

《原著》

장기모니터링을 통한 지하수계의 이해 - 광릉소유역 사례 연구

이재민 · 우남철*

연세대학교 지구시스템과학과

Understanding the Groundwater System through the Long-term Monitoring - a case Study of Gwangneung Headwater Catchment

Jae Min Lee · Nam C. Woo*

Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University

ABSTRACT

Effects of climate change on groundwater system requires understanding the groundwater system in temporal and spatial scales through the long-term monitoring. In this study, the spatio-temporal variations of groundwater were analyzed through the continuous observation of water level, electrical conductivity (EC) and water temperature with automatic data-loggers and sampling in a Gwangneung catchment, Korea, for the four years from 2008 to 2011. Groundwater monitoring were performed at the nest-type wells, MW1 and MW2, located in upstream and downstream of the catchment, respectively. During the survey period, both the total amount of annual precipitation and the frequency of concentrated rainfall have increased resulting in the elevation of runoff. Water level of MW1 showed no significant fluctuations even during the rainy season, indicating the confined groundwater system. In contrast, that of MW2 showed clear seasonal changes, indicating the unconfined system. The lag-time of temperature at both wells ranged from one to three months depending on the screened depths. Results of chemical analyses indicated that major water compositions were maintained constantly, except for the EC decreases due to the dilution effect. Values of the stable-isotope ratios for oxygen and deuterium were higher at MW2 than MW1, implying the confined system at the upstream area could be locally developed.

Key words : Groundwater system, Long-term monitoring, Climate change, Stable isotope, Temporal variation

1. 서 론

과거 10여 년 동안 지구환경 관련 연구분야에서는 지구 온난화 현상과 함께 전 지구적 기후변화, 그리고 이로 인한 물 순환체계의 변화와 파생되는 영향 등에 관한 많은 연구 결과들이 보고되고 있다(Milly et al., 2005; Held and Soden, 2006; Trenberth, 2011; Yilmaz and Imteaz, 2011). 기후변화는 지역적으로는 집중호우를 발생시켜 홍수와 사태를 유발하거나(Fowler and Kilsby, 2003; Diodato, 2004; Bocheva et al., 2009), 무강우일수의 증가로 인한 심각한 가뭄을 초래하는 등 극단적인 양상으로 나타나 수자원의 이용과 관리에 부정적인 영향을 미치게 된다(Lehner et al., 2006; Liu et al., 2012). 따라서

“홍수”로 표현되는 지표유출량의 급격한 증가현상과 “가뭄과 건천화”로 나타나는 수위하강의 현상을 이해하고, 이를 바탕으로 효율적인 수자원 이용관리를 위해서는 물 순환체계에 대한 과학적이면서도 충분한 이해가 선결되어야 한다.

물 순환체계는 해양-증발-대기-강수/강설-지표수/지하수-해양으로 연결되는, 지구시스템을 통한 물의 지속적인 순환과정을 모식적으로 제시하지만, 이 체계에서는 지질학적인 시간단위에서의 양적 평형을 제시할 뿐, 각 단위 환경에서 물의 이동 속도에 대해서는 설명하지 않는다. 즉, 각 수문단위에서 물의 체류시간을 보면, 대략적으로 해양 3,000년, 대기 10일, 지표수 두 달~100년, 지하수는 천부 100~200년, 심부 10,000년 등으로 순환체계를 통해 이동

*Corresponding author : ncwoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2012. 7. 27 심사일 : 2012. 8. 24 게재승인일 : 2012. 8. 24

질의 및 토의 : 2012. 10. 31 까지

하는 물의 이동시간은 10일~10,000년 범위로 광범위하게 나타나며(Bolin et al., 1986), 이러한 차이가 초래하는 물의 시간적·공간적 변화를 정확히 이해할 때, 비로소 물을 지속가능한 수자원으로 이용할 수 있는 방안을 모색할 수 있다. 특히 우리나라에서는 수자원 총 이용량의 약 90%를 지표수에 의존하고 있는데(국토해양부, 2006), 이러한 지표수자원이 강우시기를 제외하면 지하수의 기저 유출을 통해서 지속적으로 공급되고 있음을 고려할 때, 지하수와 지표수의 상호관계에 대한 이해는 대단히 중요하다.

강수의 침투와 지질매체의 공극을 통해 유동하는 지하수는 기후와 지형, 지질특성, 식생 등의 자연적인 요인과 지표 토지와 지하공간의 개발/이용 및 지하수의 취수/주입 등의 인위적인 요인에 의해 끊임없이 변화를 보인다. 이러한 지하수위의 변화는 증발산, 기압변화, 조석에 의한 변화 등의 주기적 특성과 불규칙한 인위적 특성이 혼합되어 나타나서, 지하수계 변화가 총합되어 나타나는 최종산물의 의미를 지니게 된다. 따라서 관측공에서 지하수위의 변동을 일정 시간간격으로 장기간 관측을 한다면, 이러한 자료들은 전술한 다양한 요인들을 분리해석할 수 있는 근거가 되며, 이러한 분석을 통해 대수층에 가해지는 수리적인 스트레스와 이렇게 가해진 스트레스가 지하수의 함양, 저장, 유출에 영향을 미치는지에 대한 중요한 정보를 도출할 수 있다. Taylor and Alley (2001)는 체계적으로 관측된 지하수위 장주기 자료는 시간에 따른 수자원의 변화 측정, 지하수 모델링과 예측 경향 분석, 지하수 관리와 예방 프로그램의 효과적인 비용 산정을 위한 설계, 도구, 그리고 관측 계획을 수립하는데 있어서 필수적인 자료로 활용됨을 보고하였다.

공간적 관점에서 물 순환체계에 관한 연구는, 물 수지의 닫힘을 전제할 수 있는 유역(watershed)을 기준으로 한다. 이러한 유역은 그 규모에 따라서 소유역-중유역-대유역으로 구분할 수 있으나 이러한 구분은 정성적이다. 특히 지표수에서는 명확한 분수령(divide)의 지리적 한계가 지하수에서는 가변적이어서 실질적인 물 순환연구에서 지하수를 포함하게 되는 경우에는 유역의 개념을 공간적 크기에 따라 구분하는 것은 쉽지 않다. 그나마 이러한 유역의 개념을 적용하여 지표수와 지하수의 연관성을 연구하기에 가장 적당한 규모는, 하천유역의 상류에 해당하는 지역으로 기복과 경사가 상대적으로 크게 나타나서 지하수의 국지적인 유동계(local flow-system)가 형성되며 댐이나 저수지와 같은 인위적인 저류체가 없는 소유역이다. 따라서 인위적인 요소가 최소로 가미된 소유역에서의 지하

수위 변화 관측자료는 관측 유역의 물 순환체계, 특히 장기적인 관점에서 기후변화가 자연적인 물 순환체계에 미치는 영향을 가장 직접적으로 보여주는 자료라고 할 수 있다.

위와 같은 배경에서, 이 연구는 2008년부터 2011년까지 4년 동안 경기도 포천지역의 광릉 소유역에서 지하수위와 전기전도도 및 수온의 자동 관측자료와 수질분석자료를 통해 소유역에서의 지하수 유동 시스템을 해석하고, 지하수의 시·공간적 변화 양상을 분석하고자 하였다. 본 연구결과는, 지표수 및 증발산 자료와 연계되어 소유역의 종합적인 물 순환 체계를 해석하는 중요한 기반정보를 제공하게 될 것이다.

2. 연구지역

본 연구지역은 경기도 포천시 소흘읍 직동리 소재 광릉 국립수목원 내 광릉 소유역으로 37° 44'N, 127° 09'E에 위치하며, 면적은 2.21 km², 고도 범위는 90~470 m이다. 광릉 소유역은 봉선사 유역, 퇴계원 수위표 유역, 한강 서울 유역, 그리고 최종적으로 한강 대유역에 속한다(Kim et al., 2006, Fig. 1). 연구지역의 80%가 10~20°의 경사를 가지며 최대 경사가 51°인 전형적인 산악지형으로서, 얇은 토층과 풍화대 및 암반으로 구성된 지질매체로 나타난다. 기반암은 경기육괴를 구성하는 경기편마암복합체(Gyeonggi Gneiss Complex)로서 고도의 다변성작용과 고기 화성활동 및 구조운동을 받은 호상 편마암(banded gneiss)으로 구성되어 있다(교육과학기술부, 1999, Fig. 1). 약 77%가 삼림으로 이루어져 있으며 이 중 31%를 낙엽 활엽수림, 53%를 상록침엽수림이 차지하고 나머지 16%는 혼합수림 지역이다(Moon et al., 2005).

광릉국립수목원은 인위적인 교란이 거의 없는 수문연구의 적지로 HydroKorea 연구를 통해 광릉 수퍼 사이트를 대상으로 물과 탄소 수지에 대해 각각의 요소들에 대한 현장 실측자료를 다양한 규모별로 그리고 장기간의 연속 자료를 수집하여 생태수문학적 특성의 규모 종속성을 밝히고, 복잡 지형조건에서의 수문현상을 분석·예측할 수 있는 시스템을 구축하고자 하는 연구가 수행된 바 있다(Kim et al., 2006).

지하수 분야에서는 수문관측 순환해석의 한 분야로서 상류 활엽수림과 하류 침엽수림에 각각 다중심도의 동지 유형(nest-type) 관측공 MW1과 MW2를 설치하여 천부와 심부 관측정을 통해 지하수 순환 및 함양 특성을 밝혀 수문순환에 대한 지하수의 기여도를 정량적으로 평가하고,

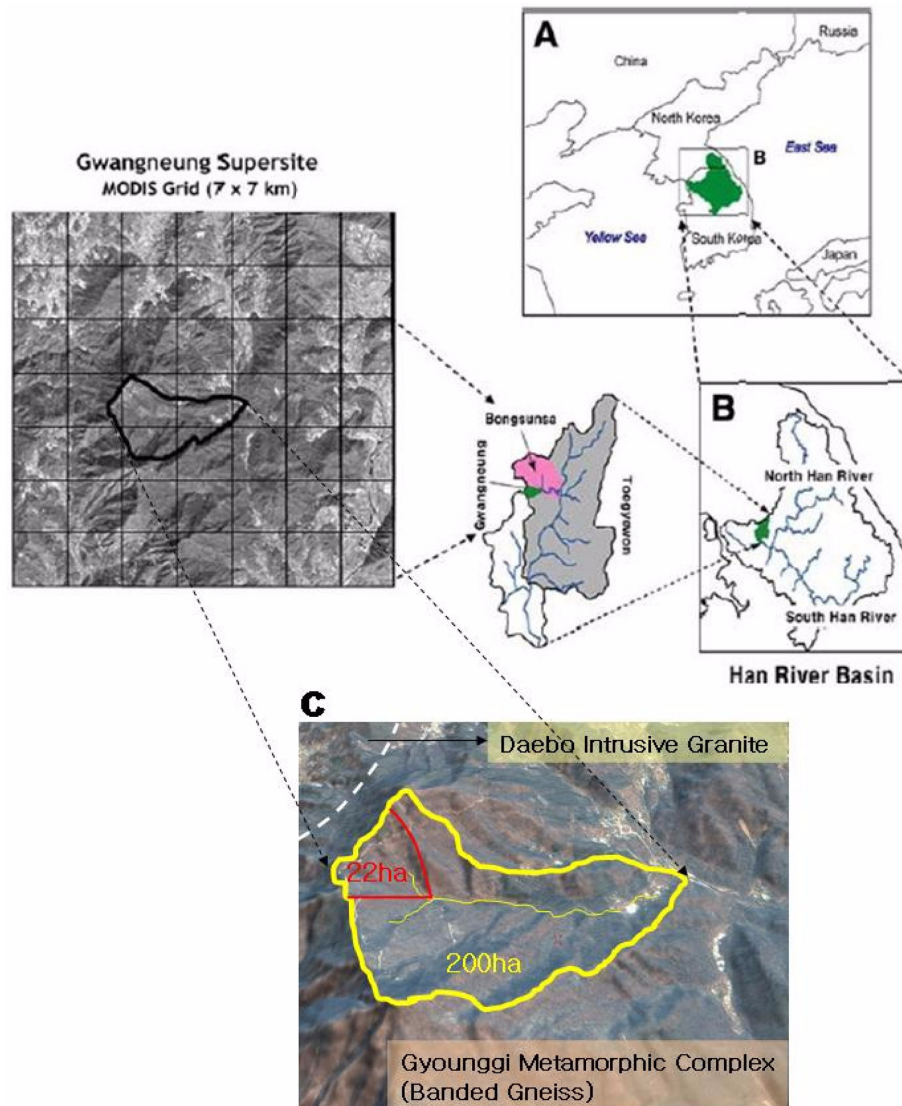


Fig. 1. Location of the study area: (a) Han river basin, (b) Bongsusa and Toegyewon watersheds, (c) A headwater catchment (22 ha) and geologic boundary of the Gwangneung catchment (200 ha) (modified by Kim et al., 2006).

나아가 인위적인 영향을 배제할 수 있는 곳에 구성된 모니터링 네트워크 자료를 활용하여 시간적, 공간적 변화에 따른 지하수의 양적/질적 변화를 분석하여 기후변화와 지하수의 상관관계를 평가·예측하기 위한 연구를 수행 중이다.

3. 연구방법

3.1. 자료의 관측 및 분석

광릉 소유역은 인위적인 교란이 거의 없어 자연 상태에서 발생하는 수문순환의 변화를 측정하기에 적합한 조건을 갖추고 있다. 지하수 관측공은 2006년 10월에, 원두부 지역 유출구 부근의 활엽수림(MW1)과 하류의 비교적 평

탄한 침엽수림 부지(MW2)에 설치되었다. 관측공은 각각 심도별로 직경 2.5 cm 크기인 3개의 관측정으로 구성된 등지 형태로, 관측정 외부에는 관측공을 보호하기 위한 직경 25.4 cm 크기의 보호관이 설치되었다(Fig. 2). MW1과 MW2 관측공이 설치된 부지 지표면의 평균해발고도는 각각 250 m, 150 m이며, 내부의 관측정 스크린 설치 구간은 MW1 관측공에서는 4~8 m(MW1a), 37~53 m(MW1b), 97~107 m(MW1c), MW2 관측공에서는 10~13 m(MW2a), 36~44 m(MW2b), 96~108 m(MW2c)이다. 이들 관측정에는 모두 자동수위·수질측정기(CTD-Diver, SWS)를 설치해 지하수위(m)와 수온(°C), 전기전도도(mS/cm)를 5분 간격으로 자동으로 관측하고 있으며, 대기압

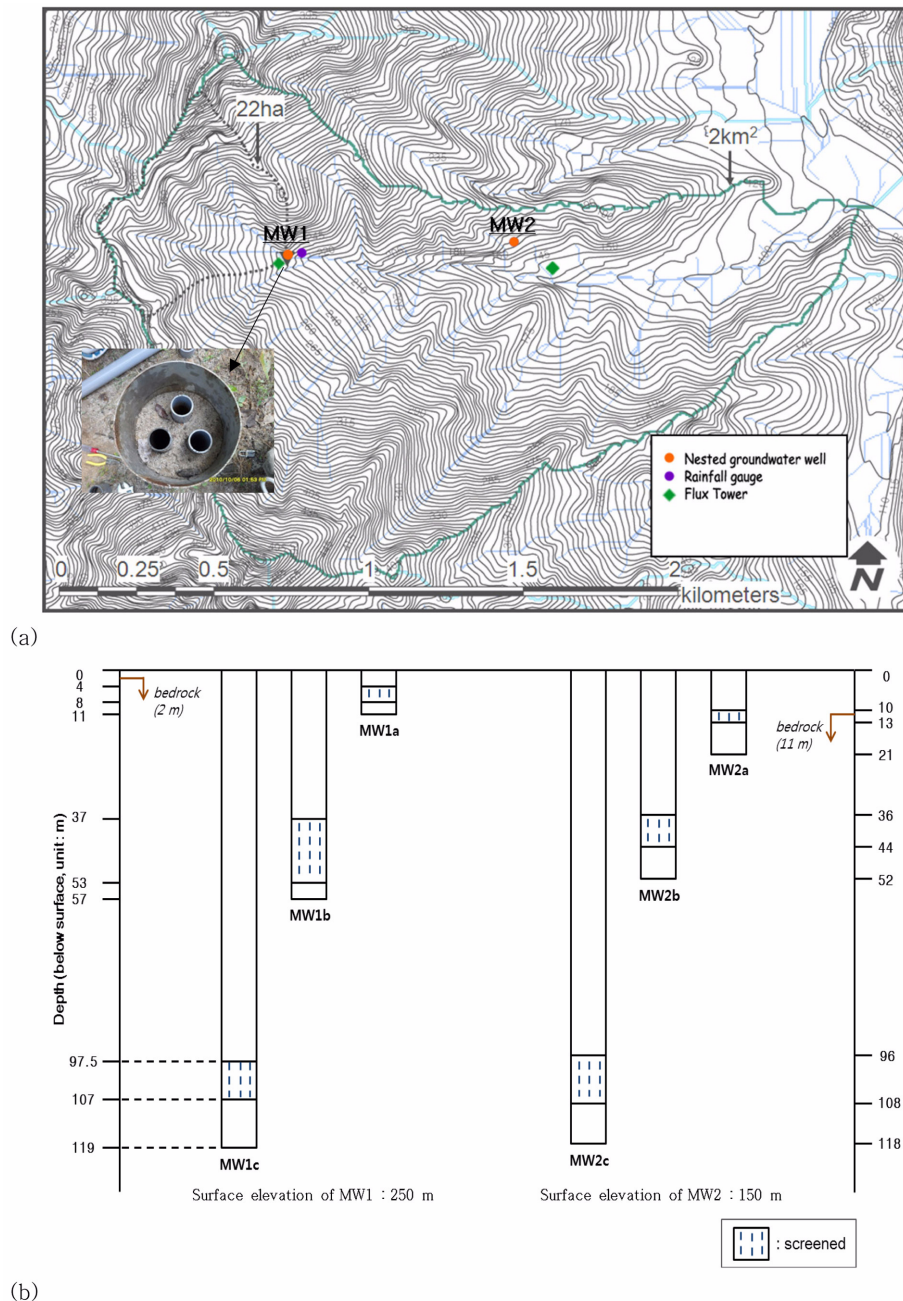


Fig. 2. Information on the study area and nest-type monitoring wells: (a) Topographic map and boundary of the Gwangneung catchment, (b) Schematic diagram of the nest-type wells.

보정을 위한 기압관측 센서(Baro-Diver, SWS)가 각각 MW1과 MW2 지점에 함께 설치되어 있어 동일하게 5분 주기로 기록되고 있다.

지하수의 유동 경로를 확인하고 시간과 공간에 따른 지하수의 변화를 분석하기 위하여 2008년 1월 1일부터 2011년 11월 22일까지 약 4년 동안 MW1과 MW2의 모든 관측점에서 관측한 자료를 활용하였다. 다만 MW2c에

서 측정된 수온, 전기전도도 값과 MW2b의 전기전도도 값은 센서의 고장으로 인한 자료의 신뢰성이 의심되어, 본 연구에서는 활용하지 않았다. 관측자료의 다운로드와 수질시료 채취를 위해 관측센서를 들어낸 경우와 장비의 점검과 보정을 수행했던 기간들에서는 부분적인 결측이 있었다. 지하수위에 미치는 강수의 영향을 분석하기 위해서, 강수 자료는 광릉 소유역 인근의 동두천 기상관측소에서

측정된 일주기 자료를 활용하였으며(기상청; www.kma.go.kr), 기온 자료는 MW1과 MW2 관측점에서 Baro-Diver를 통해 관측하였다.

장기 모니터링 자료를 통해 전체적인 경향성을 분석하고, 소유역에서의 지하수 유동과 nest-type 관측공에서의 지하수의 수직적인 거동을 분석하기 위하여 심도별로 시간에 따른 변화를 분석하였다. 또한 시간에 따른 장기적인 기온과 지하수온, 전기전도도의 변화를 확인하기 위하여 4년 동안의 전체 자료를 분석하였다. 이때 사용한 자료는 획득한 자료 중 매일 오후 12:00에 관측된 지하수위와 기온 자료를 그 날의 대표값으로 이용하였다.

3.2. 수질 및 안정동위원소 분석

시간에 따른 수질변화를 규명하기 위해 2011년 3월, 5월, 7월, 9월, 11월 등 총 5회에 걸쳐 시료를 채취하였다. 관정 내 잔류해 있던 지하수를 약 5 L/min의 양수량으로 전기전도도(EC) 값이 일정해질 때까지 양수한 후, 시료 채취와 동시에 현장에서 시료의 pH, 온도, 전기전도도(EC)를 현장용 다중 항목측정기(Thermo-Orion 5star series)를 이용해 측정하였다. 양이온, 음이온, 동위원소 분석을 위한 시료는 여과지(Whatman membrane filter, 0.45 μ m-pore)로 부유물질을 제거하여 채수한 시료로 3번 세척한 후, 폴리에틸렌 시료병에 담아 4°C로 유지되도록 냉장 보관하였다. 알칼리도 분석을 위한 시료는 필터링 과정을 거치지 않고 채수한 것을 직접 125 mL 폴리에틸렌 시료병에 가득 채운 뒤 냉장 보관하였다. 음이온과 동위원소 분석을 위한 시료도 알칼리도 분석 시료와 마찬가지로 시료병에 가득 채웠고, 양이온 분석 시료는 농질산(6 M HNO₃)을 첨가하여 pH 2 이하로 보존하였다. 알칼리도는 현장조사를 수행한 당일에 자동적정기(Titroprocessor 796, Metrohm)를 이용하여 0.01 N-HCl 적정법으로 분석하였고, 음이온(Cl, SO₄, NO₃, Br)은 이온크로마토그래피(883 Basic IC plus, Metrohm)로, 양이온 및 미량금속(Ca, K, Mg, Na, Si, Fe, Mn)은 유도결합플라즈마-방출분광기(ICP-AES, 138 Ultrac, Jobin Yvon)로 분석하였다.

각 심도별 지하수의 근원과 거동 특성을 해석하기 위하여 물 시료의 산소, 수소 안정동위원소비를 측정하였다. 일반적으로 물 분자는 각각 ¹H, ²H, ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O 등 원자량이 다른 수소, 산소원자들이 결합하여 분자량이 각기 다른 물 분자들을 구성할 수 있다. 증발-강수-침투-함양-배출-증발로 이어지는 물의 순환에서 수소·산소의 동위원소의 분별작용(fractionation)이 발생하며(Craig, 1961a; Craig, 1961b; Craig and Gordon, 1965; Gat, 1996), 결

과적으로 지표수와 지하수 및 강수의 수소·산소 동위원소비(δ D와 δ^{18} O)의 차이가 발생한다. 동위원소의 분별을 일으키는 인자로는 고도(altitude), 이동 거리 및 기후 등을 들 수 있으며(이광식 외, 2001), 지하수의 경우, 함양과 이동과정에서 발생하는 증발산과 혼합에 의해 그 이동 경로가 길면 길수록 일반적으로 동위원소 함량이 부화(enrich)되는 경향을 보인다(Payne, 1970; Gat, 1996; Abdalla, 2009). 본 연구에서는 관측지점에서의 지하수 유동경로를 유추하고자, 현장조사에서 획득한 물 시료들의 수소·산소 안정동위원소 함량을 한국기초과학지원연구원의 Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer(S-IRMS, Isoprime, GV Instruments)를 이용하여 분석하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 지하수위 변동특성

4.1.1. 상류 관측정 MW1

상류에 설치된 MW1 관측공에서 나타난 지하수위 변화는, 심부(MW1b, MW1c)의 수위가 천부(MW1a) 수위보다 약 1.4 m 정도 높으며, 이러한 차이는 관측기간 중에 지속적으로 유지되고 있다(Fig. 3a). 또한 장기적으로는 천부 관측정(MW1a)은 지속적인 지하수위의 상승세를 보이고 있으나, 심부 관측공에서는 오히려 지하수위의 하강(MW1b) 내지 변화가 나타나지 않는다(MW1c). 이러한 차이를 볼 때, MW1 관측지점에서는 천부 관측공(MW1a) 하부에서 심부 관측공(MW1b)의 스크린이 설치되어 있는 지표 하 11~37 m 사이에 저투수층이 존재하며, 심부 지하수는 이 층에 의한 압력을 받고 있는 피압(confined) 지하수계인 것으로 해석할 수 있다. 또한 Fig. 3a에서 보이는 것처럼 강우가 발생하여도 강우사건별 수위 상승이 나타나지 않는 것이 이를 뒷받침 한다.

4.1.2. 하류 관측정 MW2

MW2 관측공에서 보이는 시간에 따른 지하수위 변화는 천부(2a)와 심부(2b, 2c) 관측공 모두가 유사한 변동성을 보인다(Fig. 3b). 이러한 변동은 강수에 대한 반응으로, 집중호우를 보이는 특정일을 제외하면 강우량의 증가에 따라 수위상승 정도가 비례하게 나타나며 갈수기와 풍수기의 계절적인 변화도 함께 보이고 있다. 강수에 대한 심부 지하수위의 변동이 천부 지하수위 변동과 유사하며, 그 변동의 크기도 유사함은 관측정 MW2의 지점에서는 심부 100 m까지의 지하수계는 비피압(unconfined) 지하수계임을 지시한다. 또한 심부로 갈수록 지하수위가 높아지는 것

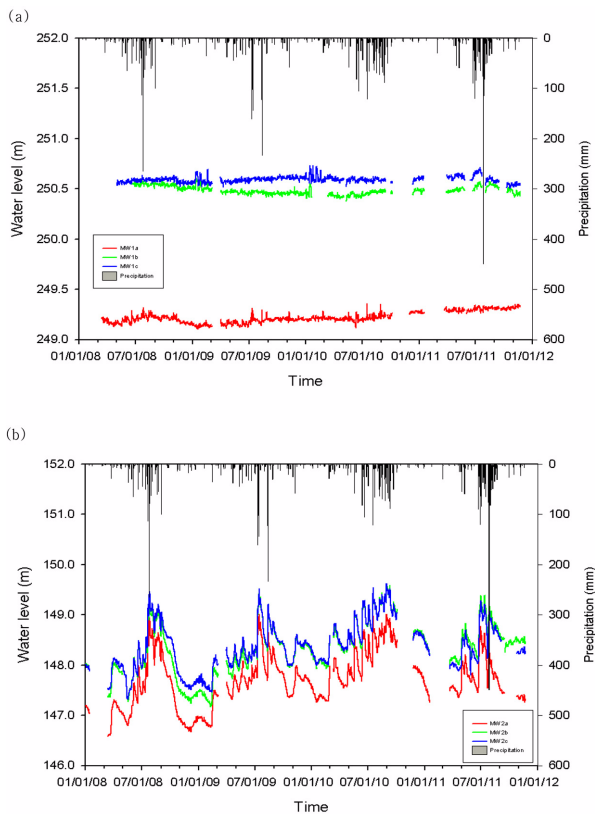


Fig. 3. Water-level trends and precipitation of (a) MW1 (b) MW2 in the Gwnagneung catchment.

($2c > 2b > 2a$)은 이 관측공 지점에서 지하수의 흐름이 상향이며, 약 40 m 남측의 하천으로 배출되는 형태임을 지시한다. MW2의 천부(MW2a)와 심부(MW2b, MW2c) 지하수는, 갈수기에는 수직수리경사도가 MW2a-MW2b-MW2c 간에는 각각 0.017 m/m, 0.004 m/m였으며, 풍수기에는 각각 0.015 m/m, 0.001 m/m 었다. 갈수기의 수직수리경사도가 풍수기에 비해 크게 나타나며, 이는 갈수기에 지하수의 상향 이동에 의한 지표 유출이 관측공 남측 하천의 유량을 유지하는 중요한 인자임을 지시한다.

4.2. 지하수 함양 특성

천부와 심부 관측점에서 관측된 수위 모니터링 자료에 보이는 계절적 변동은, MW1에서는 갈수기와 풍수기에 최대 0.2 m의 변동을 보이나, MW2에서는 최대 변동폭이 2.2 m로 상대적으로 크게 나타난다. 이러한 차이의 원인으로는 비포화대 물질의 투수성과 지표면의 경사도 및 식생 발달 정도의 차이에 의한 강수 함양률의 차이를 고려할 수 있다.

MW1과 MW2의 위치는 인위적인 식생의 변화가 최소화된 자연보존림 내부의 지역으로 활엽수림과 침엽수림으

로 식종의 차이는 있으나 전체적으로 잘 발달된 수목군을 이루고 있어 식물의 차이에 의한 지하수위 변동의 차이가 전술한 바와 같이 크게 나타날 것으로 기대하기 어렵다. 또한 비포화대 물질은 기반암(호상편마암)에서 자연적으로 풍화된 풍화토로서 자체 구성성분에서는 큰 차이가 없다. 그러나 풍화토의 두께가 각각 2 m와 11 m로 큰 차이를 보이고 있다(Fig. 2b). 따라서 MW1과 MW2에서 보이는 지하수위 변동의 차이는, 균열 암반을 통한 지하수의 함양이 공극률이 높은 풍화토를 통한 지하수 함양보다 상대적으로 적게 나타나서 발생한 현상으로 해석된다.

본 연구지역에서 2010년 10월, 11월, 그리고 2011년 3월, 7월, 9월에 채수한 지하수 시료의 수소·산소 안정동위원소 분석 값은 Craig(1961a)가 제시한 GMWL 부근에 도시되어 전반적으로 육상 강수 기원으로 설명할 수 있다(Fig. 4). 또한 하류지역 MW2에서 분석된 동위원소비가 상류 MW1의 값보다 대체로 크게 나타난다. 이는 MW1의 지하수보다 MW2의 지하수가 강수로부터 함양된 이후 더 오랜 시간과 긴 경로를 거쳐 이동하는 과정에 발생할 수 있는 증발효과와 관측지점의 고도 차이에 의한 효과로 해석할 수 있다(이광식 외, 2001).

나아가 MW1의 지하수는 대체로 피압 지하수계임에도 불구하고 자유면 지하수계의 MW2 관측공보다 동위원소비가 낮은 것으로 보아, MW1 피압 지하수계의 함양지역이 관측지점 인근에 존재함을 의미한다. MW1이 연구대상 소유역의 상류부에 위치하고 있으므로, 하류부의 MW2보다 안정동위원소비가 낮은 것은, MW1 지역의 피압 지하수계가 국지적으로 발달된 것임을 지시한다.

4.3. 기후인자의 장기적 변화

• 강수량 변화 : 연구기간인 2008년 1월부터 2011년 11월까지 월별 그리고 연강수량의 변화는 Table 1에 나타낸 것과 같다. 2008년부터 2011년까지 해마다 연강수량이 증가하는 경향을 보이며, 2009년에는 전년도에 비해 약 20 mm 정도의 적은 양의 상승을 보이지만, 2010년과 2011년에는 급격히 증가하였다. 2010년에는 연강수량이 약 400 mm 증가하였을 뿐 아니라, 풍수기동안 월별 강우량이 이전 관측기간에 비해 대부분 상승하였고, 다른 관측 해에는 비교적 강우가 적었던 시기인 9월에도 432.5 mm의 월강우량을 나타냈다. 2011년의 강수량은 11월까지 측정된 값만을 획득하였음에도 불구하고, 연강수량의 급격한 증가를 보였던 2010년 보다 363.8 mm 증가한 것으로 나타났다. 또한 2011년의 강수 패턴은 풍수기 동안에도 특히 7월에 집중되어 급격히 상승한 형태로 나타나며, 이

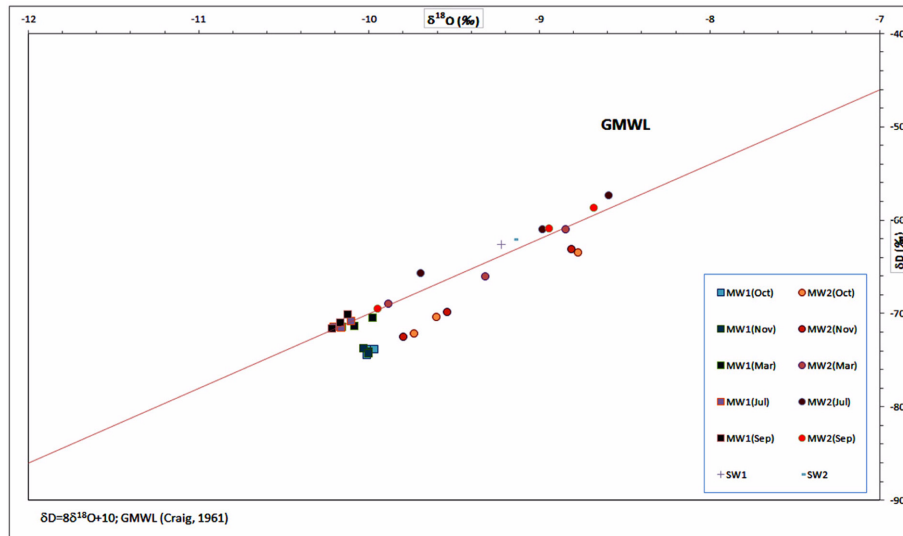


Fig. 4. Plots of $\delta^{18}\text{O}$ and δD from groundwater with depths and rainfall in the Gwangneung catchment from Oct 2010 to Sep 2011.

Table 1. The amount of annual and monthly precipitation

	2008	2009	2010	2011
Jan	6.7	11.2	25.2	6.3
Feb	6.5	40.7	46.7	29.1
Mar	44.3	58.7	81.1	6.5
Apr	36.3	69.5	61.1	95.9
May	89.6	115.7	112.2	132.8
Jun	155.2	124.6	269.1	383.1
Jul	725.6	476.6	324.4	1223.5
Aug	233.1	448.3	512.6	272.7
Sep	123.3	24.0	432.5	32.4
Oct	37.1	78.3	28.4	35.6
Nov	23.9	68.8	16.8	85.4
Dec	34.6	19.7	29.4	—
Annual Precip.	1516.2	1536.1	1939.5	2303.3

* Data obtained from the meteorological observation station in Dongducheon

때의 강수량이 연강수량의 약 53%에 해당될 정도로 집중된 형태로 나타났다(Table 1). 기상청에서 보고한 것과 같이, 장마기간 전국 평균 강수량은 589.5 mm로 1973년 이후 역대 2위로 많은 양으로 기록되었으며, 집중 호우의 발생 빈도가 높았다.

• 지하수위 변화 : 2008년 1월부터 2011년 11월까지의 관측 자료를 통해 확인된 연강수량의 증가추세에 의한 지하수위의 변화는 관측대상으로 하는 지하수매질의 심도와 유동체계에 따라서 다르게 나타난다. 피압대수층의 특성을 보이는 상류 MW1 관측정에서는 천층 지하수면의 미

세한 증가경향 ($y = 0.0001x + 249.14$; $R^2 = 0.57$)을 볼 수 있으나, 심부 지하수(MW1b, MW1c)에서는 지하수위의 변화가 거의 보이지 않는다(Fig. 3a). 강수의 직접적인 함양에 반응하는 천부 지하수계는 강수와 비례하여 증가하는 현상으로 이해할 수 있으며, 심부 지하수계의 변화는 지하수 취수를 통한 직접적인 배수가 일어나지 않는다면 크게 변하지 않는 것이 오히려 일반적이라고 할 수 있다. MW1b에서 점진적으로 하강하는 것으로 보이는 경향은 심도 약 30~50 m 정도에서 연속되는 지하수 유동경로가 인접한 하천으로 연결되어 지속적인 배출과 함께 지하수위가 낮아지는 현상으로 해석된다.

자유면 대수층의 특성을 보이는 하류부 MW2 관측정에서는 강수현상에 대한 지하수위의 반응이 모든 심도에서 즉각적으로 발생하는 것을 볼 수 있다(Fig. 3b). 그러나 지하수위의 장기적 변화경향은 뚜렷하게 보이지 않는다. 이로부터 몇 가지 가능성을 유추할 수 있다: 첫째는, 관측 기간 약 4년간의 연강수량의 점진적 증가현상이 지하수면의 장기 변화에 영향을 미치기에는 시간적으로 충분하지 않은 경우이다. 범지구적 기후변화는 장기적인 측면에서 물 순환체계의 변화를 초래하게 되고, 이러한 변화는 물 순환의 속도가 빠르게 나타나는 하천과 강수에서 가장 먼저 발견될 수 있다. 그러나 물의 흐름과 순환속도가 $10^4 \sim 10^5$ 정도 느리게 나타나는 지하수에서는 지표와 대기에서의 장기적 변동이 발현되는데 훨씬 느리게 나타날 수 있다(Nace, 1971). 따라서 본 연구에서 수행한 4년 정도의 모니터링 기간이 기후인자(기온과 강수)의 변화를 지하수에서 인지하기에는 아직 충분하지 않을 가능성이 있다.

Table 2. Chemical composition of water samples from MW1 and MW2

Mar, 2011	Temp. (°C)	EC (S/cm)	pH	Br	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	K (mg/L)	Mg	Na	Ca
MW1a	7.8	553	8.7	BDL	2.9	BDL	47.3	243	1.6	6.9	101.2	6.1
MW1b	7.2	1356	8.5	BDL	9.0	BDL	509.5	205	8.3	66.9	139.1	34.9
MW1c	6.6	782	8.3	BDL	3.6	BDL	167.3	222	4.5	27.1	89.0	22.7
MW2a	8.0	195	8.3	BDL	3.3	BDL	4.3	175	1.3	2.3	69.7	6.4
MW2b	6.9	532	9.2	BDL	4.0	BDL	2.3	274	0.8	0.9	111.3	2.2
MW2c	6.9	463	7.8	BDL	3.4	BDL	8.9	276	4.6	10.4	42.9	31.1
May, 2011												
MW1a	16.1	495	8.4	BDL	4.1	BDL	51.0	218	4.8	14.1	82.1	6.8
MW1b	15.5	1211	8.1	BDL	9.1	BDL	466.5	204	11.9	101.1	118.9	33.7
MW1c		749	7.5	BDL	13.0	BDL	163.8	216	7.7	49.5	77.4	23.3
MW2a	14.4	456	8.7	BDL	5.5	2.5	6.4	187	4.0	3.7	63.1	4.8
MW2b	13.2	505	8.8	BDL	6.4	BDL	5.3	270	3.8	1.9	92.5	2.2
MW2c	13.7	435	7.4	BDL	4.0	BDL	21.8	266	7.0	20.2	33.6	31.8
Jul, 2011												
MW1a	19.7	451	9.3	BDL	3.9	BDL	24.9	230	4.4	12.5	72.4	6.1
MW1b	21.2	1217	8.9	BDL	8.4	BDL	458.1	205	11.3	97.4	113.8	32.0
MW1c	21.4	682	8.3	BDL	5.7	BDL	154.6	224	7.2	46.9	71.3	22.2
MW2a	15.4	151	8.8	BDL	4.0	BDL	11.4	73	3.9	5.6	15.9	10.4
MW2b	16.9	475	8.9	BDL	6.2	BDL	5.4	277	3.9	1.9	91.1	2.3
MW2c	17.1	412	7.8	BDL	3.7	BDL	15.9	273	6.8	19.9	33.0	31.5
Sep, 2011												
MW1a	19.1	459	9.0	BDL	9.3	BDL	42.3	237	5.0	5.7	58.1	4.5
MW1b	20.9	1222	8.5	BDL	17.7	BDL	442.7	208	7.5	64.3	84.6	34.8
MW1c	20.5	702	8.3	BDL	9.2	BDL	173.0	224	5.5	27.5	53.7	25.9
MW2a	17.9	161	8.2	BDL	7.3	BDL	13.8	70	3.5	1.6	8.0	12.3
MW2b	18.7	499	8.9	BDL	9.1	BDL	5.8	276	3.5	BDL	64.6	0.2
MW2c	18.5	433	8.0	BDL	8.2	BDL	30.9	260	5.1	11.0	24.4	33.7
Nov, 2011												
MW1a	12.3	521	8.8	BDL	2.3	BDL	41.2	241	3.0	8.8	97.9	7.5
MW1b	10.1	1226	8.5	BDL	4.9	BDL	415.6	214	8.2	90.6	138.3	58.1
MW1c	11.3	725	8.3	BDL	5.6	1.3	149.6	223	4.0	37.6	92.2	38.7
MW2a	12.8	170	7.8	BDL	2.3	0.5	11.0	81	0.1	4.1	10.5	20.4
MW2b	12.0	521	8.8	BDL	5.4	BDL	4.7	283	BDL	0.9	114.5	2.9
MW2c	12.3	467	7.8	BDL	3.1	0.3	22.6	267	3.8	14.8	48.1	60.4

(anions; mg/L, cations; mg/L, BDL; Below Detection Level)

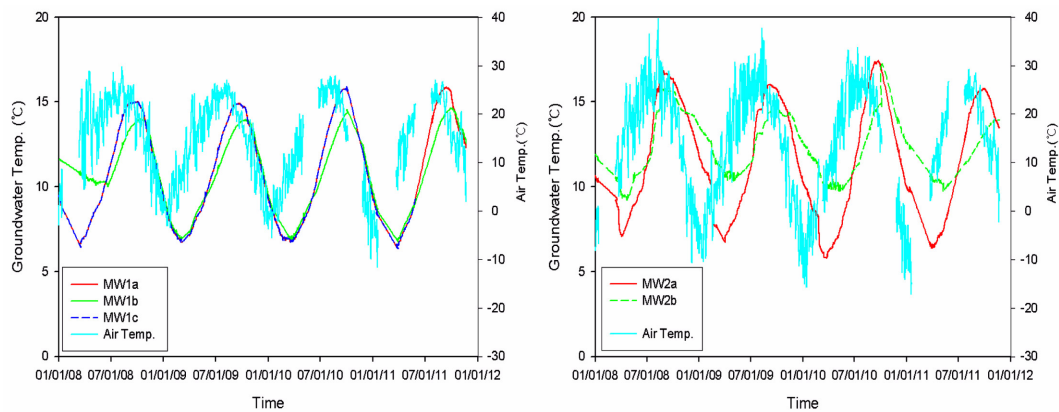
두 번째 가능성은, 연강수량이 증대하는 패턴이 지속적
인 강우일수의 증가보다는, 집중강우에 의한 강우강도의
증대 가능성이 있다. 집중호우 발생 빈도가 높고 특정 시
기에 강우가 집중된 형태를 보였던 2011년에는, 연강수량
의 증가에도 불구하고 이전 관측기간에 비하여 오히려 전
반적인 지하수위가 낮게 나타나고 있다. 이는 짧은 기간
에 집중된 강우가 지하수 함양보다는 지표유출이나 중간
유출의 증가를 초래하여, 오히려 지하수 함양은 상대적으

로 적어진 것으로 판단된다. Eckhardt and Ulbrich
(2003)가 강우량의 증가에 따른 하천유출량과 지하수 함
양량을 시뮬레이션한 모델링 결과에서도 집중호우 등에
의한 높은 강우강도를 가지고 강우가 발생하는 경우 지표
유출이 증가함을 보여주었으며, 이와 같은 현상은 지표 하
얕은 심도 토양의 포화로 인한 침투능 저하 때문에 강우
가 침투하지 못하고 지표로 배출되는 것으로 알려져 있다
(Willgoose and Perera, 2001; Lange and Leinundgut,

Table 3. $\delta^{18}\text{O}$ and δD data of MW1 and MW2 in Gwangneung catchment

(unit : ‰)

	Oct, 2010		Nov, 2010		Mar, 2011		Jul, 2011		Sep, 2011	
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD
MW1a	-9.99	-73.9	-10.00	-74.1	-9.92	-71.4	-10.16	-71.5	-10.12	-70.1
MW1b	-9.97	-73.9	-10.03	-73.8	-9.42	-66.0	-10.10	-70.9	-10.17	-71.0
MW1c	-10.01	-74.5	-10.00	-74.3	-9.94	-70.5	-10.21	-71.5	-10.22	-71.6
MW2a	-9.60	-70.4	-9.54	-69.9	-9.76	-69.0	-8.59	-57.4	-8.68	-58.7
MW2b	-9.73	-72.2	-9.80	-72.6	-10.10	-71.4	-9.70	-65.7	-9.95	-69.5
MW2c	-8.77	-63.5	-8.81	-63.1	-8.85	-61.0	-8.98	-61.0	-8.94	-60.9


Fig. 5. Changes of groundwater temperature and air temperature in MW1 and MW2.

2003; Love et al., 2010).

• 온도 변화 : 관측정에 설치된 대기압 및 기온관측 장치에서 획득한 대기 온도변화는, 약 4년의 관측기간동안 상류 MW1 지점에서는 연평균 $15.1 \pm 9^\circ\text{C}$ 정도로, 하류 MW2 지점에서는 $14.7 \pm 12^\circ\text{C}$ 정도의 폭으로 계절별 변화를 보이고 있다(Fig. 5). 이러한 대기 기온의 변화는, MW1 지점의 지하수에서 천부 MW1a에서는 약 1개월, 평균 45 m 심도의 MW1b에서는 약 2개월, 평균 102 m 심도의 MW1c에서는 약 3개월의 지연(retardation)효과를 가지고 나타난다. MW1의 천부와 심부 관측공에서 나타나는 지하수의 최저온도는 모두 동일한 시점에 약 7°C 정도를 보이며, 이는 MW1 지점의 피압상태를 유지하는 서로 다른 심도의 지하수 함양지역이 동일 지역임을 지시한다. 이러한 해석은 이들 지하수시료의 수소·산소 안정 동위원소비 값이 유사하게 나타나는 것으로도 입증된다.

하류부 MW2 지점의 대기 기온과 지하수온의 관계에서는, 천부 MW2a에서는 약 2개월, 평균 40 m 심도의 MW2b에서는 약 3개월 정도의 지연효과를 보인다. 지하수온의 변동폭은 천부 MW2a에서 $\pm 12^\circ\text{C}$ 정도이고 심부인 MW2b에서는 $\pm 7\sim 8^\circ\text{C}$ 정도로 낮아지는데, 이는 함양

된 지하수의 유동경로가 길어지면서 온도변화의 저감(attenuation)에 의해 나타나는 현상으로 해석된다.

지하수 중 총용존이온의 함량을 간접적으로 지시하는 지하수의 전기전도도(Electrical conductivity; EC)값은, MW1과 MW2의 심도별로 설치된 모든 관측정에서 시간의 경과에 따라 서서히 감소하는 형태로 나타났다(Fig. 5). 이는 연강수량의 증가에 따른 지하수 함양량의 증가와 이로 인한 용존이온의 농도 감소(희석) 효과로 해석할 수 있다. 특히, MW1a, MW1c와 MW2a 관측공에서의 전기전도도 값은 대부분 $0.20\sim 0.50\text{ mS/cm}$ 범위로 측정되었으나, 평균심도 45 m에 설치된 MW1b에서의 전기전도도 값이 약 $1.00 \pm 0.20\text{ mS/cm}$ 으로 다른 심도의 지하수에 비하여 약 2배 이상의 높은 값을 나타내었다. 이로부터 MW1b 심도에는 상하부의 MW1a와 MW1c와는 수질에 큰 차이가 있음을 알 수 있으며, 이는 동일한 지역에서 함양된 지하수가 유동경로에서 발생한 물-암석 반응의 결과로 서로 다른 수질을 갖게 되는 자연적인 경우와, 지하수 유동과정에서 인위적 오염물질과의 반응에 의한 2차적인 수질변화의 가능성을 고려할 수 있다.

• 수질 변화 : MW1과 MW2 관측공의 지하수질 성분

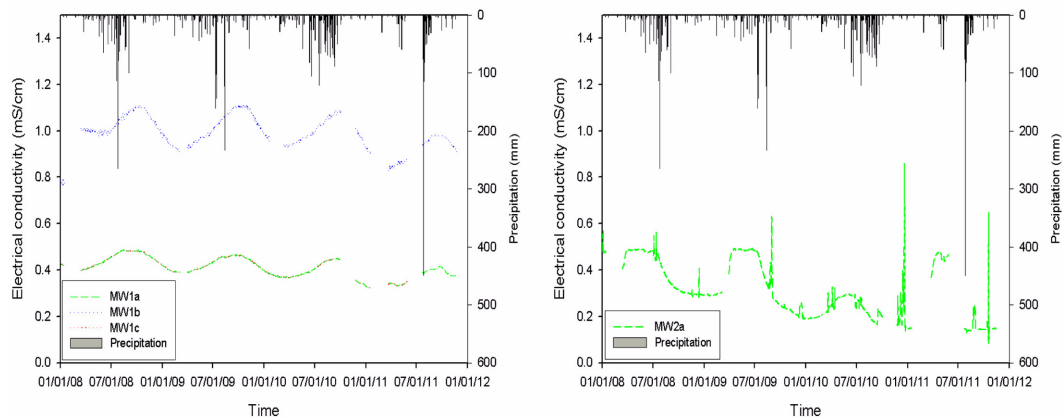


Fig. 6. Variations of the electrical conductivity (EC) of groundwater at MW1a, MW1b, MW1c and MW2a.

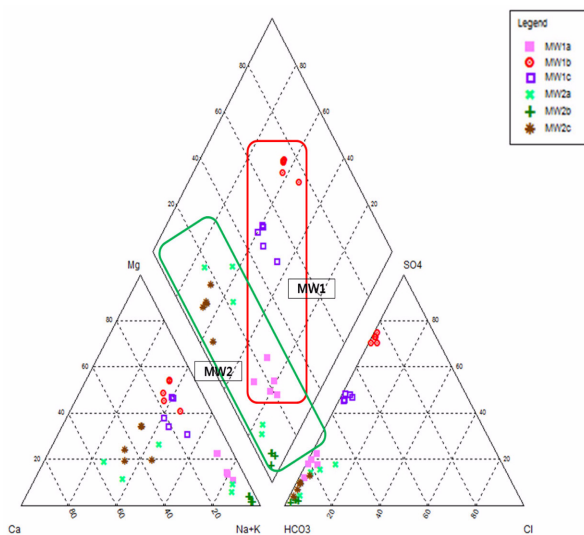


Fig. 7. Piper plots of groundwater samples from MW1 and MW2 in the study area.

을 평가하기 위해 2011년 3월부터 지하수 샘플링을 수행하여 지하수 수질의 경시변화를 분석하였다(Fig. 7). 2011년 3, 5, 7, 9, 11월에 연구지역의 MW1과 MW2 심도별 관측공에서 채수한 지하수의 수질성분은, MW1a: Na-HCO₃, MW1b: Mg-Na-SO₄-HCO₃, MW1c: Na-Mg-HCO₃-SO₄, MW2a: (Ca)-Na-HCO₃, MW2b: Na-HCO₃, Ca-Na-Mg-HCO₃ 형으로 나타나, MW2a에서 봄철의 수질유형의 변화만 있을 뿐, 장기적으로 특별한 변동이 없이 각 관측공에서 독립적으로 일정한 특성을 유지한다. 이는 조사기간 동안 갈수기와 풍수기의 계절적 변화에도 불구하고 지하수 흐름계에는 큰 변화가 없이 일정한 시스템이 유지되고 있었음을 지시하며, 결과적으로 연구지역의 지하수계는 일정한 평형상태를 유지하고 있다고 해석할 수 있다.

5. 결 론

전지구적으로 일어나고 있는 기후변화가 물 순환체계에 미치는 영향을 정확히 해석하기 위해서는 인위적인 간섭이 최소화된 유역단위에서 장기적인 순환체계에 대한 현장관측에 근거한 자료의 분석과 해석이 필수적이다. 이러한 관점에서 본 연구가 수행된 광릉수목원 내 수문생태연구 소유역은 자연과학적 현상연구의 최적지라고 할 수 있다. 본 연구에서는 2008년 이후 4년간의 연속적인 지하수계 관측 자료를 분석하여, 이 연구지역에서는 지하수의 변동에 인위적 간섭이 거의 나타나지 않음을 심도별 수위변동과 수질성분의 상이성과 일관성을 통해 입증하였다. 결과적으로 본 연구에서 사용된 자료에 나타난 수위와 수질의 변화특성은 전적으로 자연적인 물 순환계의 특성으로 해석할 수 있다.

이 연구결과로 나타난 광릉소유역의 지하수계의 특성과 기후요소와의 관계는 다음과 같이 요약할 수 있다:

(1) 연구기간동안 장기적인 관점에서 연강수량은 증가하는 추세를 보이며, 이러한 증가는 집중강우가 증대한 2011년에 뚜렷하다. 연강수량의 증가에도 불구하고 지하수위는 비교적 일정하게 유지되는 바, 이는 집중강우는 지표 침투량을 증가시키기 보다는 지표유출의 증가를 확대하므로 지하수위에는 큰 영향이 없음을 지시한다. 따라서 수자원의 확보 측면에서 볼 때, 범지구적 기후변화로 인해 우리나라의 연강수량이 증가한다고 해서 직접적으로 지하수 저장량의 증가로 이어지는 것은 아니며, 오히려 지표유출량이 증가하여 수자원 관리의 어려움이 증대될 수 있음을 의미한다.

(2) 다중심도 지하수 관측공을 사용한 심도별 지하수의

수위와 성분 분석결과, 심도별로 다른 지속적인 지하수의 흐름과 일관성 있는 수질 유지특성을 잘 보여준다. 이러한 특성은 지하수를 수자원으로 개발할 때, 심도별로 고유한 성분과 수질특성을 활용하여 특정 용도로 개발할 수 있으며, 나아가 일정한 수질을 유지하기 위해서는 이러한 자연적인 특성을 유지할 수 있는 채수 구간과 취수율 등을 적절히 조절해야 함을 의미한다. 특히 인위적인 간섭에 의해 오염물질이 유입되어 지하수로 이동하는 경우에는, 이러한 심도별 특성을 근거로 적절한 구간에 대한 관리와 복원기술을 적용하는 것이 보다 효율적임을 지시한다.

(3) 대기 기온변화에 대한 심도별 지하수의 수온변화는 관측위치와 심도에 따라서 최소 1개월부터 최대 3개월까지의 지연효과를 나타내며, 지하수의 흐름경로가 길어질수록 변화도는 감쇠하는 것을 보인다. 또한 소유역의 상류와 하류, 천부와 심부 등에서 관측된 수소-산소 동위원소비는 명확한 차이를 보이며, 상류지역에 발달된 피압 지하수계가 국지적임을 지시한다. 이러한 수온과 동위원소 함량의 특성은 국가지하수관측망의 관측 자료 등을 통해 기온과 수온의 지연시간을 평가하여 장기적으로 모니터링하고 있는 지하수체에 대하여 지표수와와의 관계를 정량적으로 평가하고, 피압 지하수계의 규모에 대한 정보를 도출하여 지하수자원의 장기적 보전·관리에 활용할 수 있다.

지하수는 느린 흐름특성으로 인해, 지표에서 발생하는 단기적인 기후요소의 변화보다는 오히려 장기적인 변동의 추세를 연구하는데 적합하다. 다만 어떠한 변화가 지속적으로 지하수에서 관측이 된다면, 이러한 변화를 일으킨 요인은 상당히 오랜 시간동안 지속적인 영향을 미쳐왔음을 의미한다. 본 연구는 인위적 간섭이 발생하지 않는 소유역을 대상으로 수행하였는데, 추후 국가지하수관측망의 자료를 활용하여 보다 큰 규모의 중·대유역에 대한 지하수문 특성의 장기적 변동을 분석·평가한다면, 궁극적으로 우리나라 수자원의 지속적 확보와 이용관리 계획의 필수적인 기반정보로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국연구재단(National Research Foundation)의 기초과학지원 과제(2012-0002989)로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

교육과학기술부, 1999, 서울-남천점 지질도폭 설명서.

국토해양부, 2006, 수자원 장기 종합 계획 (2006~2020).

이광식, 우남철, 김강주, 2001, 동북아시아 강수의 안정동위원소 조성에 영향을 주는 요인들, *지질학회지*, **37**(2), 183-192.

Abdalla, Osman.A.E., 2009, Groundwater recharge/discharge in semi-arid regions interpreted from isotope and chloride concentrations in north White Nile Rift, Sudan, *Hydrogeology Journal*, **17**(3), 679-692.

Bocheva, L., Marinova, T., Simeonov, P., and Gospodinov, I., 2009, Variability and trends of extreme precipitation events over Bulgaria (1961-2005), *Atmospheric Research*, **93**, 490-497.

Bolin, B., Döös, B.R., Jger, J., and Warrick, R.A., 1986, (eds) *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems*, Wiley, New York.

Craig, H., 1961a, Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, **133**, 1702-1708.

Craig, H., 1961b, Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen -18 in natural waters, *Science*, **133**, 1833-1834.

Craig, H. and Gordon, L.I., 1965, Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. In: Tongiorgi, E. (ed.), *Stable isotopes in oceanographic studies and paleo-Temperatures*, Lab. Div. Geologia Nucleare, Pisa, p. 9-130.

Diodato, N., 2004, Local models for rainstorm-induced hazard analysis on Mediterranean river-torrential geomorphological systems, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**(3), 389-397.

Eckhardt, K. and Ulbrich, U., 2003, Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range, *Journal of Hydrology*, **284**, 244-252.

Fowler, H.J. and Kilsby, C.G., 2003, Implications of changes in seasonal and annual extreme rainfall, *Geophysical Research Letters*, **30**(13), 1720.

Gat, J.R., 1996, Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **24**, 225-262.

Held, I.M. and Soden, B.J., 2006, Robust responses of the hydrological cycle to global warming, *Journal of Climate*, **19**(21), 5686-5699.

Kim J., Lee D.H., Hong J.K., Kang S.K., Kim S.J., Moon S.K., Lim J.H., Son Y.W., 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, *Ecological Research*, **21**, 881-889.

Lange, J. and Leinbundgut, C., 2003, Surface runoff and sediment dynamics in arid and semi-arid regions. In: I. Simmers (ed.), *Understanding Water in a Dry Environment: Hydrologi-*

- cal Processes in Arid and Semi-arid Zones*, Balkema, Rotterdam, p. 114-150.
- Lehner, B., Doll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., and Kaspar, F., 2006, Estimating the impact of global change on flood and drought risks in europe: A continental, integrated analysis. *Climatic Change*, **75**(3), 273-299.
- Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C.N., Yong, B., Shafer, M.A., Riley, R., and Hocker, J.E., 2012, Hydro-Climatological Drought Analyses and Projections Using Meteorological and Hydrological Drought Indices: A Case Study in Blue River Basin, Oklahoma. *Water Resources Management*, **26**(10), 2761-2779.
- Love, D., Uhlenbrook, S., Corzo-Perez, G., Twomlow, S., and van der Zaag, P., 2010, Rainfall-interception-evaporation-runoff relationships in a semi-arid catchment, northern Limpopo basin, Zimbabwe, *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, **55**(5), 687-703.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A., and Vecchia, A.V., 2005, Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, *Nature*, **438**(7066), 347-350.
- Moon, S.K., Park, S.H., Hong, J., and Kim, J., 2005, Spatial characteristics of Gwangneung Forest site based on high resolution satellite images and DEM. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **7**(1), 116-124.
- Nace, R.L. (ed.), 1971, Scientific framework of world water balance, UNESCO Tech. Papers Hydrology, Vol. 7, 27 p.
- Payne, B.R., 1970, Water balance of Lake Chala and its relation to groundwater from tritium and stable isotope data, *Journal of Hydrology*, **11**, 47-58.
- 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.
- Trenberth, K.E., 2011, Changes in precipitation with climate change, *Climate Research*, **47**, 123-138.
- Willgoose, G. and Perera, H., 2001, A simple model of saturation excess runoff generation based on geomorphology, steady state soil moisture, *Water Resources Research*, **37**(1), 147-155.
- Yilmaz, A.G. and Imteaz, M.A., 2011, Impact of climate change on runoff in the upper part of the Euphrates basin, *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, **56**(7), 1265-1279.