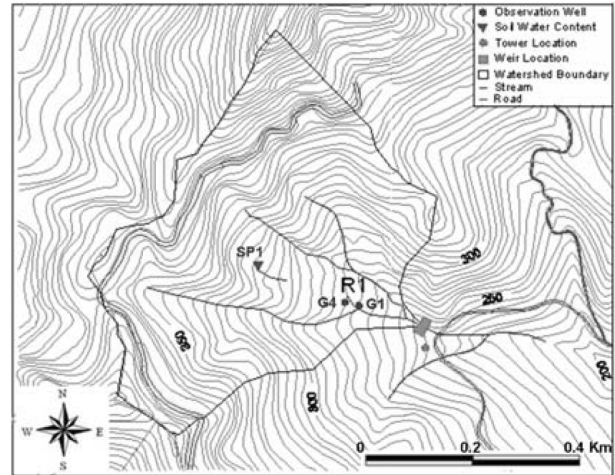


Fig. 2. Study area and location of monitoring wells (after Lee, 2007).

파워스펙트럼 분석은 수치신호 처리기법 중의 하나인 푸리에 변환(Fourier Transforms)을 이용하였으며 MATLAB 7.1(MathWorks, 2005) 프로그램을 통해 분석하였다. 스펙트럼 분석을 통해 획득한 결과는 빈도(frequency)에 대한 신호의 세기(power)를 나타내는 periodogram으로 표현하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 관측 자료의 특성

연구지역이 유역의 원두부에 위치하는 관계로 12월에서 1월 중에는 현장에 대한 접근이 불가능하여 지하수위 변동 관측자료를 획득할 수 없었다. 2월 중에도 식물의 활동이 최저점에서 유지되고 있으므로, 식생에 의한 지하수면의 변동요인이 최저라고 가정하고, 2월에 수집된 자료를 겨울철을 대표한다는 가정하에 자료를 분석하였다.

Fig. 3(a)은 겨울에 해당하는 기간(2006년 2월 21일 14시 00분~25일 03시 15분)에 G1, G4 관측점에서 5분 간격으로 획득한 지하수위를 대기압 보정하여 나타낸 그래프이다. 지하수위는 낮 12시경에 가장 낮은 값을 보이다가 점차 상승하여 밤 12시경에 최고 수위를 나타내는 경향을 보이며, 두 관측점 모두 이러한 패턴이 하루 주기로 반복되고 있다. 수위는 해발고도로 약 265 m 정도로서, G1이 G4보다 4~5 cm 가량 낮은 값을 보이며, 수위의 변동폭은 모두 6~8 cm로 크게 차이나지 않는다. 이들 관측점은 인위적 활동에 의한 영향을 받지 않는 보존림인 광릉 수목원의 원두부 유역에 있고, 또한 천부 지하수위를 관측대상으로 하기 때문에 일주기의 지하수위 변동 원인은 식생에 의한 증발산과 조석, 대기압의 변화에 따른 영

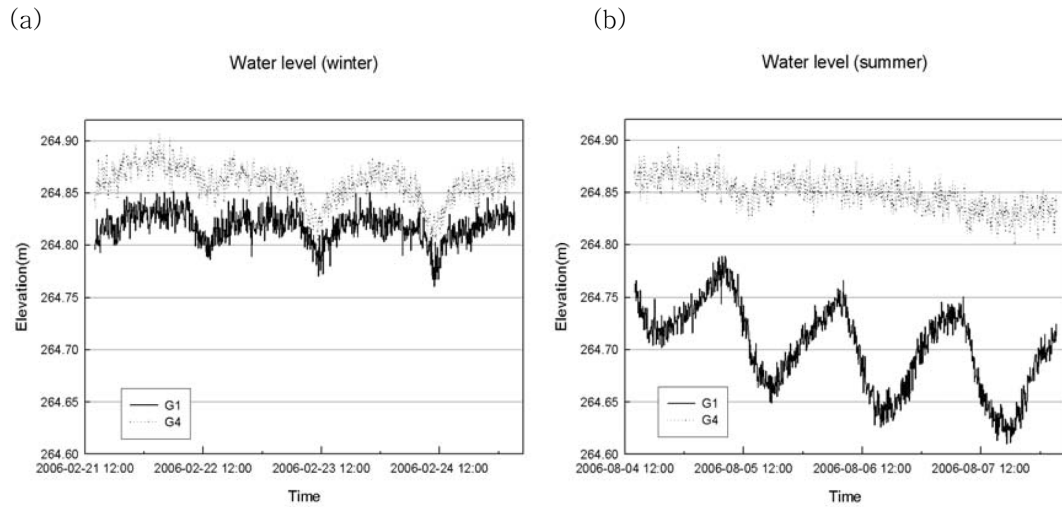


Fig. 3. Water levels of G1 and G4 wells: (a) in winter and, (b) in summer.

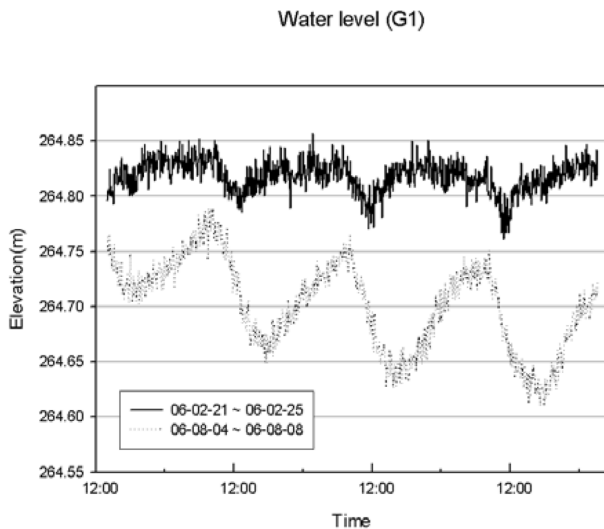


Fig. 4. Fluctuations of water levels of G1 well in winter and summer.

향으로 나타날 것이다. 그러나 연구에 사용된 지하수위는 이미 대기압을 보정한 것이므로, 이러한 일주기의 패턴은 증발산과 조석에 의한 효과로 판단된다.

여름에 해당하는 기간(2006년 8월 4일 14시 00분~8일 03시 15분) 동안 G1의 수위 변동폭은 약 10 cm로, 5 cm 이하의 변동을 보이는 G4보다 훨씬 큰 변동을 보이고 있다(Fig. 3(b)). 관측정별로 수위의 변동폭이 달라지는 원인은 해당 관측정이 위치한 곳의 매질 특성, 식생의 종류와 분포 밀도 등의 차이 등을 생각할 수 있다(Loheide et al., 2005). 이 연구에서는 이러한 원인에 대해 정확한 규명을 하지 못하였으며, 후속 연구에서 이 문제를 해결하고자 한다.

하나의 관측정에서 기간별로 지하수위 변화를 살펴보면, 겨울에서 여름으로 시간이 지날수록 수위의 변동폭이 커짐을 알 수 있으며 최대값과 최소값을 보이는 시간이 달라짐을 알 수 있다(Fig. 4). 식물의 활동이 활발한 여름에 지하수위의 변동폭이 커지는 현상은 지하수위가 증발산에 의해 영향을 받고 있음을 보여주는 직접적인 증거가 된다. 수위의 최대, 최소값을 보이는 시간이 이동하는 것은 지구의 공전에 따라 일조시간이 계절별로 달라지면서 증발산에 영향을 미쳐 나타나는 결과와, 같은 원인에 의해 발생하는 지구 조석의 변화가 복합적으로 나타난 결과일 것으로 해석된다. 이와 같은 지하수위의 주기적 특성을 좀 더 정량적으로 분석하고 그 원인을 정확히 밝혀보고자 스펙트럼 분석을 실시하였다.

4.2. 조석

조석(tide)은 지구표면의 점들에 대해 태양과 달의 위치가 변하여 생기는 중력의 차이에 의해 발생한다. 달에 의해 생기는 기조력은 태양에 의한 것보다 2배를 조금 넘으며, 물을 이동시키는 것은 지구의 표면을 따라 작용하는 기조력의 수평성분이다. 기조력의 366개 성분 중 주요한 분조는 Table 1과 같으며 이들 분조가 전체 기조력의 90% 정도를 차지한다(Doodson, 1921; Knauss, 1997).

지하수위의 주기적인 변동을 일으키는 주된 원인으로 작용하는 조석은 해안지역 뿐 만 아니라 내륙지역에서도 관찰되는 성분이다. Bredehoeft(1967)는 기조력이 증가하면 지하수위가 하강하는 기조력 포텐셜과 지하수위와의 관계식을 제시한 바 있다. 국내에서도 Lee et al.(2004)는 내륙지역과 해안지역에서의 지하수위 관측 자료를 대상으

Table 1. Principal tidal harmonic components (after Knauss, 1997)

Name of Tides	Symbol	Period in solar hours	Coefficient ratio ($M_2 = 100$)
Semidiurnal components			
Principal lunar	M_2	12.42	100.0
Principal solar	S_2	12.00	46.6
Larger lunar elliptic	N_2	12.66	19.2
Lunisolar semidiurnal	K_2	11.97	12.7
Smaller lunar elliptic	L_2	12.19	2.8
Diurnal components			
Lunisolar diurnal	K_1	23.93	58.4
Principal lunar diurnal	O_1	25.82	41.5
Principal solar diurnal	P_1	24.07	19.4
Larger lunar elliptic	Q_1	26.87	7.9
Smaller lunar elliptic	M_1	24.84	3.3

로 하여 지하수위의 조석 변동 여부와, 지하수위의 변동과 이론 기조력간의 상관관계를 검토한 바 있다. 그러나 천부 지하수위에서는 기조력에 의한 주기성분과 증발산에 의한 주기적 변동이 유사하게 나타날 수 있다. 따라서 이 연구에서는 조석과 증발산의 영향을 분리시키기 위해, 겨울과 여름, 강우 전과 후로 구분하여 지하수위 관측 자료의 주기성을 분석하였다.

4.3. 지하수위의 주기성

4.3.1. 계절별 주기성

지하수위 관측 자료의 파워스펙트럼 분석을 통해 기조력의 주요한 분조들이 나타나는지 확인해 보았다. 분석한 자료는 가장 강하게 나타나는 성분부터 그 주기(period)를 차례로 Table 2에 나타내었다.

계절의 차이에 의한 주기성을 알아보기 위해 각 자료들은 무강우 시에 해당하는 기간으로 한정하여 분석하였다. 겨울에 해당하는(2006년 2월 21일 14시 00분~28일 16시 35분) 지하수위 자료의 분석 결과(Fig. 5), G1과 G4의 수위자료 모두 24.38시간의 일주기 성분과 12.19시간의 반일주기의 성분이 강하게 나타난다. 이들은 조석의 대표적인 조화 성분 중 각각 일주기를 나타내는 P_1 분조(Principal solar diurnal), 반일주기를 나타내는 L_2 분조(Smaller lunar elliptic)와 근접하다(Table 1).

반면, 여름에 해당하는(2006년 8월 2일 13시 30분~9일 16시 05분) 지하수위 자료의 분석 결과(Fig. 6), 일주기 성분(24.38시간)은 power가 43.02 $m \cdot min$ 로서 G1에서 매우 큰 영향력을 보이고 있으나, G4에서는 6.82 $m \cdot min$ 의

Table 2. Fluctuation periods of water levels in G1 and G4 wells by powerful sequence

Well	Data	Period (hour)					
G1	Winter	24.38	34.13	21.33	56.89	11.38	12.19
	Summer	24.38	21.33	28.44	12.19		
	After rain	24.38	28.44	21.33	12.19		
G4	Winter	24.38	34.13	21.33	56.89	12.19	18.96
	Summer	56.89	24.38				
	After rain	56.89	42.67	24.38			

Table 3. Diurnal and semidiurnal fluctuation periods, power, and periodic fluctuation range in G1 and G4 wells

Well	Data	Period (hour)	Power ($m \cdot min$)	Periodic fluctuation range (cm)
G1	Winter	24.38	9.38	± 0.9
		12.19	3.00	± 0.3
	Summer	24.38	43.02	± 4.2
		12.19	7.08	± 0.7
	After rain	24.38	27.55	± 2.7
		12.19	4.89	± 0.5
G4	Winter	24.38	10.72	± 1.0
		12.19	3.78	± 0.4
	Summer	24.38	6.82	± 0.7
		12.19	1.61	± 0.2
	After rain	24.38	3.72	± 0.4
		12.19	1.54	± 0.2

power를 가져 상대적으로 매우 작게 나타난다(Table 3). 반일주기 성분은 G1과 G4에서 모두 큰 영향력을 보이지 않으며, 특히 G4의 경우 그 영향이 매우 미미하다(Table 3). G1의 경우 일주기 성분은 여름이 되면서 겨울에 비해 power가 약 4.5배 증가한 반면 반일주기는 약 2.4배만이 증가하는 결과를 보였다. 여름기간 지하수위 변동의 일주기 성분이 겨울기간에 비해 상대적으로 크게 나타나는 것은 지하수위가 보이는 주기성이 단지 조석에 의해서만 나타나는 것이 아님을 보여준다. Butler et al.(2007)이 제시한 바와 같이, 이 지역의 지하수면이 지표로부터 약 25 cm 정도 깊이에 위치하기 때문에 식물의 증산작용을 통해 지하수위의 변동이 발생한 것으로 해석된다. 연구지역에는 활엽수림이 주종을 이루기 때문에, 겨울동안에는 식물의 활동이 활발하지 않아 지하수위가 조석에 의한 주기성을 주로 나타내는 것에 반해 여름에는 상대적으로 활발한 식물의 증산활동이 일주기성을 보이면서 조석에 의한 주기성과 함께 복합적으로 수위의 변동을 일으킨 것으로 판단된다.

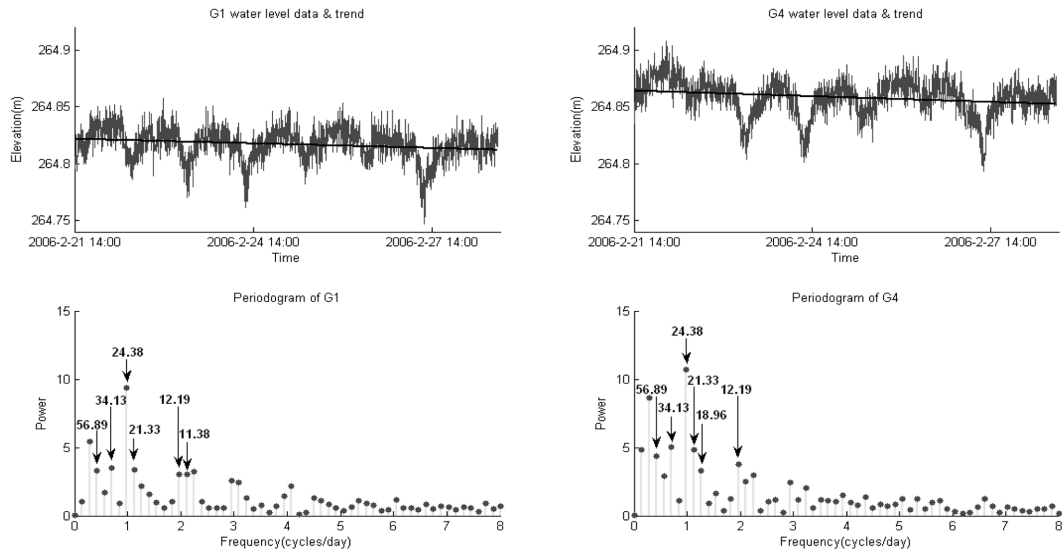


Fig. 5. Plots of water-level data and periodograms of G1 and G4 wells in winter.

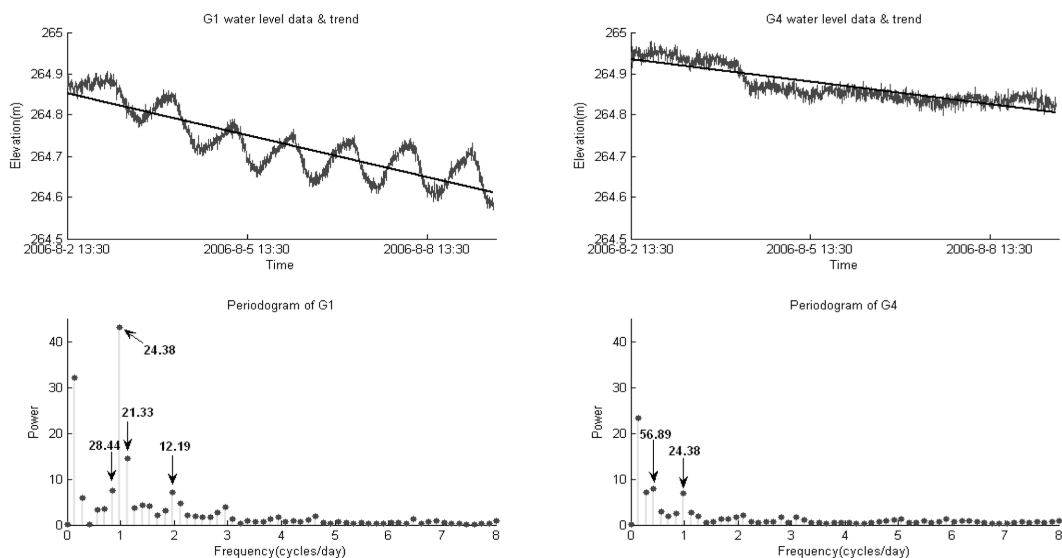


Fig. 6. Plots of water-level data and periodograms of G1 and G4 wells in summer.

그러나 여름기간 G1 관측정 수위에서의 일주기가 불과 13.5 m 밖에 이격되지 않은 G4에서보다 영향력이 크게 나타나는 것은, G1과 G4 관측정에 인접한 지점에서의 식생의 차이와 그에 따른 증발산 효과의 차이에 기인하는 것으로 예상된다(Butler et al., 2007). 그림에 나타내지 않은 주기 성분들은 자료가 내포하고 있는 특성과 관계없이 입력 자료 전체를 하나의 패턴으로 인식한 성분이거나 2차 조화 성분으로 보인다.

4.3.2 강우에 의한 영향

지하수위 변동에서 나타나는 일주기 성분에서 조석에

의한 영향과 증발산에 의한 영향을 구분하여 정량적으로 평가하기 위해서, 같은 여름에 해당하는 무강우 기간과 강우 직후 기간으로 관측 자료를 구분하여 스펙트럼 분석을 실시하였다. 우선 해당 연구 지역 내에서 획득한 10분 간격의 강우 자료에 의해 3일 전부터 선행강우가 있었던 기간(2006년 8월 27일 13시 30분~9월 3일 16시 05분; 강우량 62 mM)을 선택하였으며, 이 기간 동안은 강우 사례가 매우 미미했다(Fig. 7). 강우 기간과 분석 자료를 포함한 기간 동안(2006년 8월 24일 13시 30분~9월 3일 16시 05분)의 강우량과 지하수위는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 강우와 함께 지하수위가 반등되는 현상을 관찰할

수 있으며, 이와 함께 일주기의 지하수위 변동양상이 사라졌다가 강우가 멈춘 후에 점차 그 패턴이 다시 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 일주기 성분이 증발산에 의해 크게 영향을 받고 있음을 지시한다.

강우 직후 지하수위 변동 자료를 스펙트럼 분석한 결과 (Fig. 8), 같은 여름 기간의 무강우시 자료의 분석 결과 (Fig. 6)에 비해 일주기 성분의 영향력이 현저하게 줄어들었다. G1 관측정 수위에서의 일주기는 43.02 m·min에서 27.55 m·min로, G4 관측정 수위에서는 6.82 m·min에서 3.72 m·min로 power가 줄어들었다. 반일주기 성분의 경우 G1 관측정에서는 power가 7.08 m·min에서 4.89 m·min로, G4 관측정에서는 1.61 m·min에서 1.54 m·min로 줄어드는 결과를 보였다(Table 3).

식물의 증산작용은 주변 온도가 높거나, 빛이 강하거나

습도가 낮을 때 활발하게 일어난다. 강우 시에는 무강우 시에 비해 온도가 낮고 빛이 약하며 습도가 높기 때문에 증산작용이 활발하지 못하며, 지표면에서의 증발작용 역시 같은 조건에서 나타나므로 강우 시에는 지하수에 대한 증발산 효과가 크지 않을 것으로 예상된다(Lee, 2006). 강우 직후에도 비포화대는 강우에 의해 수분을 상당량 포함하게 되며, 동시에 함양에 의한 영향까지 함께 작용하기 때문에 식물은 비포화대의 수분을 이용하게 되어 지하수 관측 자료들의 일주기 성분이 뚜렷하게 나타나지 않는 것이다.

반일주기 성분 역시 줄어드는 결과를 보였는데, 이는 파워스펙트럼 분석 시 일주기에 의해 나타나는 패턴을 절반으로 나누어 반일주기로도 인식되는 현상 때문이라고 판단된다. 즉, 반일주기 성분은 일주기 성분의 2차 조화성분으로도 나타나기 때문에, 일주기 성분이 약해짐에 따라 반일주기 성분도 함께 약해지는 것으로 해석하였다.

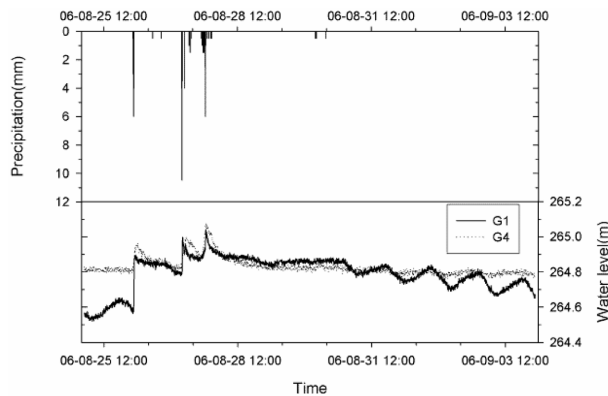


Fig. 7. Precipitation and water levels of G1 and G4 wells.

4.3.3. 일주기와 반일주기의 기여도

스펙트럼 분석 결과로 나타난 일주기(24.38시간)와 반일주기(12.19시간)성분을 수위관측 자료에서 분리하는 작업을 수행하였다. 일주기를 분리하여 관측 자료(2006년 8월 2일 13시 30분~9일 16시 05분)에서 제거한 결과 시각적으로도 뚜렷하게 일주기의 패턴이 사라진 모습을 보였다(Fig. 9). 이 때, 일주기의 성분은 G1 관측정의 경우 ± 0.042 m의 범위에서, G4의 경우 장비의 정확도 한계치인 ± 0.007 m의 범위에서 변동을 보였다.

위에서 구분한 기간별로 나타난 일주기와 반일주기 성분의 영향력(power)과 해당 주기성분이 지하수 변동을 일

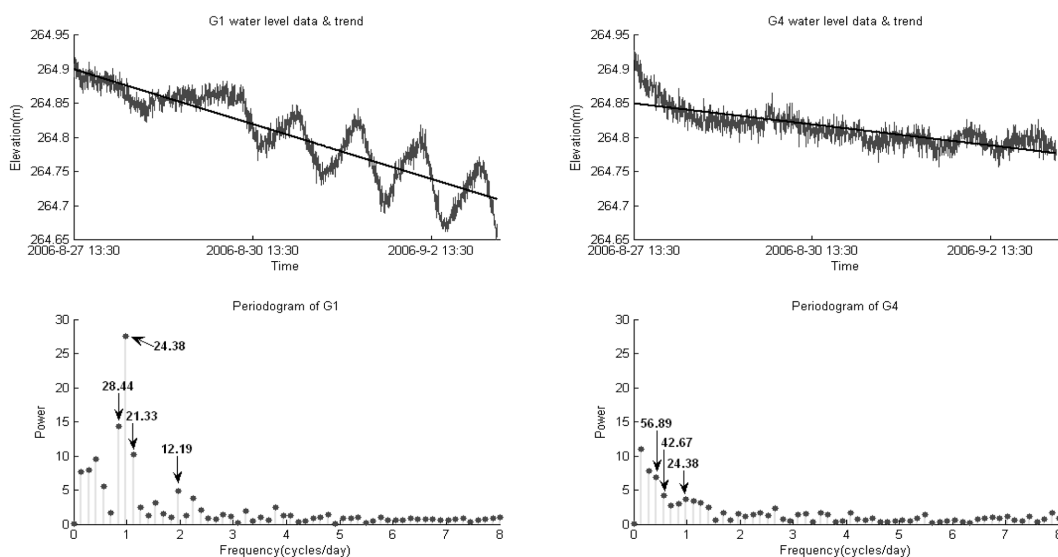


Fig. 8. Plots of water level-data and periodograms of G1 and G4 wells after rain in summer.

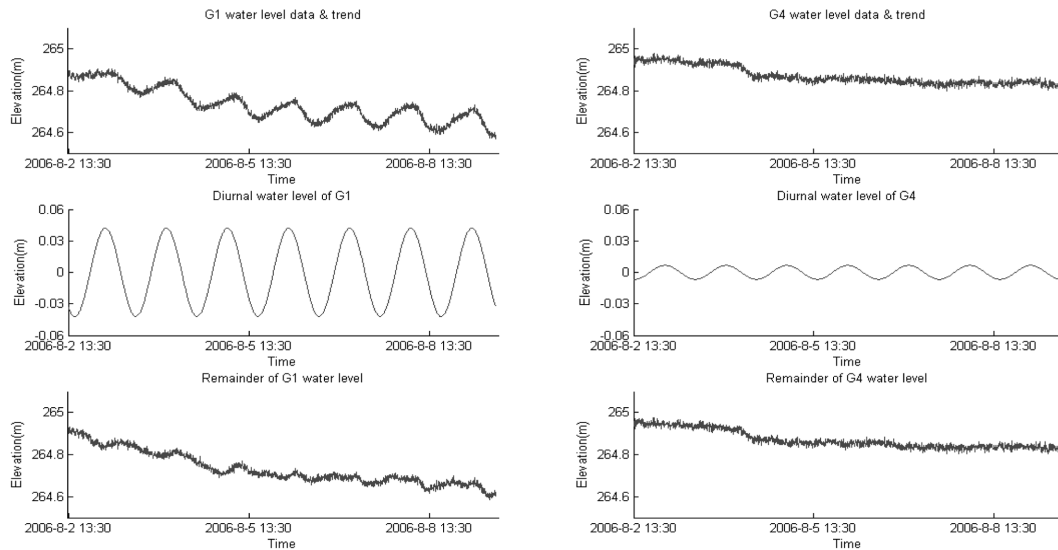


Fig. 9. Plots of water level data of G1 and G4 wells, extracted diurnal components and remainder of water level after removing diurnal components.

으키는 규모(periodic fluctuation range)를 나타낸 결과는 Table 3과 같다. 일주기 성분은 0.4~4.2 cm의 범위에서 변동하며 반일주기 성분은 0.2~0.7 cm의 범위에서 변동을 알 수 있다. 그러나 반일주기 성분은 일주기 성분의 2차 조화 성분까지 포함되어 있는 것으로 판단되므로 실제 변동 규모는 훨씬 작게 나타날 것이라고 판단된다. 특히 여름 기간의 일주기 변동은 상당한 규모를 보이고 있으며 이 역시 증발산에 의한 영향으로 변동되는 지하수위의 특성을 나타내는 것이라 할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 인위적인 영향이 없는 광릉 소유역 내 원두부 지역의 G1, G4 관측정에서 나타나는 천부 지하수위는 뚜렷한 일주기성을 보이며, 겨울에서 여름으로 시간이 지남에 따라 그 변동폭이 증가한다.
2. 겨울 기간 중, G1과 G4 관측정의 수위자료 모두 24.38시간의 일주기 성분과 12.19시간의 반일주기 성분이 강하게 나타나며, 이들은 조석의 대표적인 조화 성분 중 P_1 분조, L_2 분조와 근접한 값을 보여, 지하수위의 변동에 조석의 영향이 있음을 지시한다.
3. G1 관측정에서 지하수위의 일주기 성분은 겨울에 비해 여름에 약 4.5배 정도 power가 증가하였으며 반일주기 성분은 약 2.4배 만이 증가하였다. 이는 지하수위 변동의 주기성에 조석에 의한 영향과 함께 식물의 증산작용의 영향이 반영된 것이라 판단된다.

4. 강우 전보다 강우 사례 직후의 지하수위 변동에서 일주기 성분의 영향력이 급격히 감소한다. 이는 강우로 인해 감소된 증발산의 영향이 지하수위의 변동에 반영된 것으로 해석된다.

5. 조석과 증발산의 영향에 의한 주기적 지하수위 변동을 정량적으로 분리하지는 못하였으나, 이들이 복합적으로 나타낸 일주기 성분은 지하수위 변동의 0.4~4.2 cm 범위로, 반일주기 성분은 0.2~0.7 cm의 범위로 기여한다.

이 연구결과는 인접한 두 개의 천부 관측정에서 관측된 자료의 해석결과로 도출된 것이다. 따라서 이러한 결과가 대수층 전체로 확대 해석되는 것은 무리가 있다. 또한 이러한 문제점은 이 연구의 결과에서 보이는 G1, G4 간의 수위변동의 차이에서도 잘 나타난다. 즉, 이 연구결과는 지하수위의 분포와 변동에 있어 시간적, 공간적 변화가 존재함을 확증하고, 결과적으로 지하수와 대수층의 특성을 이해하기 위해서는 이와 같은 연구를 통해 더 많은 공간적 변동에 대한 자료의 축적이 필요함을 제시한다. 나아가 이러한 변동의 규모를 정량화함으로써 수문 순환 요소들을 연계한 모델의 예측기능을 정밀하게 하고, 나아가 수문 예측결과의 신뢰성을 제고하는데 기여할 수 있을 것이며, 궁극적으로는 우리나라의 체계적인 수자원의 관리와 확보에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

사 사

이 내용은 김유리의 연세대학교 석사학위 연구의 일부이며, 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적

확보기술 개발사업단의 연구비 지원(과제번호 1-8-3)과 연세대학교 BK21 지구대기천문 사업단의 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Almedeij, J. and Al-Ruwaih, F., 2006, Periodic behavior of groundwater level fluctuations in residential areas, *J. Hydrol.*, **328**, 677-684.
- Butler, J.J., Kluitenberg, G.J., Whittemore, D.O., Loheide, S.P., Jin, W., Billinger, M.A., and Zhan, X., 2007, A field investigation of phreatophyte-induced fluctuations in the water table, *Water Resour. Res.*, **43**.
- Bredehoeft, J.D., 1967, Response of well-aquifer systems to Earth tides, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3075-3087.
- Choi, I.H., Woo, N.C., Kim, S.J., Moon, S.K., and Kim, J., 2007, Estimation of the groundwater recharge rate during a rainy season at a headwater catchment in Gwangneung, Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **9**(2), 75-87.
- Cuttillo, P.A. and Ge, S., 2006, Analysis of strain-induced ground-water fluctuations at Devils Hole, Nevada, *Geofluids*, **6**, 319-333.
- Davis, J.C., 2002, Statistics and Data Analysis in Geology, John Wiley&Sons, New York, 266-277.
- Doodson, A.T., 1921, The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential, *Proc. Roy. Soc., A.*, **100**, 305-329.
- Freeze, A.R. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice Hall, New Jersey, 229-234.
- Hsieh, P.A., Bredehoeft, J.D., and Farr, J.M., 1987, Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis, *Water Resour. Res.*, **23**, 1824-1832.
- Inkenbrandt, P.C., Doss, P.K., Pickett, T.J., and Brown, R.J., 2005, Barometric and Earth-tide induced water-level changes in the Inglefield sandstone in Southwestern Indiana, *Proceedings of Indiana Academy of Science*, **114**(1), 1-8.
- KIGAM, 1999, Explanatory note of the Seoul-Namchonjeom shee, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, KR-99(B)-01-03.
- Kim, J., Lee, D.H., Hong, J.K., Kang, S.K., Kim, S.J., Moon, S.K., Lim, J.H., Son, Y.H., Lee, J.S., Kim, S.H., Woo, N.C., Kim, K.H., Lee, B.Y., Lee, B.L., and Kim, S., 2006, HydroKorea and CarboKorea : cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea, *Ecol Res.*, **21**, 881-889.
- Knauss, J.A., 1997, Introduction to Physical Oceanography, Prentice-Hall, New Jersey, 234-244.
- Lee, B.J., Moon, S.H., Cho, B.W., Sung, I.H., and Lee, C.W., 2001, Identification of influences on groundwater fluctuations using spectrum analysis, *J. Geol. Soc. Korea*, **37**(2), 287-296.
- Lee, B.J., Ko, K.W., Moon, S.H., Park, Y.S., and Lim, M.T., 2004, Identification of seawater encroachment based on the characteristics of tidal fluctuation of groundwater level, *J. Geol. Soc. Korea*, **40**(1), 53-64.
- Lee, S.D., 2007, Estimation of Groundwater Recharge using Water-Table Fluctuations in a Headwater Catchment of the Gwangneung Supersite, Korea, M.Sc. Thesis (unpublished), Graduate School of Yonsei University.
- Lee, J.S., 2006, Hydrology, Goomibook, Seoul, p. 151-180.
- Lim, J.H., Shin, J.H., Jin, G.Z., Chun, J.H., and Oh, J.S., 2003, Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **5**(2), 101-109.
- Loheide, S.P., Butler, J.J., and Gorelick, S.M., 2005, Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment, *Water Resour. Res.*, **41**.
- Marchal, J.C., Sama, M.P., Ahmed, S., and Lachassagne, P., 2002, Establishment of earth tide effect on water-level fluctuations in an unconfined hard rock aquifer using spectral analysis, *Current Science*, **83**(1), 61-64.
- 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.