지질학회지 제60권 제4호, (2024년 12월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 60, no. 4, (December 2024)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2024.021

Check for updates
ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

Article

시계열 동위원소 변동성을 통한 인위적 영향 분석과 지표수 평균체류시간의 추정

정윤영[1], 최승현[2], 신우진[3,‡], 양민준[4,5,‡]

[1]국립부경대학교 SEED 연구소
[2](주)아이엔에이코리아
[3]한국기초과학지원연구원 지구환경연구부
[4]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경지질과학전공
[5](주)와이블

Assessing the impact of anthropogenic source on the estimation of mean transit time of surface water using time series stable water isotopes

Youn-Young Jung[1], Seung-Hyun Choi[2], Woo-Jin Shin[3,‡], Minjune Yang[4,5,‡]

[1]YInstitute of sustainable earth and environmental dynamics (SEED), Pukyung national university, Busan 48547, Republic of Korea
[2]INA Korea corporation, Seoul 04184, Republic of Korea
[3]Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea
[4]Major of environmental geosciences, Division of earth and environmental system sciences, Pukyong National University, Busan 48547, Republic of Korea
[5]Wible Co., Ltd

Received: June 27, 2024 / **Revised:** July 29, 2024 / **Accepted:** July 31, 2024
‡Corresponding author: +82-43-240-5334 / **E-mail:** sirms4@kbsi.re.kr (W.J. Shin); +82-51-629-6643 / **E-mail:** minjune@pknu.ac.kr (M. Yang)

요약: 본 연구는 주요 용존이온과 다중 동위원소를 사용하여 하천수에 영향을 주는 주요 수문 인자를 규명하고 시계열 동위원소 조성의 변동성을 기반으로 평균체류시간 산정 가능성을 평가하고자 하였다. 연구지역의 하천수와 지하수에서는 SiO_2와 Cl 농도가 하천 주변 토지이용 특성에 따라 계절적으로 다르게 나타났다. 자연지역이 우세한 최상류 하천에서는 풍수기에 SiO_2 농도가 증가하는 반면, Cl 농도는 변화가 없어 기저유출을 통한 하천 내 공급이 증가되는 것으로 나타났다. 갈수기에는 논 경작지가 많은 하천의 중류 및 하류에서 SiO_2 농도는 감소하고 Cl 농도는 증가하는 경향을 보였다. 해당시기 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성은 증발의 영향을 받은 것으로 나타났으며, 하천의 화학적 특성은 논 경작지의 관개수 유입에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 중수소과잉값(d-excess)의 정현파적 변화를 기반으로 산정된 주요 지점별 하천수의 평균체류시간은 1.2년에서 1.81년으로 추정되었다. 이때 인위적 토지이용의 분포가 증가하는 하천의 중류와 하류를 기점으로 관개수의 유입은 중수소과잉값의 정현파적 변화에서 이상치로 나타났다. 이를 제거한 결과, RMSE와 NSE를 기준으로 모델의 신뢰성이 향상되었다. 주변의 토지이용이 자연지역으로 구성된 하천 상류지점에서는 가장 긴 평균체류시간을 갖는 것으로 나타났다. 반면, 하천의 평균 체류시간은 인위적으로 조성된 저수지와 농경지를 통과함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 인위적 기반시설의 존재가 지표유출을 통한 하천 내 공급을 증가시켰음을 지시한다. 더불어, 수자원 이용측면에서 인위적 기반시설은 기후변화에 따른 하천수의 대응력 및 적응력을 낮출 수 있음을 시사한다.

주요어: 안정동위원소, 물 기원, 평균체류시간, 사인 파동 접근법

ABSTRACT: This study aimed to identify the main hydrological factors influencing stream water using major dissolved ions and multiple isotopes, and to evaluate the potential for estimating mean transit time based on the variability of isotopic compositions in time series. The concentrations of SiO_2 and Cl in stream water and groundwater in the study area showed seasonal variations depending on the land use characteristics around the stream. In the upper reaches of the stream, dominated by natural areas, the SiO_2 concentration increased during

Copyright © The Geological Society of Korea 2024

the rainy season, while the Cl concentration remained stable, indicating that the stream supply significantly increased through baseflow during the rainy season. In contrast, in the mid to lower reaches, where the presence of paddy fields is more prominent during the dry season, the SiO_2 concentration decreased and the Cl concentration increased. During this period, the isotopic compositions of oxygen and hydrogen in these reaches showed an evaporation signature, indicating that the irrigation water significantly influenced the chemical properties of the stream water. The mean transit times were estimated to be 1.2 - 1.81 years for stream water. In the mid to lower reaches of the stream, where artificial land use increased, the influx of irrigation water appeared as an outlier in the sinusoidal variation of the d-excess in stream water. Removing this outlier improved the reliability of the model, as evidenced by improvements in RMSE and NSE values. The upper reaches of the stream, where the surrounding land use was predominantly natural, showed the longest mean transit time. Conversely, the mean transit time of the stream water gradually decreased as it passed through areas with artificial reservoir and agricultural land use. These results indicate that the presence of artificial infrastructure has led to an increase in surface runoff into the stream. In addition, in terms of water resource use, artificial infrastructure may decrease the resilience and adaptive capacity of stream water resources to climate change.

Key words: stable isotope, water source, mean transit time, sine-wave approach

1. 서 론

지표수의 평균체류시간(mean transit time; MTT) 산정은 유역 내 수문순환에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있으며, 이는 유역 내 수문학적 구성요소 간의 혼합과정을 이해하기 위한 통합 도구로 활용되고 있다(McGuire and McDonnell, 2006; McDonnell *et al*., 2010; Tetzlaff *et al*., 2011). 특히, 지표수의 경우 유역 내 물의 저장, 기원 및 유동경로에 대한 정보가 내제된 결과물로서 유역 내 MTT 산정의 주요 수문인자로 활용되고 있다(Spence, 2000). 더불어, 지표수의 MTT 산정은 물 유동에 대한 수치화된 지표를 제공함으로써, 기후변화에 대한 대응력 및 적응력을 평가하는데 활용될 수 있는 강점을 가지고 있다.

지표수의 유역 내 MTT 산정은 유역에 내린 비가 함양된 후 지표수나 지하수를 통해 이동하고 혼합되는 과정을 반영하는 시계열 동위원소 조성의 변화를 통해 규명할 수 있다(McGuire *et al*., 2002; Kirchner *et al*., 2010). 최근 많은 연구자들은 물 안정동위원소를 이용해 산정된 지표수의 MTT을 지형 및 지질특성과 비교 분석하여 제어인자를 규명하거나, 집수유역 내 물의 유동시간 분포를 밝히는 등 다양한 접근법으로 유역 내 물의 유동 과정을 평가하는 다양한 시도를 하고 있다(Frisbee *et al*., 2011; Hale and McDonnell, 2016). 더불어, MTT의 분포도 작성은 유역 내 발생한 오염물질의 오염 지속성을 평가하는데도 활용되어질 수 있다(McGuire and McDonnell, 2006).

지금까지 물 안정동위원소를 이용한 지표수의 MTT 산정연구는 대부분 최상위 수계하천을 포함하는 소규모 산지 집수유역에서 수행되어왔다(Jung *et al*., 2020). 하지만, 증발로 인한 동위원소 조성변화를 포함하는 인위적 수문인자가 존재하는 유역을 대상으로 수행된 연구는 전무한 실정이다. 이는 인위적 수문인자의 유입이 동위원소의 자연적 시계열 변동양상을 변화시키기 때문이다(Lee *et al*., 2021). 실제로, Reddy *et al*. (2006)는 시계열 동위원소의 진폭 감쇠를 이용한 MTT 산정에 있어 증발된 수문인자의 유입여부 구분을 주요 전제 조건으로 언급한 바 있다.

국토 대부분이 산지이며, 관개가 수반되는 논 경작지가 면적이 넓은 우리나라의 유역 조건을 고려할 때, 물 안정동위원소를 이용한 지표수의 MTT 산정에 있어 한계점을 가지고 있다. 대수층이나 하천의 유동경로를 따라 증발된 수문인자의 혼합은 산소와 수소 동위원소 조성의 진폭감쇠를 통한 MTT 추정치에 영향을 미칠 수 있기 때문이다(Reddy *et al*., 2006). 하지만, 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성은 하천수로 유입되는 주요 수문인자들 간의 혼합을 반영하므로, 증발의 영향을 포함하는 수문인자를 정성·정량적으로 구분할 수 있다면 물 안정동위원소의 계절변화에 따른 진폭감쇠 접근법을 이용한 MTT 산정에 신뢰성을 더할 수 있다.

이 연구의 목적은 농경지가 분포한 소규모 산악 지역에서 수리지화학인자와 다중 안정동위원소를 이용해 하천수의 주요 수문인자를 규명하고, 시계열의 물 안정동위원소를 이용하여 유역 내 지표수의 MTT 산정 가능성을 평가하는 것이다. 이를 위해 공주시 정안면 일대 소규모 산악유역에 분포하는 최상위수계 지류를 대상으로 시계열 조사를 수행하였다. 궁극적으로, 본 연구는 시기별 인위적 수문인자의 유입을 평가하고 물 안정동위원소를 이용한 MTT 산정에 있어 한계점을 제시하며 이를 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이 연구는 지표수의 MTT 산정을 통해 유역 내 수문순환을 파악하는데 유용한 수문학적 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구지역

연구지역은 행정구역상 공주시 정안면 일대로, 조사대상인 산악 소유역의 면적은 3.3 km^2이다. 연구지역의 지질은 선캠브라아기의 경기편마암 복합체로 구성되어 있으며, 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등이 주요 구성광물로 보고되고 있다(Kang and Lim, 1974). 연구지역은 우리나라의 전형적인 산악 소유역 내 농촌지역에 해당하는

토지이용을 보인다. 해발고도 140 m까지는 지형경사가 가파르고 자연산림이 우세하지만, 점차 지형경사가 완만해지는 하천주변을 중심으로 농경지와 주거지 분포가 증가한다(그림 1). 하천변을 중심으로는 쌀 제배를 위한 논이 농경지 면적의 대부분을 차지하며, 연구지역 하천의 북서쪽 사면에는 대규모 밤 경작지가 분포하는 특징을 가지고 있다.

연구지역과 위치적, 지질학적으로 유사한 농경지인 명곡리 지역에서 조사된 3 - 40 m 심도의 천부지하수는 약산성의 pH 값을 보이며 주로 Ca-HCO_3 혹은 Ca-Cl(SO_4) 유형이 나타나며, 약 100 m 심도의 심부지하수는 알칼리성의 pH 값을 가지며 Na-HCO_3 혹은 Na(Ca)-HCO_3 유형이 지배적인 것으로 알려져 있다(Jeong *et al*., 1998). 또한, 천부지하수는 생활하수, 축사, 비료의 영향으로 심부지하수에 비해 상대적으로 NO_3, Cl 농도가 높은 것으로 보고되고 있다. 이는 천부는 충적대수층을 통한 지하수 유동이, 심부는 파쇄대를 통한 지하수 유동이 지배적일 것으로 여겨지고 있다.

연구지역과 인접한 청주 기상관측소의 기상자료에 따르면 연구지역 일대의 1991년에서 2020년간 평년강수량은 1,232 mm였으며, 장마가 발생하는 6월에서 9월 사이에 전체 강우의 69%에 해당하는 850 mm의 강우가 발생하였다(http://www.kma.go.kr). 연구기간에 해당하는 2023년에 발생한 총 강수량은 1,806 mm이며, 이 중 6월에서 9월 사이에 전체의 75.7%에 해당하는 1,367 mm의 강우가 집중되었다. 가장 많은 강수량이 기록된 시기는 7월로 총 강수량의 38.7%에 해당하는 699 mm의 강우가 있었으며, 반면 2월은 가장 낮은 강수량인 2.8 mm를 기록하였다.

3. 연구방법

3.1. 현장조사 및 시료채취

본 연구에서는 어물천을 구성하는 연구지역 내 최상위 수계 하천의 5개 지점(GJS-1 - GJS-5), 그리고 피압 대수층에서 누출되는 용천수(SGW)와 100 m 심도의 심부지하수(DGW)를 대상으로 2023년 2월부터 12월까지 월 단위로

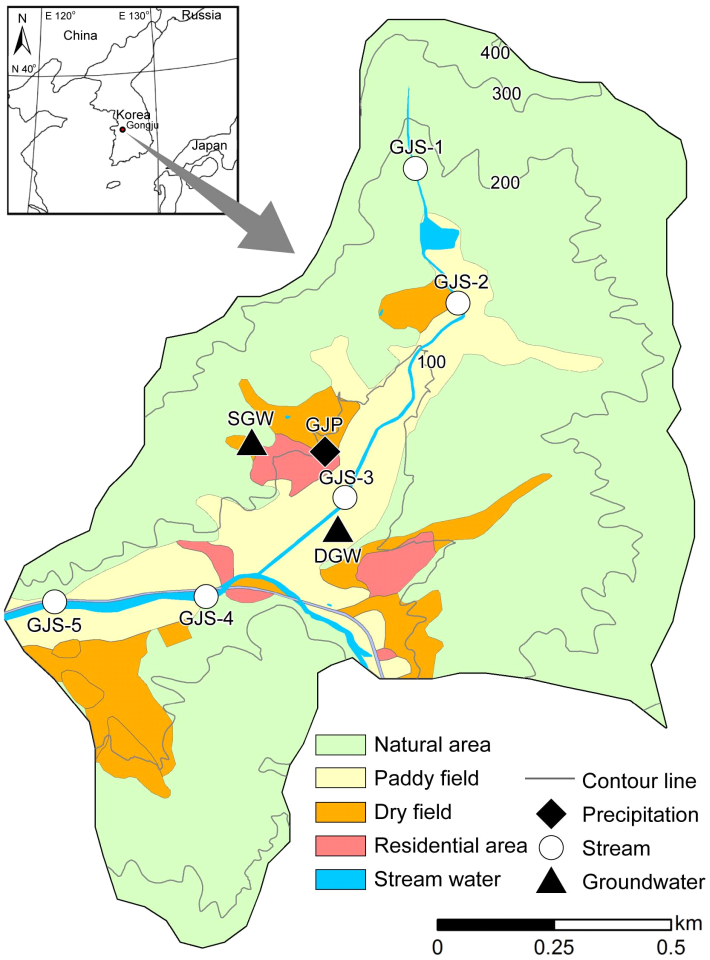

Fig. 1. Map showing the locations of precipitation, stream water, and groundwater sampling sites and land-use patterns in the study area.

조사를 수행하였다(그림 1). 하천수와 지하수 시료는 WTW 사의 ProfiLine Multi 3320를 사용하여 유동하는 상태에서 온도, pH, 전기전도도, 용존산소를 측정한 후, 안정화된 값을 얻었을 때 시료채취를 진행하였다. 물 시료는 현장에서 0.45-μm 공극사이즈를 갖는 캡슐 필터(Geotech dispos-a-filter, Geotech, USA)를 사용하여 여과하면서 서로 다른 크기의 시료 용기로 옮겨졌다. 음이온과 알칼리도 분석용 시료는 125 mL LDPE 용기(Nalgene, USA)에 빈 공간을 최소화하여 채취하였으며, 물 동위원소 분석용 시료는 20 mL 용기에 옮겨졌다. 특히, 양이온 분석용 시료는 250 mL 용량의 I-CHEM LDPE (Nalgene, USA) 병에 채취한 후 정제질산을 추가하여 pH 2 이하로 현장에서 산처리하였다. 질산염 동위원소 분석용 시료는 60 mL LDPE 용기(Nalgene, USA)에 약 10 mL의 빈 공간을 남기고 채취한 후 미생물의 활동에 의한 영향을 최소화하기 위하여 소량의 10N NaOH를 추가함으로써 약 pH 10으로 현장에서 조절하였다.

연구지역에서 발생하는 월별 강우시료(GJP)를 채취하기 위하여 오일류를 사용하지 않은 20 L 용량의 강우채수기(Palmex Regen Sampler RS2, Croatia)를 이용하였다. 강우채수기는 하천 주변에 위치한 약 5 m 높이의 건물 옥상에 설치하였으며, 총 9회 강우 시료를 채취하였다. 강우량이 많은 시기에는 지름이 작은 깔때기를 사용하여 강우채취기로 유입되는 강우량을 조절함으로써 강우시료의 손실을 방지하였다. 적설이 발생하여 강수 채취가 원활하게 이루어지지 못한 12월 시료의 경우 음지에 쌓인 신선한 눈 시료로 대체하였다. 화학성분 및 동위원소조성 분석을 위한 강수 시료들은 하천수와 지하수 시료와 같은 방법으로 현장에서 처리되었다. 채취한 모든 시료는 이동식 냉장고를 이용해 실험실로 운반되었다. 분석이 이루어지기 전까지 질산염 동위원소 분석용 시료는 냉동 보관하였으며, 이외 다른 시료는 4℃ 조건에서 냉장 보관하였다.

3.2. 실내분석

채취한 물 시료의 주요 양이온, 음이온 농도는 한국기초과학지원연구원에서 운용하고 있는 Perkin Elmer Optima 8300Du ICP-OES와 Dionex ICS-1100을 이용하여 각각 분석하였다. 알칼리도는 자동적정기(T50A; Mettler-Toledo, Columbus, OH, USA)를 이용하여 pH가 4.5가 될 때까지 0.01N HCl로 적정하여 측정하였다. 측정된 주요 용존이온의 전하균형오차(charge balance error; CBE)는 전기전도도(EC)를 기준으로 50 μS/cm 이하의 낮은 값을 보이는 강수시료는 5% 이상을, EC 값이 50 μS/cm 이상인 하천수와 지하수 시료에서는 대부분 5% 이내의 CBE를 만족하였다. 주요 양이온 및 음이온 농도의 경우 국립부경대학교 지구환경융합분석센터의 유도결합플라즈마 분광분석기(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy; ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer)를 이용해 교차분석을 수행하였으며, 모든 분석항목에 대한 오차는 5% 이하였다.

채취한 물 시료의 산소와 수소 동위원소 조성($\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$)은 한국기초과학지원연구원에서 운용하고 있는 Picarro 사의 4세대 분석장비인 L2140-i를 이용해 분석하였다. 해당 장비는 유기산에 의한 동위원소 조성의 간섭을 피하고자 마이크로 연소 모듈(micro-combustion module)을 기화기에 추가 장착하였으며, 산소와 수소 동위원소조성에 대한 분석오차는 각각 ± 0.05‰와 ± 0.5‰이다. 물의 산소와 수소 동위원소조성은 국제표준물질인 VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water 2)를 기준으로 δ-표기법(‰)을 이용해 보정하였다. 분석에 사용한 보정시료는 1차 표준물질인 VSMOW2 ($\delta^{18}O$ = 0‰, $\delta^{2}H$ = 0‰), GISP ($\delta^{18}O$ = -24.76‰, $\delta^{2}H$ = -189.5‰), SLAP2 ($\delta^{18}O$ = -55.5‰, $\delta^{2}H$ = -427.5‰)와 한국지질자원연구원의 2차 표준물질인 KWS-N1 ($\delta^{18}O$ = -5.16‰, $\delta^{2}H$ = -45‰), KWS-N2 ($\delta^{18}O$ = -8.59‰, $\delta^{2}H$ = -56.2‰), KWS-D ($\delta^{18}O$ = -12.2‰, $\delta^{2}H$ = -87.6‰)가 사용되었으며, 이는 분석과정에서 발생할 수 있는 변동성(drift)와 잔류효과(memory effect)를 식별하는데 활용되었다.

질산염의 질소와 산소 동위원소조성($\delta^{15}N\text{-}NO_3$와 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$)은 Sigman *et al*. (2001)에 의해 보고된 탈질산화법을 바탕으로 분석하였다. 시료의 질산염은 탈질 미생물에 의해 아질산화질소로 전환되며, 이 과정 중에 아질산화질소와 함께 생산된 다른 가스성분과 수분은 TraceGas Pre-Concentrator (IsoPrime, UK)에 설치된 chemical trap과 GC 컬럼을 거쳐 제거된다. 정제된 아질산화질소에 대한 질소와 산소동위원소조성은 한국기초과학지원연구원에서 운용하고 있는 TraceGas Pre-Concentrator와 온라인으로 연결된 안정동위원소질량분석기(IsoPrime, GV Instruments, UK)에 의해 분석되었다. 질산염의 질소와 산소 동위원소 값은 각각 Air 및 VSMOW에 대한 δ-표기법으로 보고되었으며, 여기서 $\delta(‰) = (R_{sample}/R_{reference} - 1) \times 1000$이고 R은 각각 $^{15}N/^{14}N$와 $^{18}O/^{16}O$를 나타낸다. $\delta^{15}N\text{-}NO_3$와 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 값은 서로 다른 동위원소조성을 갖은 세 가지 국제표준물질인 IAEA-NO-3 ($\delta^{15}N\text{-}NO_3$ = 4.7 ± 0.2‰, $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ = 25.6 ± 0.4‰), USGS-34 ($\delta^{15}N\text{-}NO_3$ = -1.8 ± 0.2‰, $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ = -27.9 ± 0.6‰) 및 USGS-35 ($\delta^{15}N\text{-}NO_3$ = 2.7 ± 0.1‰, $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ = 57.5 ± 0.3‰)를 사용하여 정규화되었다.

3.3. 지표수 MTT 산정

본 연구에서는 Cartwright and Hofmann (2016), Jung *et al*. (2020)와 Stewart *et al*. (2010)에서 사용한 지수함수 피스톤 흐름 모형(Exponential-Piston flow Model, EPM)

이 적용된 사인 파동 접근법(sine-wave approach)을 이용해 강우와 수문인자의 계절변동성 변화를 MTT로 변환하였다. 실제 EPM은 다른 분산모델보다 아시아 몬순의 영향권에 있는 지역에서 수문인자 동위원소 계절변동성 표현하는데 더 적합한 것으로 알려져 있다(Kabeya *et al*., 2007). 마찬가지로, 아시아 몬순의 영향을 받는 한반도의 경우, 계절에 따른 기단의 기원이 반영되는 중수소과잉값은 계절변화에 따라 명확한 연 단위 정현파적 변동을 보이는 것으로 보고되고 있다(Jung *et al*., 2020). 강수의 수문인자 계절변동성은 정현파적 변동성(sinusoidal function)으로 설명될 수 있으며, 이와 비교하여 나타나는 위상지연과 진폭감소를 계산하여 5년 이내의 하천수 혹은 지하수의 MTT가 추정될 수 있다(Maloszewski *et al*., 1983; Asano *et al*., 2002). 본 연구에서는 Jung *et al*. (2020)에 자세하게 언급되어 있는 EPM 반응함수를 사용하여 MTT를 추정하였다.

수문인자의 MTT 산정을 위한 EPM의 적합도는 평균제곱오차(RMSE; the square root of the mean square error)와 Nash-Sutcliffe 계수(Nash-Sutcliffe effciency, NSE)를 이용해 평가하였다. RMSE는 0에, NSE는 1에 가까울수록 EPM을 이용한 MTT 산정이 적합함을 의미한다. 일반적으로 NSE > 0.5인 경우 EPM이 적용된 사인파동 접근법의 신뢰성이 높다고 받아들여지고 있다(Santhi *et al*., 2001; Moriasi *et al*., 2007).

4. 결과 및 토의

4.1. 하천수와 지하수의 수리지구화학 특성

연구지역 하천수와 지하수의 전반적인 수리지화학적 특성을 확인하기 위하여 Piper diagram을 사용하여 수질유형을 나타내었다(그림 2). 하천수 상류지점인 GJS-1과 GJS-2의 시료는 (Ca,Na)-HCO_3의 수질유형을 보이며, 하류지점인 GJS-3에서 GJS-5에 해당하는 시료는 Cl과 SO_4의 상대적인 비율이 증가하는 양상을 보임으로써 (Ca,Na)-HCO_3-(Cl,SO_4)의 수질유형을 나타내었다. 이는 산림지가 발달한 상류에서 농경지의 비율이 증가하는 하류로 향하면서 수질유형이 바뀌는 전형적인 산악지역에 발달한 하천수의 수질특성으로 여겨진다(Jung *et al*., 2021). 또한, 이 지역 용천수 시료인 SGW는 Ca-Cl유형을 나타내며, 지형구배를 따라 용천수의 하천 내 유입이 지속적으로 일어날 수 있다. 심부지하수 시료인 DGW는 Ca-HCO_3 유형과 Na-HCO_3 유형으로 분류되었다(그림 2). 이들 시료 중 Ca-HCO_3 유형을 나타내는 심부지하수 시료는 연구 조사대상 관정이 개발된 이후 6개월 내에 채취한 5차례 시료(2월~6월)에서 관찰되었다. 심부지하수 관정은 논 경작지였던 곳에 개발되었으며,

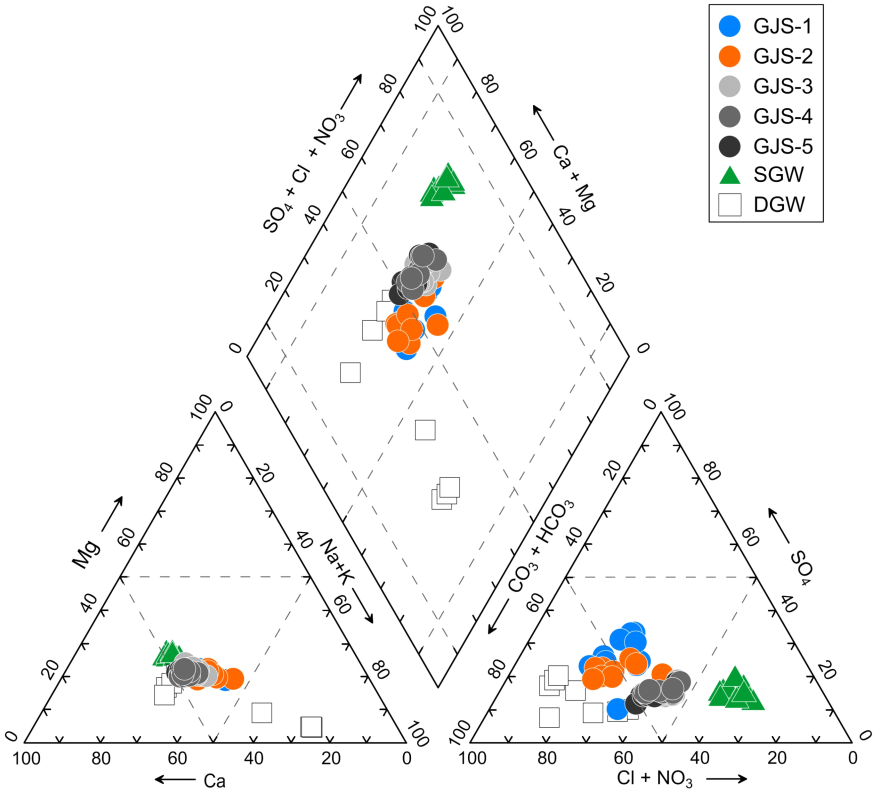

Fig. 2. Piper diagram for major ions in stream water and groundwater.

관정 주변에는 논 경작지가 좌우로 분포하고 있다. 이러한 연구지역의 상황을 고려하면, 초기에 채취된 Ca-HCO_3 유형의 심부지하수 시료는 관정개발과정에서 유입된 관개수 영향이 반영된 것으로 여겨진다. 이후 해당관정에서 양수가 진행됨에 따라 유입된 관개수의 제거는 심부지하수가 Ca-HCO_3 유형에서 Na-HCO_3 유형으로 변화하는 주요 원인으로 추정된다.

하천수의 수리화학적 특성에 영향을 주는 요인을 보다 명확하게 규명하기 위하여 자연기원과 인위적 오염 기원을 대표할 수 있는 화학성분들의 상관관계를 그림 3에 나타내었다. 연구지역의 암석은 주로 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등을 함유하고 있는 결정질의 편마암으로 구성되어 있기 때문에 SiO_2는 물-암석반응에 의해 하천수와 지하수에서 관찰되는 대표적인 성분으로 판단된다. 또한, 증발암의 화학적 풍화에 의한 하천수의 수리화학적 특성에 대한 영향은 없는 것으로 판단되며, 이는 연구지역 물 시료의 Cl 농도가 강수와 인위적 오염물질로부터 기원했다는 것을 의미한다. 연구지역 월 단위 강수의 Cl 농도는 0.2 mg/L - 3.4 mg/L (평균 1.15 ± 1.22 mg/L) 범위로 측정되었다. 상류지역 하천수 시료인 GJS-1과 GJS-2의 Cl 농도는 각각 2.8 mg/L - 5.0 mg/L (평균 4.0 ± 0.6 mg/L)와 3.6 mg/L - 5.7 mg/L (평균 4.4 ± 0.7 mg/L)의 농도 범위를 보인다(그림 3a). 상류 지점의 Cl 농도는 월별 강수와 큰 차이를 보이지 않으며, 연구기간동안 비교적 일정한 값을 나타낸다. 이는 산림지에서 기원한 하천수의 Cl 농도가 주로 강수로부터 기원한다는 것을 의미한다. 한편, 그림 3b에서 SiO_2 농도는 갈수기에 상대적으로 낮고 풍수기에 높은 계절변화를 보이는데, 이는 풍수기에 강수와 암석사이에 화학적 풍화가 원활하게 이루어진 결과로 해석된다(Jung *et al.*, 2021). 이와 대조적으로, 하류지점인 GJS-3에서 GJS-5구간 시료의 경우 SiO_2와 Cl 농도의 채취 지점별 차이는 보이지 않지만 계절변화는 뚜렷하게 관찰된다(그림 3b와 c). 갈수기에서 풍수기로 갈수록 SiO_2 농도는 증가하는 반면 Cl 농도는 감소하며, 서로 음의 상관관계를 나타낸다. 즉, 세 지점의 평균 SiO_2과 Cl 농도는 각각 2월 ~ 5월 시기에 12.1 ± 1.0 mg/L와 23.8 ± 3.8 mg/L, 7월초 ~ 10월 초 시기에 18.4 ± 1.1 mg/L와 14.8 ± 3.3 mg/L로 변화하였다. GJS-3 - GJS-5 시료가 하천주변 농경지 면적이 증가하는 지점에서 채취된

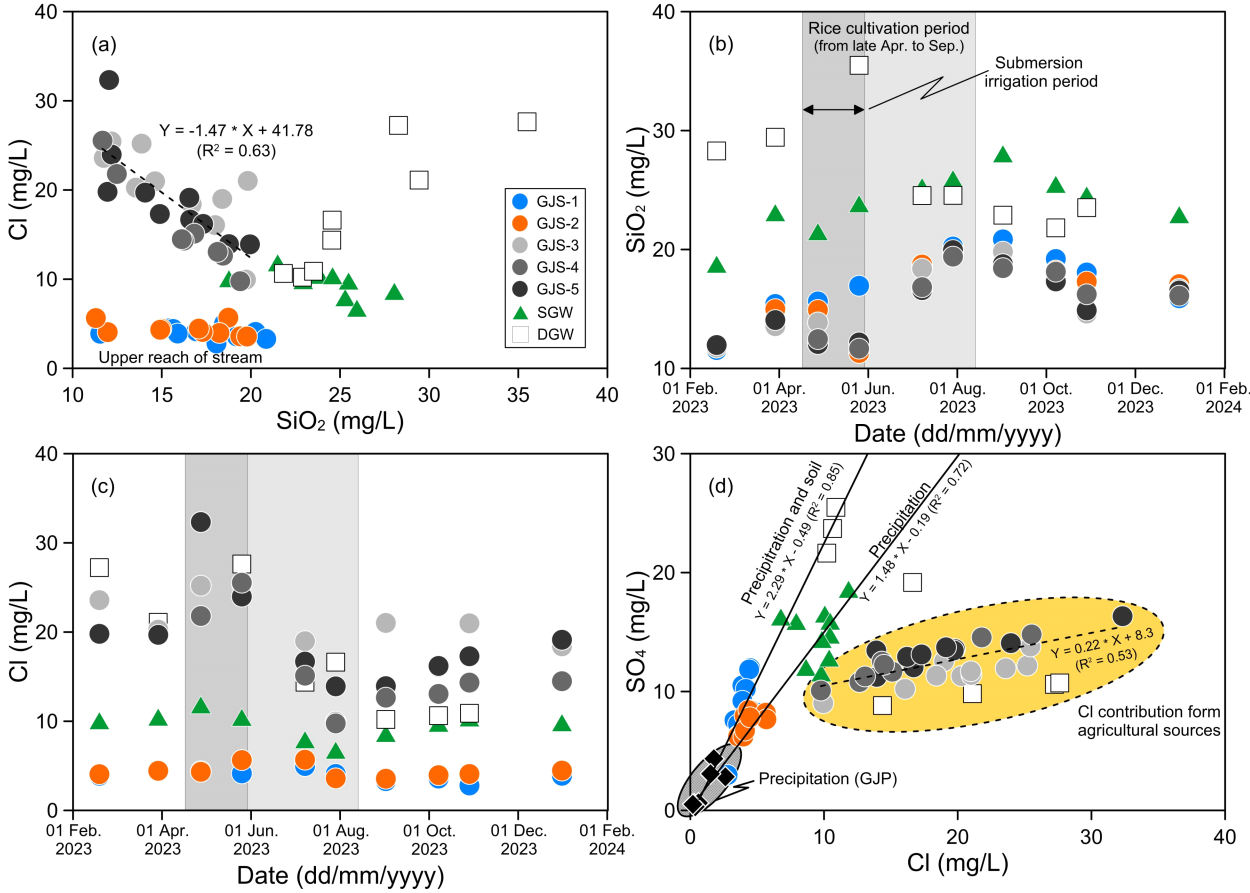

Fig. 3. Relationships between Cl and SiO_2 (a), spatio-temporal variations of the SiO_2 (b) and Cl (c) and between Cl and SO_4 (d) for water samples collected in the study area.

것을 고려한다면, 농경 활동시기와 관련된 관개용수의 유입이 하천수의 수리화학적 특성에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

연구지역 하천수의 지점별 수리화학적 특성을 밝히기 위해 지하수, 하천수 및 강수의 Cl과 SO_4의 상관관계를 나타내었다(그림 3d). 연구지역에서 채취한 강수시료의 Cl과 SO_4의 상관관계는 1.48의 기울기(R^2 = 0.72)를 보이며 하천수의 최상류 지점인 GJS-1에서 관찰되는 기울기 2.28(R^2 = 0.85)과 구분된다. 상류지점 하천수 GJS-2, 용천수 시료와 8월 이후 채취한 심부지하수 시료는 모두 이들 두 기울기 사이에 분포한다. 특히, 심부지하수 시료는 최상류 시료인 GJS-1의 기울기 주위에 도시되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 이들 시료가 주로 강수와 산림토양으로부터 기원한 물질에 의해 수리화학적 특성이 영향을 받는다는 것을 의미한다. 그럼에도 불구하고 GJS-2 시료와 용천수에서 채취한 일부 시료는 하천수의 하류지점 시료인 GJS-3, GJS-4와 GJS-5가 나타내는 상관관계 그래프의 연장선상에 위치하기 때문에 농업활동에 의한 영향도 배제할 수 없다. 즉, GJS-3에서 GJS-5구간 시료들은 다른 시료들과 비교하여 특징적으로 Cl 과잉현상을 나타내며, 자연기원 물질로 대표되는 앞선 두 개의 상관관계와 뚜렷하게 구분된다. 이는 토지이용현황을 고려했을 때 농업활동과 관계된 물질의 유입에 의해 수리화학적 특성이 주로 영향을 받았다는 것을 의미한다.

Park *et al*. (2018)은 순환관개(submersion irrigation)가 이루어지는 지역에서 관개수에 의한 지표수 및 지하수의 수질 오염이 발생할 수 있다고 보고한 바 있다. 국내 대표 농업기관인 농촌진흥청에서 제시한 최적의 모내기 시기는 5월 중순으로, 일반적으로 4월 말에서 5월 중순에 벼 제배를 위한 관개가 이루어진다(Lee *et al*., 2016). 일반적으로, 벼농사로 이용되는 논에 관개(irrigation)한 후 물떼기하는 과정을 반복하게 되는데, 이때 증발된 물이 하천으로 유입(irrigation return flow) 될 수 있다. Kim *et al*. (2009)는 국내 경작지에서 관개수로 배출되는 양은 약 26%에 이른다고 보고한 바 있다. 이 과정에서 증발에 의해 증가된 염화물이 관개수에 의해 지표로 유출되고 있는 것으로 알려져 있다(Simpson and Herczeg, 1991; Kattan, 2008; Park *et al*., 2018). 실제로, 논 경작지에서 작물 제배를 위해 비료 살포 시 양이온은 Ca, Mg, 음이온은 HCO_3, SO_4, Cl이 작물에 흡수 되지 않고 토양 용액 내 많이 잔류하는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al*., 2015). 연구지역에서 하천주변이 논 경작지 분포가 증가하는 하부 3개 지점의 하천수 내 Cl과 SiO_2 농도의 변화는 벼 제배를 위해 관개가 이루어지는 시기와도 밀접한 연관성을 가지고 있다(그림 3b와 3c). 이는 해당시기 논 경작을 위해 시행된 관개에 의해 주변 하천수 수질이 직접적으로 영향을 받는다는 것을 지시한다.

4.2. 하천수와 지하수의 산소, 수소 동위원소 조성

앞서 언급된 연구지역 하천수에 영향을 주는 주요 수문인자들의 기여도를 평가하기 위하여 물 시료의 $\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$ 관계를 그림 4에 나타내었다. 연구지역 하천수의 $\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$는 -8.9‰에서 -5.3‰, -59‰에서 -39‰의 범위를, 지하수는 -8.7‰에서 -7.6‰, -58‰에서 -51‰의 범위를 보이며, Lee and Lee (1999)에서 보고된 여름 강수선에 편중된 경향을 보였다. 최상류 지점의 $\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$의 평균값은 각각 -8.2‰, -56‰로서 가장 낮은 값을 나타내며, 중류인 GJS-3에서 $\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$의 평균값은 -7.8‰, -52‰로 가장 높게 나타났다. 5월 GJS-3의 $\delta^{18}O$와 $\delta^{2}H$는 각각 -5.3‰와 -39‰ 값을 나타내며 증발의 영향으로 가장 크게 여름강수선에서 벗어난 양상을 보인다. 이는 벼 모종시기에 증발된 관개수가 하천으로 직접 유입되었음을 지시한다.

Jung *et al*. (2019)에서 보고된 인근 계룡산 동학사 유역의 고도증가에 따른 강수 내 동위원소 저하율(Isotopic lapse rate)을 바탕으로 연구지역 심부지하수의 함양고도를 추정하였다(그림 5). 하천수 시료 중 GJS-1을 제외한 나머지 지점에 대한 시료(GJS-2에서 GJS-5)는 모두 동위원소 저하율선의 우측에 도시되었다. 동위원소 저하율 선에 따르면 GJS-1는 약 255 m.a.s.l. (meter above sea level)의 상대적으로 높은 고도에서 함양된 것으로 추정된다. GJS-2에서 GJS-5 구간 시료의 경우 인위적 기반시설인 저류지와 농경지로부터 기원된 국부적 지하수 함양 혹은 증발의 영향으로 인해 $\delta^{18}O$가 증가한 것으로 보인다. 심부지하수는 수질유형에 따라 $\delta^{18}O$의 조성차이가 나타났으며, 더불어 지하수의 함양고도측면에서 확연한 차이를 보였다. Ca-HCO_3 유형일

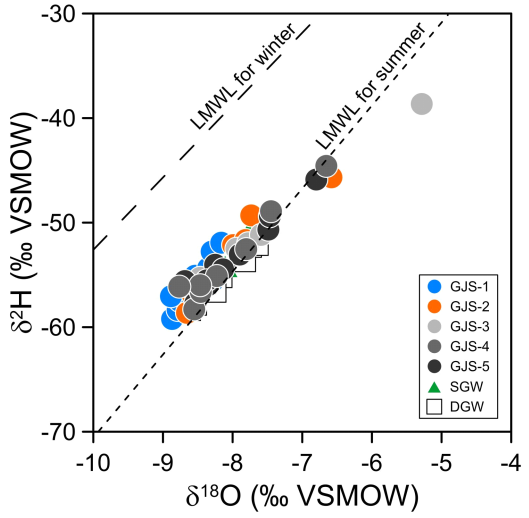

Fig. 4. Plot of oxygen versus hydrogen isotopic composition for stream water and groundwater collected in the study area. The dashed lines denote Local meteoric water lines (LMWLs) for summer and winter reported by Lee and Lee (1999).

때 $\delta^{18}O$의 평균값은 -7.8‰로 상대적으로 높은 값을 나타내는 반면, Na-HCO_3 유형일 때 $\delta^{18}O$의 평균값은 -8.5‰로 상대적으로 낮은 값을 보인다. 이는 연구지역 심부지하수에 영향력을 갖는 수원의 기여도가 변화했음을 의미한다. 대수층에서 서로 다른 수원을 갖는 물이 혼합되면 물의 화학적 반응성 및 농도는 변동되어질 수 있다(Stober and Bucher, 2005; Elliot and Younger, 2007). Roques *et al*. (2014)는 결정질 암반 대수층의 주요 수원을 크게 인위적 인자의 영향을 받는 표토영역(regolith)에서의 국부적 지하수 유동과 긴 체류시간을 갖는 유역규모의 광역적 지하수 유동으로 구분한 바 있으며, 장기간의 양수가 진행되면 파쇄대를 통한 광역적 지하수 유동에 의해 지하수의 지구화학적 특징

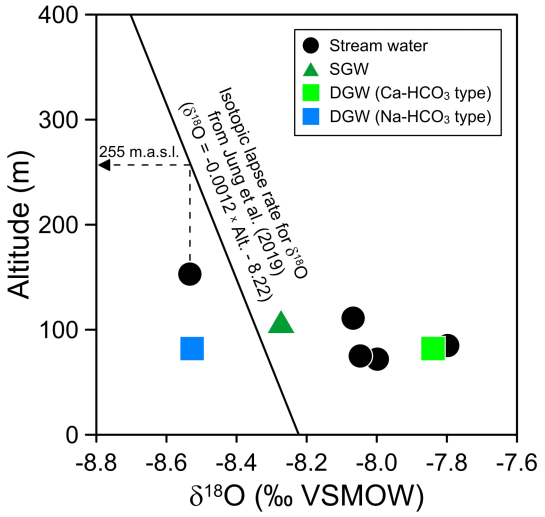

Fig. 5. Plot of altitude and oxygen isotopes for water samples collected in the study area. The solid line denotes the isotopic lapse rate with altitude reported in Jung *et al*. (2019). The dashed line denotes estimated altitude for GJS-1 sample.

이 좌우됨을 보고한 바 있다. 이러한 관점에서, 수질유형 변화에 따른 $\delta^{18}O$의 평균값 차이는 앞서 언급된 바와 같이 관정개발과정에서 유입된 관개수의 영향이 제거된 결과로 해석할 수 있다.

연구지역 하천수와 지하수에 대한 자연물질 및 인위적 오염물질의 기원을 규명하기 위하여 채취한 물시료에 대한 NO_3 농도, $\delta^{15}N$-NO_3와 $\delta^{18}O$-NO_3의 상관관계를 나타내었다(그림 6). 하천의 최상류는 강우와 유사한 NO_3 농도 및 $\delta^{15}N$-NO_3 조성을 보인 반면, 하류로 갈수록 NO_3 농도 및 $\delta^{15}N$-NO_3 조성은 용천수 및 심부지하수가 도시된 영역으로 향하며 분산된 특성이 증가되는 양상을 보였다. 강우를 제외한 모든 물 시료의 $\delta^{15}N$-NO_3와 $\delta^{18}O$-NO_3는 각각 -2.6‰에서 14.9‰과 -2.0‰에서 11.7‰의 동위원소 값의 범위를 나타낸다. 하천수 중 최상류지점인 GJS-1 시료의 $\delta^{15}N$-NO_3는 모두 음의 값을 보이며, 강우의 NH_4^+를 대표하는 영역에 표시된다. 상류지점인 GJS-2의 시료는 GJS-1보다 상대적으로 높은 값을 보이며, 주로 토양 유기물의 영역에 표시된다. 하류지점 시료인 GJS-3과 GJS-4 시료는 상류지점 시료와 비교하여 상대적으로 높은 $\delta^{15}N$-NO_3 값을 보이며, 모두 분뇨로 대표되는 영역에 표시된다. 이는 최상류와 상류에서 하천수의 수리화학적 특성이 강수와 토양의 영향이 두드러진 반면, 하류로 흐를수록 농업활동에서 기원한 오염물질이 유입되고 있다는 것을 의미한다. GJS-1과 GJS-2와 달리 GJS-3과 GJS-4 지점의 하천수에 대한 $\delta^{15}N$-NO_3와 $\delta^{18}O$-NO_3는 함께 증가하는 양상을 나타낸다. 이러한 GJS-3과 GJS-4 하천수의 동위원소 조성의 범위와 경향은 용천수에서도 관찰된다. 또한 심부지하수의 경우 연구대상 물 시료 중 가장 높은 $\delta^{15}N$-NO_3와 $\delta^{18}O$-NO_3값(각각 14.9‰과 11.7‰)의 범위를 보이며, GJS-3, GJS-4 및 용천수와 함께 $\delta^{18}O$-NO_3 = 1.0 × $\delta^{15}N$-NO_3 - 3.4 (R^2 = 0.81)로 표현되는

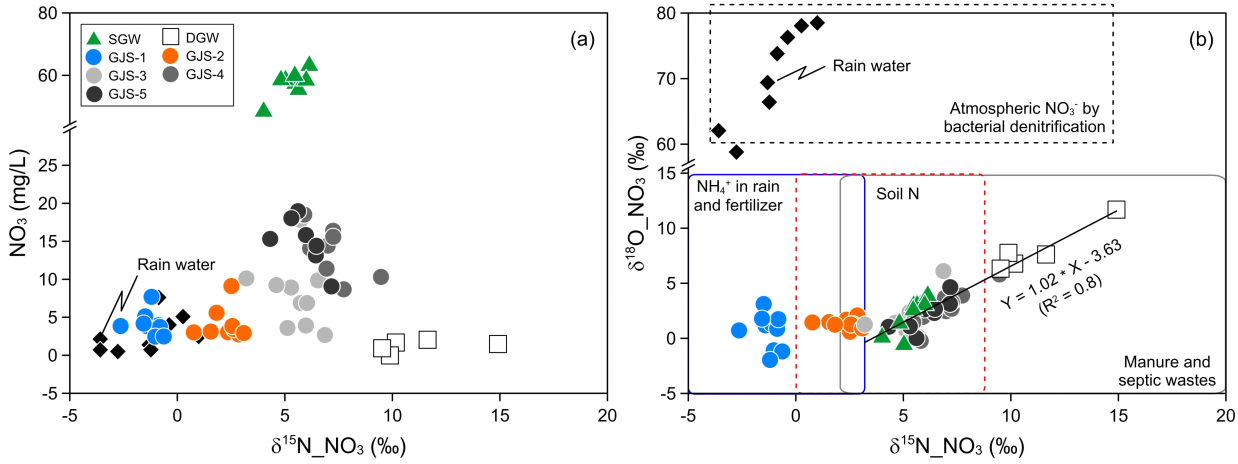

Fig. 6. Plot of $\delta^{15}N$-NO_3 versus NO_3 concentration (a) and of $\delta^{15}N$-NO_3 versus $\delta^{18}O$-NO_3 for water samples (b). The representative clusters of each end member are from Bedard-Haughn *et al*. (2003).

추세선 상에 위치한다. 질산염 농도가 하류 지점과 비교하여 약 3배 이상 높은 용천수 시료(NO_3의 평균 농도 = 58.3 mg/L)와 질산염의 농도가 0.08 mg/L 이하이거나 측정되지 않은 심부지하수 시료(NO_3의 평균 농도 = 0.8 mg/L)가 같은 추세선 상에 위치한다는 것은 질산염이 같은 근원물질로부터 기원하여 탈질 과정을 거쳤다는 것을 의미한다. 논 경작지의 영향을 받는 지하수 내 질산염은 탈질 과정을 통해 제거되어질 수 있으며, 이때 지하수의 질산염 동위원소 조성은 δ^{15}N-NO_3이 15‰, δ^{18}O-NO_3이 10‰로 높아지는 것으로 알려져 있다(Kim *et al*., 2015).

4.3. 주요수문인자의 기여도 평가

일반적으로 강수, 지하수 및 토양수의 서로 다른 비율의 기여도에 따라 하천수가 형성된다. 연구대상 지역 강우의 δ^{18}O과 SiO_2에 대한 가중평균값은 인근 계룡산에서 보고된 고도별 강우의 값과 유사하였다. 따라서 연구대상 지역 강우를 직접유입 혹은 지표유출을 대변하는 하나의 수문인자로 설정하였다. 심부지하수 시료 중 Na-HCO_3 유형을 나타내는 시료를 산지기원의 기저유출을 대표하는 수문인자로 설정하였다. 토양수는 강수, 지하수와 더불어 하천수를 형성하는 주요 수체(water body)로 여겨진다. 일반적으로 토양수는 강수의 침투(infiltration)에 의해 형성되며, 식물뿌리에서 흡수과정 중 동위원소분별은 크지 않지만 증발현상에 의해 동위원소조성은 부화될 수 있다(Park *et al*., 2018; Jung *et al*., 2020; Lyu and Wang, 2021). Jung *et al*. (2020)는 인근 계룡산 지역에서 연 단위 가중 평균된 강수와 40 cm 깊이에서 채취된 토양수 내 δ^{18}O의 연 평균값에 대해 각각 -8.7‰과 -7.4‰를 보고하였으며, 이때 SiO_2 농도는 0.1 mg/L와 7.3 mg/L였다. Park *et al*. (2018)에서 예산 지역 심도별 토양수 내 δ^{18}O의 연 평균값 범위는 -6.2‰에서 -9.6‰이었으며, 심도가 15 cm에서 90 cm로 증가함에 따라 δ^{18}O는 점진적으로 감소되어졌다. 해당지역에서 심도별 토양수의 SiO_2 연평균농도 범위는 29.4 mg/L에서 64.8 mg/L였으며, 15 cm에서 30 cm까지는 농도가 증가하였으나, 이후 90 cm에 이르면서 점진적으로 감소하는 양상을 보였다. Park *et al*. (2018)에서 보고한 30 cm 깊이 토양수의 SiO_2 농도는 연구지역 지하수에 비해 약 2.8배 높은 값으로, 강수가 토양층에 머무르는 동안 화학적 풍화가 원활하게 이루어지기 때문에 지하수의 SiO_2 농도와 비교하여 상당히 높을 것으로 예측된다. 위에 언급한 서로 다른 δ^{18}O과 SiO_2 농도를 나타내는 강수, 지하수와 토양수를 연구대상 하천수 형성에 영향을 미치는 주요수문인자로 설정한 후 수행한 기여도 평가 결과에 따르면, GJS-1을 제외한 GJS-2에서 GJS-5지점 시료들은 대부분 세 개의 수체가 갖는 범위에서 벗어나 상대적 평가의 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타났다

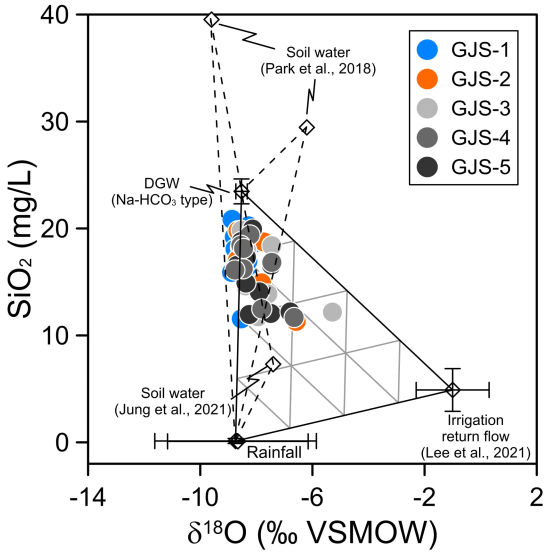

Fig. 7. Plot of δ^{18}O and SiO_2 concentration for stream water. Light gray lines represent mixing lines between the three end-members at 25% intervals. The dotted lines estimated by three components rainfall, groundwater and soil water.

(그림 7). 이에, 연구지역 하천 주변 논 경작지가 많이 분포한다는 점을 고려하여 Lee *et al*. (2021)에서 보고된 관개수를 하나의 대푯값으로 설정 시 기존 강수, 지하수와 토양수의 영향을 벗어난 시료에 대한 상대적 기여도 평가가 가능해졌다. 실제로, Lee *et al*. (2021)은 관개수가 하천으로 유입되면 δ^{18}O는 증가되어지며, SiO_2 농도는 확연한 감소되어짐을 보고한 바 있다.

하천수 형성에 미치는 강수, 토양수 및 지하수의 기여율은 전반적으로 계절변화와 밀접한 관련을 가지는 것으로 보인다. 하천수 전반에 걸쳐 풍수기에는 지하수의 기저유출에 의한 기여도가 75% 이상으로 증가하였으며, 갈수기에는 강우발생에 따른 지표유출의 상대적 기여도가 증가하였다. 산악유역의 경우 토양층 발달이 미약하기 때문에 산악유역에 발달한 하천수에 대한 지하수의 기여도가 강우사상에 의해 빠르게 증가할 수 있다. 이러한 경우 산악유역에 발달한 하천수의 동위원소조성은 평지와 달리 지형성강우에 의해 동위원소적으로 결핍된 특징을 나타내며 SiO_2 농도증가를 수반한다(Jung *et al*., 2020). 따라서, 풍수기에 연구지역 하천 전반에 걸쳐 산지에서 기원한 기저유출의 기여도가 지배적임을 추정해 볼 수 있다. 논 경작지에 관개가 이루어지는 4월~5월경 GJS-3을 중심으로 관개수의 영향은 50% 가량 상대적 기여도가 증가하였으며, 최하부 2개 지점인 GJS-4와 GJS-5에서는 25% 이상의 기여도 증가되는 양상을 보였다. 이를 통해, 갈수기에 관개수가 하천에 미치는 기여도는 제한적이며, 하천 유동이 진행됨에 따라 지하수 기저유출의 기여도가 증가하는 것으로 판단된다.

4.4. 지표수의 MTT 산정 특징

중수소과잉값의 정현파적 변화를 기반으로 계산한 하천수 주요 지점별 MTT는 상대적으로 관개수의 영향을 많이 받은 GJS-2(NSE = 0.44)와 GJS-3(NSE = 0.43)의 5월 시료를 제외하면 NSE > 0.5 조건을 충족한다(그림 8). 조건에 부합하지 못하는 NSE가 나타난 GJS-2와 GJS-3의 경우 하천수 내 d-excess의 정현파적 변화에 영향을 주는 인위적 요소의 개입이 있었음을 의미하는 것으로, 모내기 시기인 5월 증발된 관개수의 직접적인 유입이 주요 요인으로 추정할 수 있다. 이에 GJS-2부터 GJS-3를 대상으로 관개수 유입시기를 제외한 후 MTT를 재계산하였다. 재계산된 MTT 산정 모델은 NSE > 0.5 조건을 충족하였으며, 이때 R^2는 10%에서 39%, NSE는 0.13에서 최대 0.2가량 증가했다. 이러한 결과는 동위원소의 정현파적 변화를 기반으로 한 MTT 산정에 있어 인위적 저해요소에 대한 평가 및 제거가 필수적임을 시사한다. 더불어, 5월에 관개수의 기여도가 약 25%인 GJS-4와 GJS-5에서 재계산된 MTT 산정 모델의 NSE와 R^2는 거의 변동되지 않았다. 이러한 결과는 하천수계의 상류가 하류에 비해 인위적 저해요소의 유입시 동위원소적 변동성이 더 클 수 있음을 지시한다.

관개수의 영향을 제외하고 계산된 하천수 주요지점별 MTT는 표 1에 제시하였다. 편마암으로 구성된 연구지역 내 하천의 MTT 범위는 1.20 - 1.81년으로, Jung *et al.* (2020)에서 보고된 화강암으로 구성된 유역 내 하천수의 MTT 범위인 1.09 - 1.69년에 비해 다소 긴 MTT 범위를 갖는다. 최상류지점인 GJS-1에서 1.81년으로 가장 긴 반면, 유역면적 증가에도 불구하고 하천 하류로 갈수록 MTT가 점차 짧아지는 것으로 나타났다. GJS-3에서 가장 낮은 MTT인 1.2년이 예측되었으며, 이후 조사지점의 최하류에서도 MTT의 변화는 크지 않았다. GJS-2에서 MTT 감소는 GJS-2 상부에 위치한 저수지에 의해 강우 및 지표유출수가 직접 유입된 결과로 해석된다. 일반적으로, 인위적 시설증가에 따른 불투수성 포장면적의 증가로 인하여 강우의 지표유출은 증가할 수 있다(Finkenbine *et al.*, 2000; Nie *et al.*, 2011). GJS-2에서 GJS-3으로 이어지는 구간에는 하천 주변 경작지 및 주거지 분포 면적뿐 아니라 포장된 도로 면적도 함께 증가

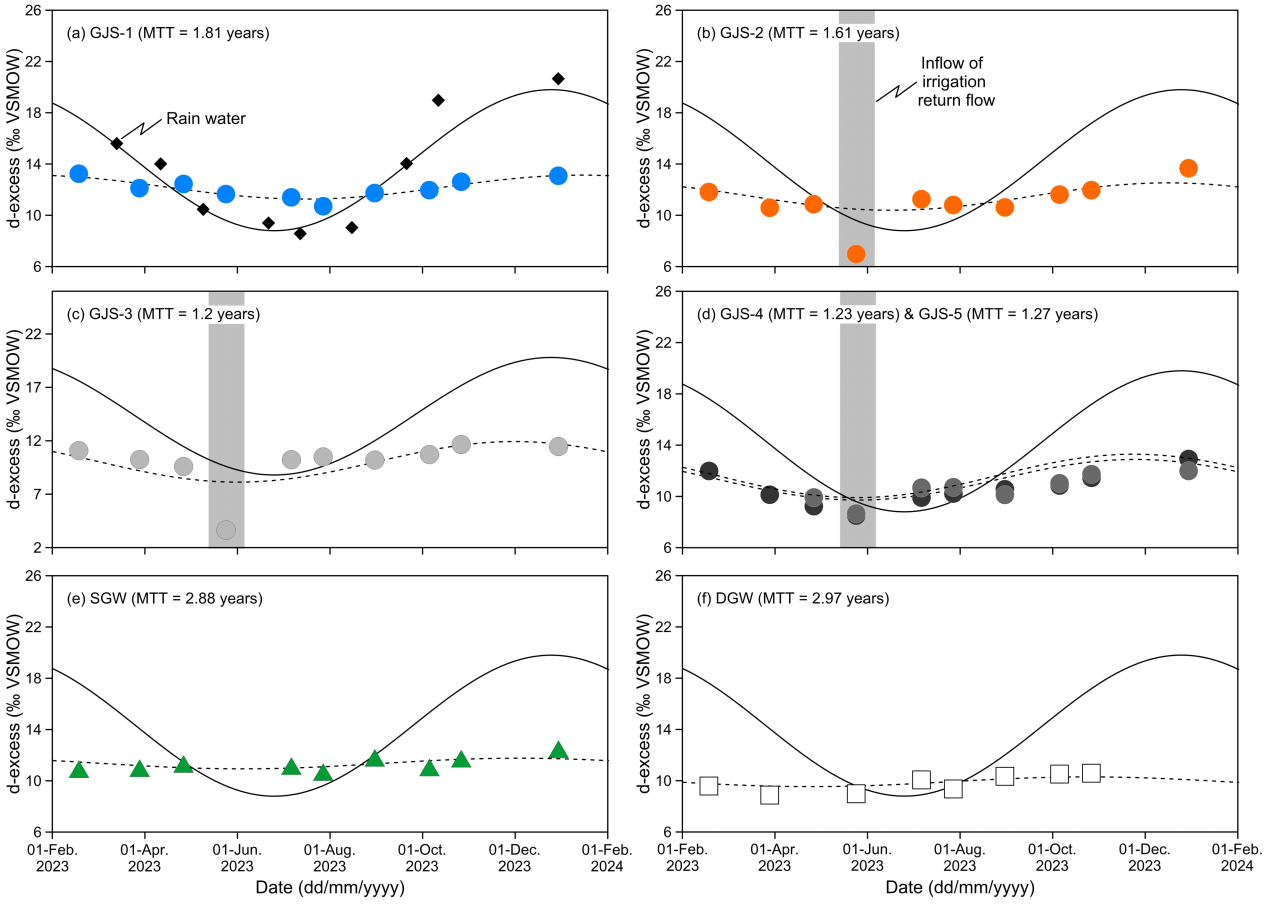

Fig. 8. Seasonal variation in d-excess of stream water and groundwater. The solid line is the fitted curve based on exponential piston flow model for precipitation. The dashed lines are the fitted curves based on exponential piston flow model for stream water and groundwater.

Table 1. Fitted parameters and calculated mean transit time (MTT) of stream water and groundwater using an exponential piston flow model in the study area.

Sample ID	GJS-1	GJS-2	GJS-3	GJS-4	GJS-5	GJG-1	GJG-2
MTT (year)	1.81	1.61	1.20	1.23	1.27	2.88	2.97
n	10	9	9	7	9	10	8
R^2	0.86	0.62	0.86	0.90	0.83	0.33	0.83
RMSE	0.29	0.57	0.50	0.45	0.50	0.44	0.43
NSE	0.85	0.62	0.63	0.81	0.81	0.32	0.55
Average*	12.2	11.5	11.2	11.6	11.3	11.4	9.9
Amplitude*	0.9	1.1	1.7	1.7	1.6	0.4	0.4

*d-excess values of water samples collected at each sampling site

하였다. 이는 연구지역에서 발생한 강우의 지표유출을 통한 하천으로 유입 비중을 증가시키는 반면, 상대적으로 긴 MTT를 갖는 지하수의 상대적 기여도를 감소시킬 수 있다.

5. 결 론

농경지가 분포한 산악소유역 내 지표수의 수질을 좌우하는 인위적 수문인자를 구분하고 MTT 산정 가능성을 파악하고자 주요용존이온 및 다중 동위원소의 시계열 조사를 수행하였다. 연구지역 하천수 내 SiO_2와 Cl 농도를 기준으로 크게 2개의 시계열 변동패턴이 구분되었으며, 이는 하천 유동거리 증가에 따른 토지이용변화와 밀접한 연관이 있는 것으로 나타났다. 하천 전반에 걸쳐 강우가 집중되는 시기 높은 SiO_2농도 증가는 지하수의 기저유출량 증가와 관계된 것으로 보인다. 반면, 하천의 하류구간을 중심으로 갈수기 Cl의 농도증가는 동위원소적 부화를 수반하는 관개수의 유입을 지시하였다. 논 경작지에 위치한 심부지하수의 경우 갈수기 Ca-HCO_3유형이 지배적이며, 풍수기 이후 Na-HCO_3 유형으로 변화하는데, 이는 양수가 진행됨에 따라 유입된 관개수가 제거된 결과로 보인다.

$\delta^{18}O$과 SiO_2 관계로부터 하천수에 대한 관개수의 상대적 기여도가 5월에 가장 크게 관찰되었다. 해당 시기 GJS-3에서 관개수의 상대적 기여도는 약 40%로 계산되었으며, 이는 EPM이 적용된 사인 파동 접근법을 이용한 MTT 산정에 있어 이상치(outlier)를 의미한다. 해당 이상치가 제거된 모델은 R^2와 NSE를 기준으로 최대 39%, 0.2가량 증가되어 확연한 모델의 개선이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 반면, 관개수의 기여도가 상대적으로 적게(약 25%) 나타난 하부 2개 지점 하천수에서는 관개수 유입에 따른 모델의 개선효과는 상대적으로 크지 않았다.

하천수의 MTT는 인위적 시설이 존재하지 않는 최상류 지점에서 가장 긴 MTT인 1.81년이 계산되었으며, 저수지를 거쳐 1.61년으로 감소하였다. 하류로 흐르면서 하천 주변 포장면적의 증가와 더불어 1.2년까지 MTT가 감소하는 것으로 예측되었다. 해당 결과는 유역 내 MTT 측면에서 인위적 기반시설의 증가로 인해 수자원의 기후변화 대응력 및 적응력을 낮출 수 있음을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업(No. RS-2023-00301702)과 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 내 안정동위원소 기반 질소 오염원 추적 및 하천 관리방안 연구(HGWMC-245 030030501, PE2024082)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 현장 조사에 최무진 박사님, 정의국군이 동행하여 도움을 주었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Asano, Y., Uchida, T. and Ohte, N., 2002, Residence times and flow paths of water in steep unchannelled catchments, Tanakami. Japan. Journal of Hydrology, 261, 173-192.

Bedard-Haughn, A., van Groenigen, J.W. and van Kessel, C., Tracing ^{15}N through landscapes: potential uses and precautions. Journal of Hydrology, 272, 175-190.

Cartwright, I. and Hofmann, H., 2016, Using radon to understand parafluvial flows and the changing locations of groundwater inflows in the Avon River, southeast Australia. Hydrology and Earth System Sciences, 20, 3581-3600.

Chung, S.O., Rodirguez-Diaz, J.A., Weatherhead, E.K. and Knox, J.W., 2011, Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea. Irrigation and drainage, 60, 263-273.

Elliot, T. and Younger, P.L., 2007, Hydrochemical and isotopic tracing of mixing dynamics and water quality evolution under pumping conditions in the mine shaft of the abandoned Frances Clliery, Scotland. Applied Geochemistry, 22, 2834-2860.

Finkenbine, J., Atwater, J. and Mavinic, D., 2000, Stream health after urbanization. Journal of the American Water Resources Association, 36, 1149-1160.

Frisbee, M.D., Phillips, F.M., Campbell, A.R., Liu, F. and Sanchez, S.A., 2011, Streamflow generation in a large, alpine watershed in the southern Rocky Mountains of Colorado, USA: is stream-

flow generation simply the aggregation of hillslope runoff responses. Water Resources Research, 47, W06512.

Hale, V.C. and McDonnell, J.J., 2016, Effect of bedrock permeability on stream base flow mean transit time scaling relations: 1. A multiscale catchment intercomparison. Water Resources Research, 52, 1358-1374.

Jeong, C.H., Hwang, J. and Park, C.H., 1998, Geochemical Water Quality and Contamination of Shallow and Deep Groundwaters in Myunggok-ri, Kongju. Economic and Environmental Geology, 31, 485-498 (in Korean with English abstract).

Jung, Y.Y., Koh, D.C., Lee, J., Tsujimura, M., Yun, S.T. and Lee, K.S., 2020, Mean transit time and subsurface flow paths in a humid temperate headwater catchment with granitic bedrock. Journal of Hydrology, 587, 124942.

Jung, Y.Y., Koh, D.C., Shin, W.J., Kwon, H.I., Oh, Y.H. and Lee, K.S., 2021, Assessing seasonal variations in water sources of streamflow in a temperate mesoscale catchment with granitic bedrocks using hydrochemistry and stable isotopes. Journal of Hydrology: Regional Studies, 38, 100940.

Jung, Y.Y., Koh, D.C., Yoon, Y.Y., Kwon, H.I., Heo, J., Ha, K. and Yun, S.T., 2019, Using stable isotopes and tritium to delineate groundwater flow systems and their relationship to streams in the Geum River basin, Korea. Journal of Hydrology, 573, 267-280.

Kabeya, N., Katsuyama, M., Kawasaki, M., Ohte, N. and Sugimoto, A., 2007, Estimation of mean residence times of subsurface waters using seasonal variation in deuterium excess in a small headwater catchment in Japan. Journal of Hydrology, 21, 308-322.

Kang, P.C. and Lim, J.H., 1974, Explantory text of the geological map of Gwangjeong. Sheet 6623-Ⅳ (1:50,000), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 31 p (in Korean with English abstract).

Kattan, Z., 2008, Estimation of evaporation and irrigation return flow in arid zones using isotope ratios and chloride mass balance analysis: case of the Euphrates River, Syria.Journal of Arid Environments, 72, 730-747.

Kim, H., Kaown, D., Mayer, B., Lee, J.Y., Hyun, Y. and Lee, K.K., 2015, Identifying the sources of nitrate contamination of groundwater in an agricultrual area (Haean basin, Korea) using isotope and microbial community analysis. Science of the Total Environment, 533, 566-575.

Kim, H.K., Jang, T.I., Im, S.J. and Park, S.W., 2009, Estimation of irrigation return flow from paddy field considering the soil moisture. Agricultural water management, 96, 875-882.

Kirchner, J.W., Tetzlaff, D. and Soulsby, C., 2010, Comparing chloride and water isotopes as hydrological tracers in two Scottish catchments. Hydrological Processes, 24, 1631-1645.

Lee, K.S. and Lee, C.B., 1999, Oxygen and Hydrogen Isotopic Composition of Precipitation and River Waters in South Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 73-84 (in Korean with English abstract).

Lee, K.S., Park, Y. and Shin, W.J., 2021, Hydrograph separation for a small agricultural watershed: The role of irrigation return flow. Journal of Hydrology, 593, 125831.

Lee, S.H., Yoo, S.H., Choi, J.Y. and Engel, B.A., 2016, Effects of climate change on paddy water use efficiency with temporal change in the transplanting and growing season in South Korea. Irrigation Science, 34, 443-463.

Lyu, S. and Wang, J., 2021, Soil water stable isotopes reveal surface soil evaporation loss dynamics in a subtropical forest plantation. Forests, 12, 1648.

Maloszewski, P., Rauert, W., Stichler, W. and Herrmann, A., 1983, Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data. Journal of Hydrology, 66, 319-330.

McDonnell, J.J., McGuire, K., Aggarwal, P., Beven, K.J., Biondi, D., Destouni, G., Dunn, S., James, A., Kirchner, J., Kraft, P., Lyon, S., Maloszewski, P., Newman, B., Pfister, L., Rinaldo, A., Rodhe, A., Sayama, T., Seibert, J., Solomon, K., Soulsby, C., Stewart, M., Tetzlaff, D., Tobin, C., Troch, P., Weiler, M., Western, A., Worman, A. and Wrede, S., 2010, How old is streamwater? open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. Hydrological Processes, 24, 1745-1754.

McGuire, K.J., DeWalle, D.R. and Gburek, W.J., 2002, Evaluation of mean residence time in subsurface waters using oxygen-18 fluctuations during drought conditions in the mid-Appalachians. Journal of Hydrology, 261, 132-149.

McGuire, K.J. and McDonnell, J.J., 2006, A review and evaluation of catchment transit time modeling. Journal of Hydrology, 330, 543-563.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., VanLiew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50, 885-900.

Nie, W., Yuan, Y., Kepner, W., Nash, M.S., Jackson, M. and Erickson, C., 2011, Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. Journal of Hydrology, 407, 105-114.

Park, Y., Kim, Y., Park, S.K., Shin, W.J. and Lee, K.S., 2018, Water quality impacts of irrigation return flow on stream and groundwater in an intensive agricultural watershed. Science of the Total Environment, 630, 859-868.

Reddy, M.M., Schuster, P., Kendall, C. and Reddy, M.B., 2006, Characterization of surface and ground water $\delta^{18}O$ seasonal variation and its use for estimating groundwater residence times. Hydrological Processes: An International Journal, 20, 1753-1772.

Roques, C., Aqulina, L., Bour, O., Marechal, J.C., Dewandel, B., Pauwels, H., Labasque, T., Vergnaud-Ayaraud, V. and Cochreutener, R., 2014, Groudnwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer. Journal of Hydrology, 519, 3110-3128.

Santhi, C., Arnold, J.G., Willianms, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M., 2001, Validation of the SWAT model on a large river basing with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association, 37, 1169-1188.

Sigman, D.M., Casciotti, K.L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M.B.J.K. and Böhlke, J.K., 2001, A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater. Analytical Chemistry, 73, 4145-4153.

Simpson, H.J. and Herczeg, A.L., 1991, Stable isotopes as an in-

dicator of evaporation in the River Murray, Australia. Water Resources Research, 27, 1925-1935.

Spence, C., 2000, The effect of storage on runoff from a headwater sub-arctic Canadian Shield Basin. Arctic, 53, 237-247.

Stewart, M.K., Morgenstern, U. and McDonnell, J.J., 2010, Truncation of stream residence time: how the use of stable isotopes has skewed our concept of streamwater age and origin. Hydrological Processes 24, 1646-1659.

Stober, I. and Bucher, K., 2005, The upper continental crust, an aquifer and its fluid: hydaulic and chemicall data from 4km depth in fractured crystalline basement rocks at the KTB test site. Geofluids, 5, 8-19.

Tetzlaff, D., Soulsby, C., Hrachowitz, M. and Speed, M., 2011, Relative influence of upland and lowland headwaters on the isotope hydrology and transit times of larger catchment. Journal of Hydrology, 400, 438-447.